

**ELABORACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO PARA ENCAPSULAR EL
MERCURIO CONTENIDO EN LODOS RESIDUALES DE LA MINA
ARTESANAL AURÍFERA CURIACO DEL MUNICIPIO DE SANTA ROSA
CAUCA**



Uniautónoma
DEL CAUCA

**ANGIE MELISSA OROZCO YACUMAL
YESSICA MARCELA SERNA ANACONA**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE PROGRAMA DE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
POPAYÁN – CAUCA**

2023

**ELABORACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO PARA ENCAPSULAR EL
MERCURIO CONTENIDO EN LODOS RESIDUALES DE LA MINA
ARTESANAL AURÍFERA CURIACO DEL MUNICIPIO DE SANTA ROSA
CAUCA**



**ANGIE MELISSA OROZCO YACUMAL
YESSICA MARCELA SERNA ANACONA**

**Trabajo de investigación como requisito para optar por el título de
INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIA**

**Director trabajo de grado modalidad investigación Ing.
Arnol Arias Hoyos
M.S.c en ingeniería ambiental**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DEL CAUCA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE PROGRAMA DE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA POPAYÁN – CAUCA
2023**

Tabla de contenido

ABSTRACT	3
INTRODUCCIÓN.....	4
1. CAPÍTULO I: PROBLEMA	5
1.1. Planteamiento del problema.....	5
1.2. Justificación	7
1.3. OBJETIVOS	9
Objetivo General.....	9
Objetivos Específicos	9
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.1. Historia minera del Cauca	10
2.2. Marco Conceptual.....	13
2.2.1. Tipos de minería	13
2.2.2. Minería del oro	14
2.2.3. Impacto ambiental de la explotación minera de oro.....	14
2.2.4. Mercurio	16
3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	20
FASE I: Características químicas	20
FASE II Mezcla óptima para el proceso de encapsulación del mercurio	25
Fase III: Diseño de protocolo para la disposición final de residuos peligrosos	28
4.1. Características físicas y concentración de mercurio en lodos generados en la mina aurífera Curiaco.	30
4.1.1. Características de la zona de Estudio.	30
4.1.2. Pesaje de muestras de lodo.	30
4.1.3. Determinación de mercurio inicial en los lodos.	31

4.2. Mezcla óptima para el proceso de encapsulación del mercurio a través de diferentes concentraciones de la mezcla de concreto y lodo.....	33
4.2.1. Preparación de la mezcla de lodos/cemento portland.....	33
4.3. Comportamiento de los parámetros, pH, conductividad, temperatura y redox	33
4.3.1. pH	34
4.3.2. Potencial Redox vs pH	34
4.3.3. Temperatura.....	37
4.3.4. Conductividad.....	38
4.4. Pruebas de absorción por agua	38
4.5. Concentración Final de Mercurio.....	39
4.5.1. Mezcla 30/70	41
4.5.2. Mezcla 70/30	41
4.5.3. Mezcla 50/50	41
5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	47
5.1. Conclusiones.....	47
6. REFERENCIAS	49
7. ANEXOS	55

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Lugar de muestreo Santa Rosa Cauca21

Ilustración 2. Práctica en laboratorio cuarte y pesaje de muestras de lodo21

Ilustración 3. Práctica en laboratorio de Análisis de Calidad Ambiental23

Ilustración 4. Equipos de Laboratorio del SENA-7000 (Atomic Absortion Spectrophotometer marca Shimadzu) y generador de hidruros HVG-124

Ilustración 5. Mezcla húmeda de cubos de lodo27

Ilustración 6. Zonda multiparametrica el Laboratorio Ambiental de la Universidad Autónoma del Cauca y cubo de muestra con cemento y lodo28

Ilustración 7. Mina Aurífera de Curiaco municipio de Santa Rosa30

Ilustración 8. Agua lista para tomar mediciones de mercurio final39

Ilustración 9. Procedimiento para manejo de sedimentos contaminados con mercurio43

Índice de tablas

Tabla 1. Cantidad de bloques de concreto por cada diseño de mezcla	26
Tabla 2. Mezcla para la elaboración de bloques de 25 cm ³ de concreto Mezcla No.1, Mezcla No. 2 y Mezcla No. 3	30
Tabla 3. Pérdida de peso por humedad pasados 8 días	31
Tabla 4. Mercurio inicial de las piscinas de lodos	32
Tabla 5. Concentración de mg de Hg en el Bloque	26
Tabla 6. Promedio de parámetro pH durante 15 días	34
Tabla 7. Resultados Potencial REDOX con respecto al pH;	Error! Marcador no definido.
Tabla 8. Promedio de parámetro Temperatura durante 15 días	37
Tabla 9. Promedio de parámetro Temperatura durante 15 días	38
Tabla 10. Resultados concentración final de Mercurio por cada Mezcla y Piscina.	40
Tabla 11. Promedio de resultados por mezcla;	Error! Marcador no definido.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Una vez revisado el documento final del trabajo de grado titulado “ELABORACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO PARA ENCAPSULAR EL MERCURIO CONTENIDO EN LODOS RESIDUALES DE LA MINA ARTESANAL AURÍFERA CURIACO DEL MUNICIPIO DE SANTA ROSA CAUCA”; realizado por las alumnas Angie Melissa Orozco Yacumal y Yessica Marcela Serna y asistido a la sustentación del mismo, se da por aprobado el proceso y se autoriza seguir con los trámites para optar al título Profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria.



Arnold Arias Hoyos - Director

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



Natalia Eugenia Samboni Ruiz - Jurado

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca



César Fernández Morantes - Jurado

Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria
Corporación Universitaria Autónoma del Cauca

AGRADECIMIENTOS

“En primer lugar, quiero agradecerle a Dios por haberme guiado hasta esta meta, y a mi familia quienes nunca soltaron mi mano durante este proceso. A mis padres Sandra Nubia Anacona y Víctor Gerardo Serna, quienes siempre me han brindado su amor, su ejemplo y su apoyo incondicional para poder cumplir cada uno de mis objetivos, ellos son quienes me impulsan a perseguir mis metas y nunca abandonarlas frente a las adversidades, porque con su ejemplo me enseñaron que con esfuerzo y dedicación todo es posible. Quiero también darle las gracias a un ser maravilloso que esta en mi vida y es mi abuela, Isabel Burbano por todo su amor, paciencia y cuidado. A mi hermana Isabel Cristina Serna, por su complicidad, por creer en mí, y estar siempre presente en mi vida. A mi prima Sandra Milena Delgado por acompañarnos y apoyarnos siempre y a mis sobrinas Mariana Palechor y Laura Sofia Arias quienes son mis motores las cuales me impulsan a seguir adelante. Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes en mi camino, le agradezco a Dios por tenerlos en mi vida,

En segundo lugar, a mi director de tesis Arnol Arias por su profesionalismo dedicación y paciencia, sin su guía y correcciones no hubiésemos podido llevar a cabo el desarrollo de esta investigación, sus consejos los llevaré grabados para aplicarlos en mi futuro como profesional

En tercer Lugar, a todos mis docentes quienes fueron parte de mi formación como profesional quiero darles las gracias infinitas por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy poder estar aquí, sin su compromiso con cada estudiante nada de esto sería posible

Para finalizar, quiero agradecerles a mis compañeros, muchos de ellos se convirtieron en grandes amigos y cómplices de grandes historias que quedaran grabadas en mi memoria para siempre, gracias por el tiempo compartido, las experiencias vividas y las noches de traspaso con cada trabajo”.

Por Yessica Marcela Serna Anacona

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme vida, salud, por tenerme siempre de pie luchando después de tantos esfuerzos y caídas a lo largo de mi carrera profesional y haberme dado la bendición más grande que pude tener que es mi hermosa familia porque no todos tienen el privilegio de tener una familia como la mía, numerosa, unida y llena de mucho amor.

Gracias a mi abuelito que aunque ya no se encuentra conmigo, me enseñó el gran valor que tiene la familia y eso no lo cambio por nada. Me viste empezar este proceso y aunque no estes aquí conmigo viéndome terminar, siempre estarás en mi corazón. Te Amo demasiado hasta el cielo.

Agradezco eternamente a mi mamá Felisa Yacumal por su constante amor, por ser siempre el motor de esta lucha, por cada día hacerme ver la vida como una aventura y por haberme enseñado que nada es fácil pero tampoco imposible si se hace con esfuerzo y dedicación. Gracias porque siempre estuviste ahí cuidándome día y noche en la enfermedad, porque después de todo lo que nos dijeron seguimos juntas día a día luchando contra lo que se venga. Un gracias no es suficiente para todo el apoyo que me has brindado siempre y nunca me cansaré de expresarte hoy, mañana y siempre que Te Amo mucho Mami.

Estoy demasiado agradecida con mi hermano Cristian Orozco que siempre me impulsa a seguir adelante y es un gran ejemplo y orgullo para mí porque he visto el esfuerzo y dedicación que tiene por su profesión y aunque no lo diga todos los días Te Amo mucho y te admiro con el corazón ingeniero.

A mis perros Fito y Oddy que los amo con el alma y han sido un gran apoyo emocional en mi vida. Los amo mis perritos hermosos.

A nuestro asesor de tesis Arnol Arias, por la orientación y ayuda que nos brindó para poder hacer realidad este sueño, por su apoyo y consejos impulsándonos a siempre a seguir adelante. Muchas gracias profe.

Todo es posible con amor y dedicación. “Para la vida que llevamos”

Por Angie Melissa Orozco Yacumal

RESUMEN

Se realizó un estudio de investigación sobre la encapsulación del mercurio mediante el empleo de cemento, en lodos residuales de la mina aurífera Curiaco ubicada en el municipio de Santa Rosa-Cauca, debido a que en los procesos de extracción de este mineral se usan metales pesados como el Mercurio (Hg), el cual es tóxico para la salud humana y para el medio ambiente, en algunos casos incluye las emisiones al aire procedentes del calentamiento de amalgamas, así como las pérdidas directas de mercurio en la tierra y el agua. Éste puede acumularse y pasar a la cadena alimentaria y causar daños en el sistema nervioso, digestivo e inmunitario.

Para ello se realizó el análisis de mercurio total inicial por medio de absorción atómica por generador de hidruros, se establecieron 3 diferentes concentraciones de la mezcla ([L]lodo + [C]concreto). Cada una de las muestras se replicaron 3 veces teniendo como resultado 27 bloques de lodo/concreto los cuales se dejaron secar a temperatura ambiente y se analizaron los parámetros de pH, Conductividad, y Redox, se obtuvo como resultados pH alcalinos los cuales oscilaron entre 11-12, los resultados de conductividad fueron ascendentes y el potencial redox fue negativo en todas las muestras lo cual indica un sistema reductor, en donde no hay formación de metilmercurio ya que este se da en mayor porcentaje en sistemas oxidantes acuosos. Finalmente se analizaron las muestras de agua en el laboratorio del Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA, lo cual arrojó una posible encapsulación ya que los resultados finales estuvieron por debajo del límite de detección del equipo, arrojando como mezcla óptima la de 30/70 (30% Lodo+70% Cemento) con ello se demostró que el cemento es un buen encapsulador de mercurio ya que presentó un 99,792% de encapsulación.

ABSTRACT

A research study was carried out on the encapsulation of mercury through the use of cement, in residual sludge from the Curiaco gold mine located in the municipality of Santa Rosa-Cauca, due to the fact that heavy metals are used in the extraction processes of this mineral, such as Mercury (Hg), which is toxic to human health and the environment, in some cases it includes emissions from heating amalgams, as well as direct losses of mercury to land and water. This can accumulate and move up the food chain and cause damage to the nervous, digestive and immune systems.

For this, the initial total mercury analysis was carried out by means of atomic absorption by a hydride generator, establishing 3 different concentrations of the mixture ([L]mud + [C]concrete). Each of the samples was replicated 3 times, resulting in 27 blocks of mud/concrete which were allowed to dry at room temperature and the pH, Conductivity, and Redox parameters were analyzed. Alkaline pH results were obtained, which ranged between 11 -12, the conductivity results were ascending and the redox potential was negative in all the samples, which indicates a reducing system, where there is no formation of methylmercury since it occurs in a higher percentage in aqueous oxidizing systems. Finally, the water samples were analyzed in the laboratory of the Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA, which showed a possible encapsulation since the final results were below the detection limit of the equipment, yielding the optimal mixture of 30/70 (30 % Mud+70% Cement) with this it was demonstrated that cement is a good mercury encapsulator since it presented 99.792% encapsulation.

INTRODUCCIÓN

En Colombia la minería representa un papel fundamental en el desarrollo del país ya que posee una amplia gama de productos mineros que incluyen carbón, oro, platino, níquel, esmeraldas y piedra caliza. Siendo el oro uno de los más explotados, para ello se usa la amalgamación con Mercurio (Hg) como método de extracción, el cual se utiliza indiscriminadamente en la minería artesanal, éste puede depositarse en suelos por efecto del lavado, del agua de lluvia o el rocío e impactar negativamente el entorno y causar estragos en las comunidades aledañas. [1]

En este contexto, cobran especial relevancia interrogantes acerca de la situación de la minería y su impacto económico, social y ambiental en el país, si bien esta forma de desarrollo ha traído ventajas económicas a Colombia también ha traído consigo una serie de conflictos complejos de carácter socio ecológico con impactos profundos en la población y en los lugares donde se desarrollan estos proyectos, lo cual empiezan a ser motivo de preocupación. Ya que uno de sus principales problemas es el inadecuado manejo de lodos residuales los cuales contienen un alto nivel de contaminantes como el Hg. [2]

Por ello, esta investigación se especializó en brindar una posible solución a los impactos ocasionados por este proceso de explotación con Hg. Ya que pretende encapsular con cemento este metal contenido en los lodos de minería. Se escogió la mina Curiaco ubicada en el municipio de Santa Rosa en el Departamento del Cauca, donde se estudió la zona y su problemática ambiental con la inadecuada disposición de lodos mineros los cuales se encuentran almacenados en 3 piscinas a cielo abierto, se pretende inmovilizar este metal y evitar que ocurra una migración en donde el mercurio se evapore o se filtre causando estragos en suelos y fuentes hídricas. [3]

1. CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

La minería de oro ha traído consigo daños irreversibles al medio ambiente, afectaciones a la salud de la población y la perturbación del equilibrio social [4]. Como es el caso de la minería artesanal de oro Curiaco ubicada en el municipio de Santa Rosa Cauca en un área de 169 Ha, la cual se dedica a la explotación del mineral a pequeña escala utilizando elementos altamente tóxicos como el Hg para la extracción de oro. Los procesos que se desarrollan en las etapas productivas para la obtención del metal conllevan a la generación y disposición inadecuada de residuos peligrosos como son los lodos mineros con una producción de 340 ton aproximadamente.

Teniendo en cuenta que la mina Curiaco se encuentra situada en el municipio de Santa Rosa muy cerca del páramo Doña Juana Chimayoy el cual se extiende por los departamentos del Cauca, Nariño y Putumayo, aumenta el riesgo de afectar poblaciones aledañas ya que al extraer el mineral no solo atentan con el ecosistema del páramo sino consecuentemente contra la población que depende hídricamente de esta zona, además por la volatilización de metales pesados y su sedimentación que altera la forma y el curso de las corrientes hídricas, reduce la cantidad de luz que penetra la superficie del agua, impacta en el equilibrio acuático, disminuye la profundidad del cauce y aumenta el riesgo de inundaciones en épocas de lluvia, viéndose altamente afectados diferentes ecosistemas y poblaciones aledañas. [3]

En la actualidad se encuentra en estudio una posible alternativa de encapsular el Hg contenido en lodos mineros por medio de diferentes tecnologías de solidificación con el fin de inmovilizar físicamente los desechos para evitar su migración en contacto con agua o con diferentes elevaciones de temperaturas, sin embargo, existe información limitada sobre su eficacia. Este estudio se realizó en Estados Unidos para evaluar si es posible plantear alternativas de tratamiento y disposición a los modelos actuales de tratamiento de restricción de disposición en el suelo para el mercurio. [5]

De acuerdo a lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es la factibilidad en la elaboración de bloques de concreto para encapsular el mercurio contenido en lodos residuales?

1.2. Justificación

Colombia es uno de los países más ricos en recursos naturales, ocupa el segundo lugar en biodiversidad y está entre las 12 naciones más mega diversas del planeta ya que cuenta con diferentes minerales como el petróleo, carbón, níquel, gas natural y oro. Por lo que las actividades mineras entran a desempeñar un rol importante en el desarrollo del país, siendo en muchas regiones la base de la economía tal como se sustenta en el informe de desarrollo del sector minero colombiano 2018-2022 de la ACM (Asociación Colombiana de Minería), donde se estima una contribución anual al fisco de \$4 billones de pesos aproximadamente entre impuestos y regalías. [6]

Aunque la minería trae consigo beneficios económicos y ha sido implantada con discursos de progreso, desarrollo, modernidad y riqueza, no se debe dejar a un lado las consecuencias ambientales que trae consigo las actividades mineras las cuales inciden negativamente en los recursos hídricos, geológicos, biológicos y atmosféricos como es el caso de las minas auríferas de oro específicamente en la mina Curiaco Santa Rosa-Cauca en donde se utiliza indiscriminadamente el Hg en el proceso de amalgamación quedando almacenado lodos residuales sin ningún tipo de tratamiento expuestas a diferentes temperaturas con posibilidades de volatilización, filtración en el suelo o contaminación de fuentes hídricas por escorrentía, siendo así altamente nocivo para la salud humana y el medio ambiente. [7]

En base a lo anterior es necesario buscar alternativas que mitiguen y controlen estos impactos generados a través de las actividades mineras por ello se plantea la encapsulación de mercurio contenido en lodos residuales mineros en donde el contaminante se inmoviliza y se limita su capacidad de solubilidad y el contacto con algún agente lixivante, esto también implica una fácil manipulación y transporte del residuo, siendo térmicamente estable, químicamente inerte e incombustible.

Esta investigación se desarrolla para determinar si se logra reducir la movilidad del contaminante hasta un punto tal en que no afecte el medio ambiente y así poder realizar un buen manejo de estos residuos. Así como también es necesario generar un protocolo de manejo integral de los mismos con el fin de mitigar, controlar y corregir a través de acciones programadas y planificadas. Estos resultados pueden ser replicados en toda la zona minera

del departamento, minimizando así los impactos ambientales que este tipo de actividad económica viene generando específicamente sobre el recurso hídrico y edáfico.

1.3. OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la factibilidad de bloques de concreto para encapsular el mercurio contenido en lodos residuales de la mina artesanal aurífera Curiaco del municipio de Santa Rosa-Cauca

Objetivos Específicos

- Examinar las características físicas y concentración de mercurio en lodos generados en la mina aurífera Curiaco.
- Establecer la mezcla óptima concreto-lodo, para el encapsulamiento del mercurio a través de diferentes concentraciones de la mezcla de concreto y lodo.
- Diseñar un protocolo para el tratamiento y disposición final de residuos peligrosos (lodos mineros) generados en la mina aurífera de CURIACO del municipio de Santa Rosa.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Historia minera del Cauca

El Cauca es un departamento que se ha destacado principalmente por su producción minera desde su antigüedad, su historia se remonta al siglo XIX gracias a sus múltiples culturas y etnias presentes en donde se producía en aquel momento más de la mitad del oro del país.[8]

Históricamente las comunidades indígenas, afrodescendientes y campesinos han desarrollado trabajos de explotación minera desde la costa pacífica hasta bota caucana a cielo abierto o de socavón. A nivel del Cauca los municipios con mayor historia minera son Timbiquí, Buenos Aires, López de Micay, Suarez y Guapi. [8]

Por muchos años el departamento del Cauca se impulsó (A mediados del siglo XX) como uno de las mayores zonas de riquezas mineras, según estudios estadísticos por cada trabajador “se alcanzaba diariamente un sexto de onza de oro por día, o a su vez 2 pesos o 50 centavos; situación que generaba un alza en la rentabilidad económica de la minería de oro”. [8]

Durante el año 2014 el Cauca tenía una producción de oro de filón del 47%, por encima de los departamentos de Antioquia, Putumayo y Nariño. En la producción de oro de aluvión el Cauca tenía un porcentaje del 53%, superior al del Valle del Cauca, Huila, Tolima, Bolívar y Caldas. [8]

Debido a la extracción del oro en la cual se utilizan grandes cantidades de Hg en el proceso de amalgamación se han ido incrementando los niveles de este metal en el ambiente, desde la era industrial hasta la actualidad, convirtiéndose en un tema de interés mundial debido a los efectos negativos en la salud, actualmente, se estima que las liberaciones del mundo de Hg son de 6000 toneladas por año las cuales provienen de la combustión del carbón, la refinación y combustión de petróleo, gas natural, fosfatos, como también la industria de cloro álcali y la extracción de oro, entre otras. [9]

Una alternativa que nace frente a esta problemática es la encapsulación de Hg, en donde se han tenido casos exitosos con probabilidades altas de desactivación de este metal y otros altamente peligrosos, uno de los primeros estudios realizado en Colombia se llevó a cabo en el año 2003 por la universidad los Andes de la facultad de ingeniería, donde se analizó la factibilidad de estabilización de residuos sólidos tóxicos (plomo y cromo) como parte de materia prima en el proceso de clinkerización para la producción del cemento en donde se comprobó el encapsulamiento de los metales en la estructura del cemento. [10]

Siguiendo los estudios de encapsulación para el año 2009 en Ecuador se realizó un estudio de investigación para estabilizar y solidificar residuos que contienen metales, los cuales causan un gran impacto ambiental como los son las pilas (mercurio, litio, níquel, magnesio, cadmio, plomo y zinc) a través de su encapsulamiento en concreto. Para esto se usaron materiales de construcción, como el cemento, arena, ripio, agua y aditivo impermeabilizante-plastificante, en donde se construyó una masa solida de hormigón en cilindros que inmovilizaron o encapsularon a 20, 15 y 8 pilas, evitando de esta manera la lixiviación de sus componentes metálicos hacia el ambiente. Se encontró que en el lixiviado de los tres cilindros hubo una reducción del 100% para el litio, níquel, cadmio y plomo. El manganeso obtuvo una reducción del 97% zinc presentó una reducción del 99% en el lixiviado de las tres muestras cilíndricas. [11]

Los estudios sobre encapsulamiento continuaron para el año 2009, Perú realiza una investigación titulada “Utilización del relave minero para la elaboración de bloques de concreto tipo ensamblable”, por la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica, de la Universidad Nacional de Huancavelica, con el fin de determinar las repercusiones del uso del relave minero (RM) en bloques de concreto tipo ensamblable (BCE), como reemplazo al agregado fino en diferentes porcentajes; 25%, 50%, 75% y 100%. En donde se realizaron pruebas de resistencia dando una mayor resistencia la mezcla con el porcentaje de 50%. [12]

Otro estudio realizado en el país de Perú en la universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, durante el año 2014 se evalúa la posibilidad de lograr el encapsulamiento de contaminantes metálicos con concentraciones significativas de sales metálicas mediante el uso de la técnica de cementación. Se eligieron dos compuestos: trióxido de cromo, y acetato de plomo, estos reactivos fueron incorporados a la mezcla de arena, grava y cemento. Se hicieron dos ensayos

con probetas cilíndricas a diferentes concentraciones de metales, siendo 5% el porcentaje con respecto a la cantidad de cemento, quien presentó los valores de resistencia y concentraciones dentro del rango permitido, por lo que se concluyó que sí se puede emplear la técnica de cementación con residuos que contengan metales pesados y poder emplear el concreto en construcciones específicas. [13]

Los estudios más recientes acerca del encapsulamiento del Hg a través del cemento se evidencian durante el año 2021 en donde se estudió la inmovilización del mercurio y metales en el suelo mediante el uso de cemento pórtland (OPC) y la realización de ensayos de lixiviación. Para este fin se analizaron dos muestras de dos minas diferentes procedentes del valle del Azogue (Almería) y Bonmatí (Gerona). se obtienen resultados positivos en la encapsulación de Mercurio y también del arsénico y plomo, Los ensayos de lixiviación arrojan una clara eliminación del Hg que pasa de valores de 243-1.500 mg/L en la muestra inalterada a 21,3-47,6 mg/L en la muestra tratada del valle del Azogue. Para el caso de la muestra de Bonmatí se observa una clara eliminación del Hg en el lixiviado de la muestra [14]

Durante el año 2022 se llevó a cabo uno de los más recientes estudios de resistencia mecánica de baldosas usando como materia prima relave minero (mina Ishihuinca). Para esta investigación se tomaron 9 muestras con cuatro dosis de relave, arena gruesa, aditivo superplastificante y cemento, donde se hace un análisis físico químico del relave, ensayos de compresión de muestras, contenido de sulfatos, metales pesados y Ph. Para los ensayos de lixiviación en la determinación del encapsulamiento del relave y análisis de emisión de elementos minerales tóxicos se realizaron ensayos físico químico del contenido de sulfatos por el método turbidimétrico en donde los contenidos se encuentran por debajo del límite máximo permisible que es de 250 mg/L. En la determinación del pH producto del encapsulamiento se obtuvo en rangos de 7,51 a 8,91 siendo pH con rangos tolerables para diversas condiciones. En cuanto a la detección y concentración de metales pesados por la norma EPA 200.7 dio como resultado que no presentan una concentración alta, ya que las nueve muestras se encuentran por debajo de las concentraciones máximas permitidas en el decreto N° 0152015MINAM de acuerdo a los estándares nacionales de calidad ambiental para agua.[15]

2.2. Marco Conceptual

Al abordar una problemática creciente como es la contaminación por mercurio en minas auríferas es necesario tomar el tema con cuidado, enseguida se presentan los fundamentos teóricos sobre los cuales se desarrolló el proyecto

La minería según el Ministerio de Minería y Energía, en Colombia, se conoce como una actividad económica en la que varios tipos de minerales que son fundamentales para la producción de materiales utilizados por la comunidad se extraen selectivamente de la corteza terrestre de la tierra. La minería también une una serie de actividades que conectan los hallazgos, la exploración y el uso de depósitos. En el código de mina actual, que regula las actividades en este país, se puede ver que marca la diferencia de lo que es la minería. En el artículo 159 se dice: “Exploración y explotación de depósitos mineros ilegales, que son los delitos mencionados en el artículo 244 del Código Penal, configurado cuando la exploración, extracción o recolección de propiedades o propiedades minerales se lleva a cabo, sin corrientes de acuerdo con el título minero o sin autorización de los titulares de la propiedad” [16]

Las reglas para la minería del Ministerio de Minas y Energía en 2013, se expresa claramente que la legalidad minera consiste en "desarrollar el trabajo minero con el título actual de la industria minera, bajo la protección de esta o bajo la ley, observando la producción técnica. Los parámetros y el medio ambiente, económico y comercial, laborista y social, industrial, determinado por la legislación vigente en estos aspectos ". [17]

2.2.1. Tipos de minería

Minería tradicional

De acuerdo con el Decreto 0933 del 9 de mayo de 2013, publicado por el Ministerio de Minas y Energía, con el cual se publican las disposiciones en el campo de la formalización minera tradicional, y las definiciones de glosario minero [18] antes de la Ley 685 de 2001 son continuas en un área determinada y la ubicación del depósito para estas comunidades es la principal fuente del apoyo y la generación de ingresos, así como una fuente de atención regional.

Minería formal

Actividad que lleva a cabo sus unidades productivas bajo la protección de un título minero y corresponden a los parámetros técnicos (trabajadores mineros y el medio ambiente), los parámetros económicos, laborales y sociales en la industria, definidos en cada uno de estos aspectos en las disposiciones legales de la fuerza.[18]

Minería no autorizada

la minería desarrollada sin estar inscrita en el registro minero nacional, es considerada como minería ilegal o no autorizada; es decir, sin título minero.[18]

2.2.2. Minería del oro

La minería es una actividad económica practicada por humanos con el final del uso de un mineral, ya sea sal, aceite, sonido, metales y piedras preciosas, que se han convertido en un eje de trabajo importante para las comunidades cercanas. La minería de oro es una de las actividades más bienvenidas en Colombia, ya que existen diferentes métodos de extracción en diferentes áreas y no tienen los permisos requeridos para la formalización de su actividad. De esta manera, la licencia ambiental para el desarrollo de la minería se encuentra en su fase de exploración, en la que la actividad del Código Minero, Ley 685 de 2001 con máquinas manualmente o con instalaciones adecuadas que dependen del depósito.[19]

2.2.3. Impacto ambiental de la explotación minera de oro

La extracción de oro se lleva a cabo ampliamente, lo que requiere modificación del paisaje, algunos cambios o completamente el entorno en el que se llevan a cabo actividades. Este cambio generalmente tiene un mal efecto que no es beneficioso para el medio ambiente, conocido como un impacto ambiental. Los impactos ambientales están directamente relacionados con los humanos, porque las actividades humanas que conducen a problemas ambientales que causan daños a los ecosistemas y las condiciones de salud pública, que pueden ser reversibles o no se pueden revertir [20]

Historia de la minería de oro en Colombia. Las actividades mineras en Colombia son muy importantes para permitir el desarrollo económico y social del país, pero es necesario ver la historia de la minería de oro porque este es un mineral que se explota principalmente, en el territorio nacional.[21]

La explotación minera de oro es una actividad que se origina durante varios siglos, por lo tanto, desde el largo tiempo de la conquista española de los pueblos indígenas, que han explotado y manipulado el oro del territorio colombiano. Después de ser invadidos por los españoles, los nativos fueron esclavizados por el objetivo de continuar usando el material, pero para los conquistadores. En el siglo XVIII, dirigido por un auge minero, los esclavos africanos cambiaron el trabajo de los pueblos indígenas, lo que permitió a Colombia hacerse participe del 40% de la utilidad del metal en el mundo. [21]

La industria minera en Colombia a pesar de ser la más antigua, ha pasado por diferentes desplomes en su nivel de producción. Uno de ellos en 1729 cuando el rey en ese momento no permitió que los indígenas fueran forzados para el trabajo minero, la posición que resultó en quedarse directamente de las minas Mariquita y Pamplona. Después de esto, comienza la Guerra de Independencia, que es una intensa era de lucha, por lo que el tiempo para trabajar es muy poco, lo que resulta en productos mineros se reducirá en un 40%; Esta actuación intenta experimentar un pequeño aumento, pero una vez más desfavorecen entre 1851 y 1860, cuando la Guerra Civil comenzó prácticamente porque todas las otras guerras tenían sus antecedentes políticos.[22]

En los últimos años, la producción de oro ha sido producida por un total de 68,000 personas, que hicieron a mano y trabajan sin licencia o permiso. Se estima que se produjeron alrededor de 66.0 toneladas de oro en 2013, una cantidad que excedió las expectativas del gobierno.[8]

Según un informe especial presentado por CINEP, la gran cantidad de metal producida por el país cada año es extraída principalmente por empresas extranjeras. Este es un nivel de producción bastante bueno, pero todos estos recursos no son parte del PIB nacional porque priman los intereses de los terceros [23]

Como resultado, los residentes de Santa Isabel (Tolima), los agricultores de Nariño, Segovia y Remedios (Antioquia) trabajadores mineros independientes, y también los esfuerzos del Consejo Regional de Cauca Indígena (Cric). y patrimonio territorial, para permitir no solo las demandas del desarrollo económico de la nación, sino también del cuidado y preservación de la Madre Tierra.[24]

2.2.4. Mercurio

El mercurio es un metal que se encuentra en las tres condiciones de líquido, sólido o gaseoso, pero generalmente es una forma líquida a temperatura ambiente. Es color plata, es pesado a temperatura ambiente, ligeramente volátil, y el átomo es de 200.59 g/mol. En estado sólido, es blanco, extendido y adaptable. Su símbolo (Hg) fue tomado de su nombre de Hydragyrum, una palabra latina que traduce una plata líquida. El número de CAS o el número único de mercurio es 7439-97-6. [25]

Tanto el mercurio como sus sales son resistentes a la biodegradación, acumulando graves problemas de contaminación ambiental. Por lo tanto, los países desarrollados tienen regulaciones especiales sobre gestión, producción y eliminación. Los compuestos de mercurio suelen ser coloridos. Pueden ser insolubles en agua y son muy tóxicos debido a la ingestión o la inhalación en polvo. [25]

Según los Green Facts, el mercurio a temperatura ambiente no se encapsula y se evapora parcialmente, y se forma el vapor de mercurio. La producción de vapor de mercurio está directamente relacionada con la temperatura porque cuanto mayor es la temperatura, mayor será el vapor emanarán del mercurio metálico líquido. [25]

Parte de los compuestos inorgánicos de mercurio son el sulfuro de mercurio (Hg), el óxido de mercurio (HgO) y el cloruro de mercurio (HgCl). Estos compuestos también se conocen como sal de mercurio

Manejo del mercurio: de acuerdo con la Ley 1658, el 15 de julio de 2013, “Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las

diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones” [26]

Hay artículos recomendados para aquellos que usan o expusieron mercurio. Esto debe usar elementos protectores personales para evitar el contacto de la piel mediante el uso de dispositivos de protección apropiados. [26]

El entorno donde se utiliza mercurio necesita garantizar un sistema de ventilación apropiado. En un área de trabajo donde se procesa una gran cantidad de mercurio, es necesario usar desechables y máscaras para evitar la contaminación y la absorción de la piel. Además, el piso donde se ejecuta la actividad es un material no poroso y debe lavarse regularmente con una solución de calcio de sulfuro diluido. [27]

Influencia en la salud humana

Los derivados alquilados de mercurio, detectados principalmente en las células sanguíneas, afectan el sistema nervioso central y se acumulan en el cerebro y tienen una vida media, que varía de 50 a 60 días; sin embargo, vale la pena señalar que esta durabilidad durante el período de vida está directamente relacionada con la dosis, el régimen y la velocidad de ingresar al cuerpo [28]

El agua de las sales solubles, que generalmente contienen cloruro de mercurio, mercurio, sulfuro de mercurio, entre otras cosas, tienen un efecto de corrosión severo en la piel y las membranas mucosas, causando náuseas graves, vómitos, dolor abdominal, diarrea de sangre, daño al riñón y muerte, ocurren entre los siguientes 10 días [28]

La entrada principal al cuerpo es la inhalación, ya que se evapora a temperatura ambiente, los síntomas también dependen del tipo de exposición. Si esto es crónico, causa inflamación de la cavidad oral, salivación excesiva, pérdida de dientes, daño renal, temblor muscular, cambios de personalidad, depresión, irritabilidad y calambres intestinales. El efecto agudo puede causar efectos como neumonitis química, edema agudo del pulmón, bronquialita necrotal, insuficiencia respiratoria y muerte; además de los efectos renales, como el síndrome cardiovascular nefrótico, como la hipertensión, el tracto gastrointestinal, como las náuseas o la diarrea, dermatológica [29]

2.3. Bases Legales

Decreto 2811 De 1974

Código de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En su capítulo II define la regulación en cuanto a la prevención y control de contaminación del recurso hídrico, desarrolla ampliamente lo referente a los vertimientos de agua residual, estudios de impacto ambiental y procesos sancionatorios en sus artículos. Art: 135, 147.

Ley 685 Del 15 De Agosto De 2001

Expedida por el congreso de la república de Colombia, por la cual se expide el código de minas y se dictan otras disposiciones. El presente Código tiene como objetivos de interés público fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país.

Decreto Número 4741 De 30 Dic 2005

Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. ART. 1, 2, 10,11

Resolución 3930 De 2010

Por la cual se reglamenta parcialmente el título I de la ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del título VI- parte III- libro II del decreto – ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones esta resolución tiene por objeto las disposiciones relacionadas con los recursos hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.

Decreto 3930 Del 25 De Octubre De 2010

Caracterización de los vertimientos de acuerdo con la frecuencia que se determine en el protocolo para el Monitoreo de los vertimientos en aguas superficiales en los cuales se regular todo el tema de los métodos de análisis y de la toma de muestra.

Decreto 0933 De Mayo De 2013

Por el cual se dictan disposiciones en materia de formalización de minería tradicional y se modifican unas definiciones del Glosario Minero.

Ley 1658 Del 15 De Julio De 2013

Por medio de la cual se establecen las disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras dispersiones. ART.1, 3, 6, 7.

Decreto 1287 De 2014

“Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales”, Artículo 5; En donde se reglamenta los Valores máximos permisibles de categorización de biosólidos para su uso.

Resolución 0631 Del 17 De Mayo De 2015

El cual establece en su artículo 100 los parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas–ARND a cuerpos de aguas superficiales de actividades de la minería.

3. CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados en la elaboración de bloques de concreto para la encapsulación de mercurio contenido en lodos residuales mineros, de la Mina Aurífera Curiaco en el municipio de Santa Rosa del Departamento del Cauca, se estableció la siguiente metodología a través de tres fases:

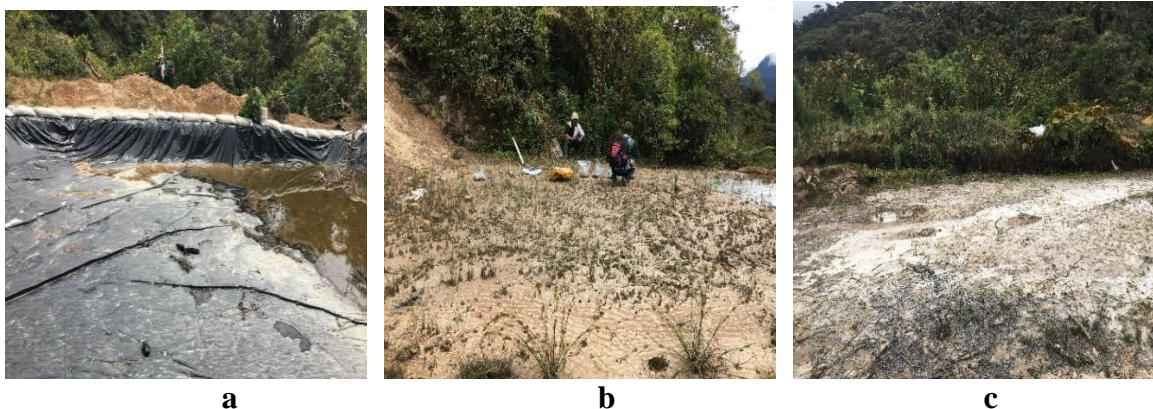
FASE I: Características químicas

Recolección de la materia prima

Los lodos mineros se recolectaron de manera previa por el personal del laboratorio del SENA que hace parte del proyecto (Ilustración 1). La investigación se realizó a partir del análisis de tres muestras de lodo tomadas de los sedimentos o colas almacenadas en las escombreras de la mina Curiaco dedicados a la extracción de oro de forma artesanal (piscinas de almacenamiento de lodo 1, 2 y 3, las cuales tienen una acumulación de 340 ton aproximadamente hasta el momento), donde se usó la técnica de muestreo zigzag [15], con una profundidad de 1 metro y 1 kg aproximado de cada piscinas, dichas muestras se recolectaron en bolsas herméticas ziploc, esto para evitar contaminación externa, las cuales fueron trasladadas al Laboratorio de Análisis de Calidad Ambiental del SENA en donde se almacenaron a una temperatura menor de 10 °C.

A continuación, se observan las piscinas de donde fueron tomados los lodos; **Ilustración a:** Piscina 1, **ilustración b:** Piscina 2 **ilustración c:** Piscina 3

Ilustración 1. Lugar de muestreo Santa Rosa Cauca



Fuente: [30]

Cuarteo y pesaje de muestras

Inicialmente se realizó un cuarteo de las 3 muestras como se observa en la ilustración 2 de lodo extraídas de la mina aurífera Curiaco las cuales fueron colocadas en cajas de petri a una temperatura de 25°C en el equipo del laboratorio del SENA, a estas muestras se les realizó un registro de pesaje diario durante 8 días en la balanza analítica que se observa en la y se evaluó la pérdida de peso por día.

Ilustración 2. Práctica en laboratorio cuarteo y pesaje de muestras de lodo



Digestión de Muestras

Posterior a ello se realizó un análisis de absorción atómica por generador de hidruros con el fin de determinar el total de Mercurio inicial, para ello se realizó una digestión de cada una de las piscinas a 0.5 g de lodo, en el Laboratorio Ambiental de la Universidad Autónoma del Cauca (ilustración 3), para ello se realizó una preparación previa basada en el Método 7471 B del Standard Methods en el cual se recomienda un tiempo de secado de los lodos mineros a temperatura ambiente durante 8 días y posterior a ello se preparó una mezcla de Agua Regia (150 mL HCl y 50 mL HNO₃), y otra de permanganato de potasio (KMnO₄) al 5%, (25 g de KMnO₄ diluida en 500 mL de agua destilada) [31], c

A continuación, se describe el procedimiento para la digestión de muestras (0.5 g de lodo) basado en el método estandarizado en el Método 7471 B del Standard Methods [31]

1. Se depositaron las muestras en un Erlenmeyer
2. Se agregaron 5 mL de agua regia previamente preparada y 5 mL de agua destilada
3. cada una de las muestras se colocaron en baño María por 2 minutos a 92°C, se dejaron enfriar.
4. Se adicionaron 50 mL de agua destilada y 15 mL de KMnO₄ al 5% y posteriormente se dejaron reposar durante 15 minutos hasta que la muestra se tornó de color purpura. auca
5. Se colocaron en baño María durante 30 minutos a 92°C
6. Luego de enfriarse se le agregaron 6 mL de NaCl-NH₂OH.HCl para reducir el exceso de permanganato.
7. Las muestras se filtraron y se aforó a 100 mL. [31]

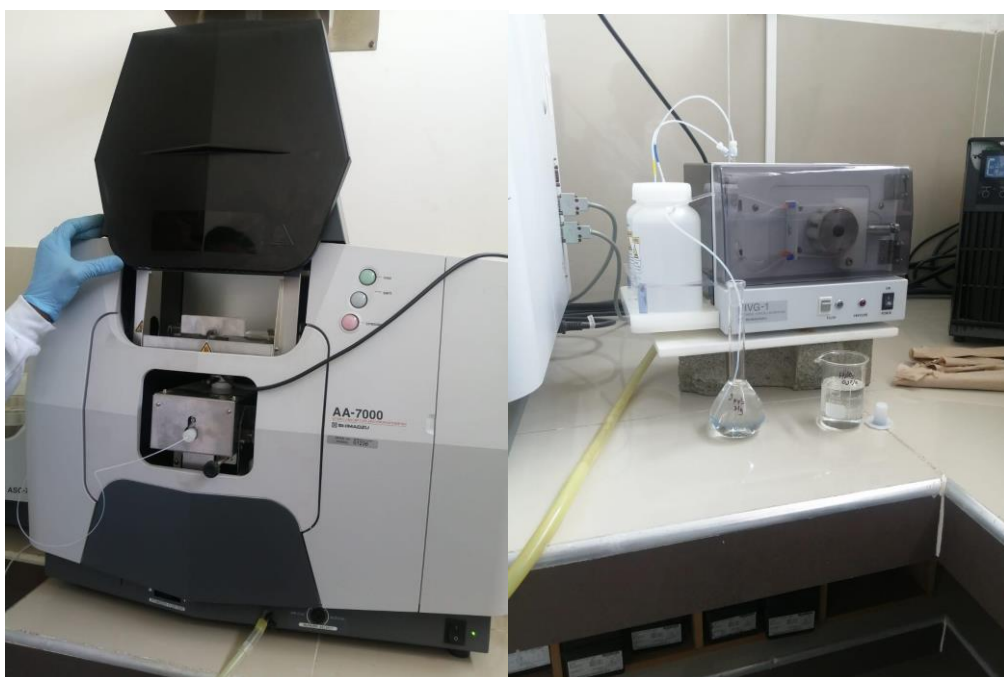
Ilustración 3. Práctica en laboratorio de Análisis de Calidad Ambiental



Determinación concentración inicial de Hg

Las muestras digeridas fueron llevadas al Laboratorio de Análisis Ambientales del SENA del Centro de Teleinformática y Producción Industrial SENA Regional Cauca las cuales se analizaron bajo la técnica de Generación de Hidruros acoplada a la Espectrometría de Absorción Atómica (EAA) (Ilustración 4), el cual es un método de análisis directo de determinados analitos, basados en la volatilización del elemento, en este caso el Hg. Esta técnica implicó la separación del Hg por volatilización a temperatura ambiente, donde se transportó mediante una corriente de gas inerte, hasta el equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica a través del equipo [32] de AA-7000 (Atomic Absorption Spectrophotometer marca Shimadzu) y generador de hidruros HVG-1 (Ilustración 4) el cual realizó la determinación cuantitativa del elemento estudiado (Hg). Con el fin de analizar la concentración inicial mg/L de Hg en cada muestra de lodo y así tener el conocimiento acerca de qué porcentaje de este metal tenían las muestras de lodos inicialmente y poder sacar el porcentaje de eficiencia de encapsulamiento con la concentración final de estas muestras. [33]

Ilustración 4. Equipos de Laboratorio del SENA- Ilustración a: (Atomic Absorption AA 7000 Spectrophotometer marca Shimadzu) e ilustración b: generador de hidruros HVG-1



a

b

Se realizó la caracterización química de los lodos provenientes de la actividad minera aurífera para determinar la concentración de mercurio inicial contenido en ellos y ver la efectividad al momento de la encapsulación para su posible uso en el sector de la construcción en la fabricación de bloques de concreto. Estos resultados fueron analizados en base a la resolución 0631 del 2015, el cual establece los parámetros y valores máximos permisibles de metales vertidos a cuerpos de agua, y en el decreto 1287 de 2014 en donde se disponen criterios para el uso de biosólidos de plantas de tratamientos de agua residual, con el fin de tener referentes normativos.

Dichas concentraciones son fundamentales para determinar la presencia de mercurio inicial en las muestras de lodos, ya que permite establecer cuánto Hg se logra encapsular a través del análisis con el porcentaje de pérdida en comparación con la concentración final.

Una vez se obtuvieron los resultados de concentración inicial se fueron analizados a través de la siguiente fórmula con el fin de tener el total de gramos de Hg en los gramos de la muestra de lodo.

$$\frac{\text{Concentración Inicial} * \text{Aforo de la muestra}}{\text{g lodo}} = \text{mgHg/g lodo}$$

$$\text{encapsulación} \frac{\text{Concentración Inicial} * 0,1L}{0,5g} = \text{mgHg/g lodo}$$

Una vez establecidas las mezclas se halló los miligramos contenidos inicialmente en cada bloque de cemento teniendo en cuenta el peso del lodo en cada mezcla

$$\frac{\frac{\text{mgHg}}{\text{g}}_{\text{lodo}} * \text{g lodo de la mezcla}}{\text{g peso bloque (lodo+cemento)}} = \text{mgHg/g Bloque}$$

FASE II Mezcla óptima para el proceso de encapsulación del mercurio

Posteriormente se establecieron 3 diferentes concentraciones de la mezcla ([L]lodo + [C]concreto) en base a la Norma Técnica Colombiana 4017 la cual establece Métodos Para Muestreo y Ensayos de Unidades de Mampostería y Otros Productos de Arcilla [28]. Para la fabricación de los bloques o cubos de cemento se escogieron moldes de 5cm *5cm ya que estas medidas se establecieron como prueba piloto dado a que su tamaño facilita la toma de datos en laboratorio. Con el fin de hallar la mezcla óptima en la que se encapsula el Mercurio se establecieron 3 mezclas

M1: 30% Lodo/ 70% cemento,

M2: 70% Lodo/ 30% Cemento

M3: 50% Lodo/50% Cemento.

Por cada piscina se realizaron 9 bloques de cemento, 3 por cada una de las mezclas para un total de 27 bloques (Tabla 1) con el fin de obtener resultados con mayor porcentaje de confiabilidad se replicó 3 veces cada mezcla ya que así permite proveer un estimado del error experimental, así como también determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas o no, y así evaluar si hubo algún error en alguno de los procedimientos. Con el fin de hallar la mezcla óptima para su elaboración y así lograr la

captura del mercurio remanente, el cual permita darle una disposición final correcta que no genere escorrentía o pérdida del contaminante [27].

Tabla 1. Cantidad de bloques de concreto por cada diseño de mezcla

Diseño de mezcla	Piscina 1	Piscina 2	Piscina 3	TOTAL
Lodo:Cemento (30/70)	3	3	3	9
Lodo:Cemento (70/30)	3	3	3	9
Lodo:Cemento (50/50)	3	3	3	9
TOTAL				27

Masa del material a utilizar

En la tabla 2 se muestran la cantidad de lodos en gramos (g) y la cantidad absoluta del cemento portland requerido por cada diseño de mezcla.

Tabla 2. Mezcla para la elaboración de bloques de 25 cm³ de concreto Mezcla No.1, Mezcla No. 2 y Mezcla No. 3

Diseño de mezcla	Lodo (gr)	Cemento portland (g)	Total (g)
Lodo:Cemento (30/70)	108	252	360
Lodo:Cemento (70/30)	252	108	360
Lodo:Cemento (50/50)	180	180	360

Se escogió para este estudio de investigación bloques de 125 cm³ en moldes de madera tal como se observa en la ilustración 5, estos también fueron diseñados para que los 27 cubos tuvieran un peso total de 360 g cada uno, por lo que en la tabla anterior se relaciona el peso tanto de cemento y lodo que tuvieron cada cubo en cada mezcla antes de ser llevado a los moldes (ilustración 5)

Ilustración 5. Mezcla húmeda de cubos de lodo



Después de elaborados los cubos de concreto se dejaron secar a temperatura ambiente, durante 5 días y se llevaron a una prueba de migración, la cual consiste en sumergir los cubos en 300 mL agua durante 15 días donde se tomaron mediciones diarias de temperatura, conductividad, pH y redox, estos parámetros fueron medidos con la sonda multiparamétrica y pHmetro (Ilustración 6) del laboratorio de la Universidad Autónoma del Cauca con el fin de analizar su variación durante este periodo de tiempo, y analizar los resultados de pH con respecto al redox con el objetivo de determinar si hubo, o no, formación de metilmercurio, con respecto a los demás parámetros se analizaron de manera complementaria con el objetivo de evaluar si la mezcla influye en el incremento de iones, o incrementa la conductividad por la generación de sales, la temperatura se mantuvo constante para evitar volatilizaciones del metal.

Una vez terminado el tiempo de prueba en la que los cubos estuvieron bajo el agua, se les midió la concentración final del metal en el líquido, para analizar si hubo migración, es decir si se detectó presencia de Hg en el agua. Las 27 muestras de la prueba de migración, fueron analizadas en el Laboratorio de Análisis de Calidad Ambiental del SENA (Servicio Nacional de Aprendizaje) Regional Cauca en la ciudad de Popayán mediante los equipos mencionados anteriormente en la FASE I en la determinación de la concentración de Hg, el cual permite medir la concentración final del Hg en las muestras líquidas, mediante este proceso el

principal objetivo es analizar si hay una migración del contaminante, lo cual es uno de los resultados fundamentales para el análisis del porcentaje de encapsulación teniendo también en cuenta las concentraciones iniciales de Hg [19].

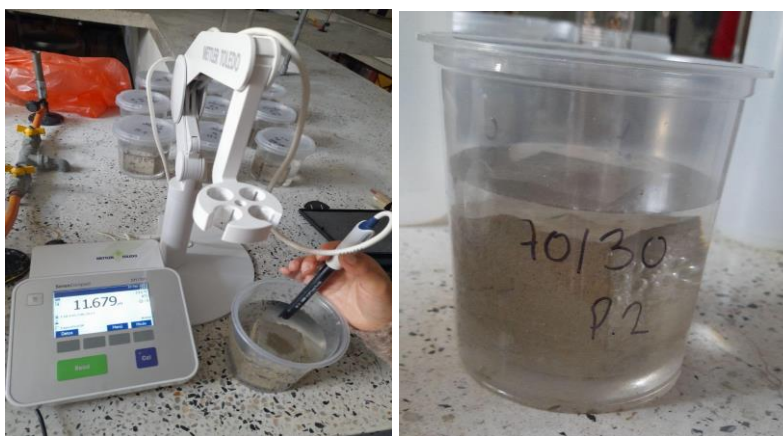
Con el fin de hallar el porcentaje de pérdida de las concentraciones de Hg y así tener un aproximado de encapsulación, se promediaron estos resultados por mezcla y se compararon con la concentración de Hg inicial de la siguiente manera.

Concentración Inicial -Concentración Final = Cantidad de Hg encapsulado

$$\text{Porcentaje de Encapsulación} = 100 - \left(\frac{\text{Concentración Final} * 100\%}{\text{Concentración Inicial}} \right)$$

A través de estos resultados se obtuvo la mezcla óptima por mejor rendimiento en el porcentaje de encapsulamiento.

Ilustración 6. a: pHmetro del Laboratorio Ambiental de la Universidad Autónoma del Cauca y **b:** cubo de muestra con cemento y lodo



a

b

Fase III: Diseño de protocolo para la disposición final de residuos peligrosos

Con los resultados obtenidos en la fase anterior respecto a la determinación de la mezcla óptima para encapsular el mercurio contenido en lodos de la mina Curiaco, se elaboró el diseño de un protocolo para la disposición final de los residuos peligrosos provenientes del procesos de extracción aurífera (lodos mineros); dicho protocolo contiene unos objetivos,

alcance y metodología detallada, en donde se registró un paso a paso a seguir para la encapsulación adecuada del metal (Hg) con la mezcla óptima (% de lodo + % concreto), condiciones de almacenamiento y equipos de p (Ilustración 5) protección personal. Lo anterior, con el fin de realizar una disposición acertada de estos residuos garantizando que se realice de manera ambientalmente razonable y responsable de la mano de una efectividad económica y socioambiental [34].

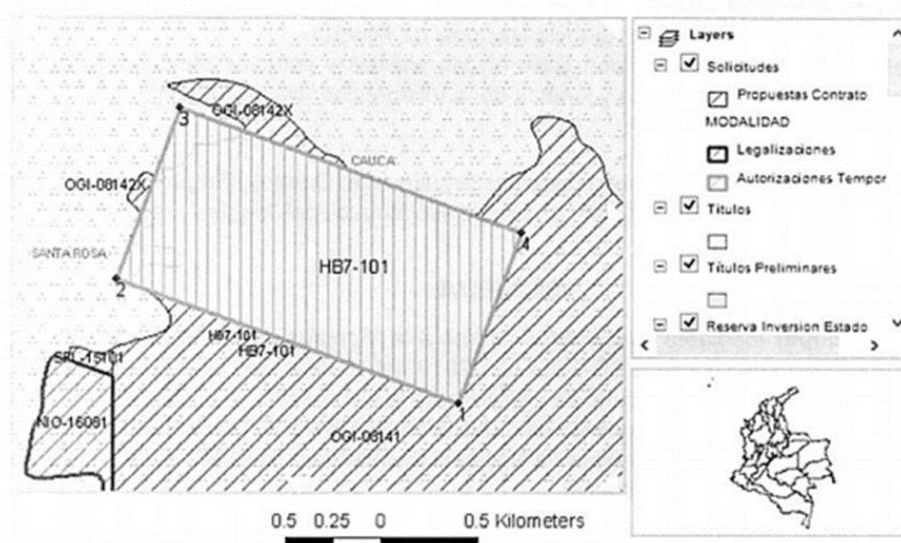
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1. Características físicas y concentración de mercurio en lodos generados en la mina aurífera Curiaco.

4.1.1. Características de la zona de Estudio.

Esta investigación se llevó a cabo en la mina artesanal aurífera Curiaco, dedicada a la explotación de oro de filón en la vereda La Petrolera, municipio de Santa Rosa Cauca, la zona está ubicada entre los 2700 msnm a 2800 msnm, además se encuentra a 181 km de la capital Caucana

Ilustración 7. Mina Aurífera de Curiaco municipio de Santa Rosa. La zona demarcada muestra el área de explotación de la mina



Fuente: [30]

4.1.2. Pesaje de muestras de lodo.

De acuerdo con el método para digestión de lodos establecido en la Fase I: Digestión de muestras, se establecieron 8 días de secado basada en Método 7471 B del Standard Methods [30], previo a la digestión, en donde se realizó el pesaje diario de las muestras por cada piscina como se evidencia en la tabla 3 donde se logra evidenciar la pérdida de agua por humedad que tuvieron los lodos durante los días de secado.

Tabla 3. Pérdida de peso por humedad pasados 8 días

Muestra	Pérdida Día 1-Día 2 (g)	Pérdida Día 6-Día 3 (g)	Pérdida Día 7-Día 6 (g)	Pérdida total durante 8 días (g)	Porcentaje de pérdida %
Piscina 1	5,124	0,629	0,416	0,636	12,41
Piscina 2	4,866	0,522	0,330	0,319	6,55
Piscina 3	3,859	-0,002	0,001	0,004	0,10

En la tabla 3 se evidencia la pérdida de humedad entre cada pesaje del día 1 hasta el día 8 observándose un comportamiento de pérdida en la **Piscina 1** del 12,41%, de la **Piscina 2** de 6,55%, y **Piscina 3** de 0,10%. Las muestras durante los primeros 6 días de pesaje tuvieron una diferencia de pérdidas de peso considerable con respecto a los demás días en los cuales estos pesajes tuvieron pérdidas mínimas, se observa que la piscina 3 tuvo un menor porcentaje de pérdida de peso, debido a la humedad inicial que tenían los lodos, se pudo observar que el primer día las cajas de petri tenían burbujas de agua en la tapa superior, las cuales desaparecieron al finalizar los 8 días de pesaje, el lodo se encontraba casi seco. La pérdida de humedad se debe a la temperatura con la que se mantuvieron los sedimentos mineros, con el fin de normalizar las muestras, para tomar los datos en peso seco.

4.1.3. Determinación de mercurio inicial en los lodos.

Después de realizar el protocolo de digestión de las muestras como se especifica en la metodología Fase I se determina la concentración de mercurio inicial en 0.5g de cada una de las muestras de lodo, los resultados obtenidos en el laboratorio de análisis de Calidad Ambiental del SENA por espectrofotometría por absorción atómica se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. Mercurio inicial en 0.5 g de cada piscina.

Variable	Muestra	Concentración mgHg/L	Concentración mgHg/g lodo
Mercurio	Piscina 1	$2,52 \times 10^{-2}$	$5,046 \times 10^{-3}$
	Piscina 2	$3,17 \times 10^{-2}$	$6,352 \times 10^{-3}$
	Piscina 3	$7,1 \times 10^{-3}$	$1,422 \times 10^{-3}$
Promedio total concentración inicial de Hg		$4,263 \times 10^{-2}$	$4,727 \times 10^{-3}$

La piscina de menor concentración es la Piscina 3 y la piscina con mayor contenido de mercurio es la piscina 2, se obtuvo un promedio de concentración de $4,263 \times 10^{-2}$ mgHg/L, en caso de que estos lodos llegaran a lixiviarse o por escorrentía a fuentes hídricas los resultados estarían por encima de lo estipulado en la resolución 0631 del 2015 por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. En donde se establece un límite de 2×10^{-3} mg/L de Hg, estando $2,63 \times 10^{-2}$ mg/L por encima de la norma, estos no se pueden disponer sin tener un tratamiento previo ya que son tóxicos para la salud humana y para el medio ambiente. [29].

La concentración promedio de Hg en 0.5g de lodo fue de $4,727 \times 10^{-3}$ mgHg/g estos resultados en comparación al Limite permisible para la utilización de biosólidos el cual se encuentra establecido en el Decreto 1287 del 2014 en la categoría B, donde el límite máximo permisible de concentración de mercurio es de 2×10^{-2} mgHg/L para insumo en la fabricación de materiales de construcción, no incumple los limites permisibles según la norma para el uso requerido, sin embargo se realiza este estudio como alternativa de tratamiento de lodos contaminados por medio de la encapsulación de Mercurio.

A continuación, en la tabla 5 se establecen las concentraciones de mercurio por bloque.

Tabla 5. Concentración de mg de Hg en el Bloque

Piscinas	30/70	70/30	50/50
	mgHg/g Bloque	mgHg/g Bloque	mgHg/g Bloque
Piscina 1	$1,5138 \cdot 10^{-3}$	$3,5322 \cdot 10^{-3}$	$2,523 \cdot 10^{-3}$
Piscina 2	$1,9056 \cdot 10^{-3}$	$4,4464 \cdot 10^{-3}$	$3,176 \cdot 10^{-3}$
Piscina 3	$4,2660 \cdot 10^{-4}$	$9,9540 \cdot 10^{-4}$	$7,110 \cdot 10^{-4}$

En la tabla 5 se observan las concentraciones iniciales en los bloques de cemento a través del peso del lodo según la mezcla sobre el total de los gramos del bloque, los pesos se encuentran referenciados en la tabla 2. La concentración más alta fue de la piscina 2 en la mezcla 70/30 con $4,4464 \cdot 10^{-3}$ mgHg/g Bloque y la más baja se presentó en la piscina 3 en la mezcla 30/70 con una concentración de $4,2660 \cdot 10^{-4}$ mgHg/g Bloque.

4.2. Mezcla óptima para el proceso de encapsulación del mercurio a través de diferentes concentraciones de la mezcla de concreto y lodo.

4.2.1. Preparación de la mezcla de lodos/cemento portland

Para la elaboración de los bloques de concreto se determinó la cantidad de material a reutilizar (tabla 2) con el fin de buscar un equilibrio en las proporciones obteniendo tres diferentes porcentajes de mezcla como se mencionó en la fase 2 M1, M2 y M3

4.3. Comportamiento de los parámetros, pH, conductividad, temperatura y redox

Después del proceso de secado de los bloques se sumergieron en 300 mL de agua destilada, durante esta prueba de lixiviación se tomaron los siguientes parámetros pH, conductividad, temperatura y potencial redox promediados desde el día uno de sumergidos los bloques, para cada una de las mezclas.

4.3.1. pH

Se evidencia una variación mínima entre los datos de las tres mezclas los cuales estuvieron sobre el rango de pH=12 (Anexo 2), esto se corrobora con los datos en la desviación estándar la cual se encuentra en 0.28, lo cual indica una variabilidad baja en los pH obtenidos en las muestras, el menor resultado fue el de la piscina 1 en la mezcla 50/50 con un valor de 12.510 y el mayor también fue en la Piscina 1 en la mezcla 70/30 con 12.873, se observa que no hubo una mayor variación en los datos y teniendo en cuenta que el lodo inicialmente tuvo un promedio de pH de 8.04 y el cemento según su ficha técnica el pH oscila entre 10-13, [35] al mezclarse en las diferentes proporciones 30/70, 70/30 y 50/50 todas son alcalinas sobrepasando los límites máximos permisibles en vertimientos procedentes de actividades mineras el cual es de 6 a 9 según lo establece la Resolución 0631 del 2015, el margen mínimo de fluctuación entre los pH fue positivo ya que un decrecimiento del pH puede aumentar la solubilidad de los metales disueltos [36]

Tabla 6. Promedio de parámetro pH durante 15 días

Parámetro Ph				
Mezcla	Piscinas de Lodo			
	Piscina1	Piscina 2	Piscina 3	Desv Estándar
30/70	12.868	12.839	12.820	0,287
70/30	12.873	12.850	12.740	0,276
50/50	12.510	12.860	12.830	0,284

En la tabla anterior se puede observar que los pH fueron mayores a 12 lo cual nos arroja una alta alcalinidad, esto se debe. al proceso de fraguado del cemento con lo cual se genera una hidrólisis del cemento generando compuestos alcalinos con valores de pH altos (12-13) ya que actúa como una reserva alcalina, mantiene a los hormigones armados protegidos contra la corrosión electroquímica.

4.3.2. Potencial Redox vs pH

El potencial Redox es una medida que se expresa en milivoltios (mV), indica cómo ocurren los fenómenos de transferencia de electrones dentro de una disolución, es decir, el equilibrio

entre los agentes oxidantes y los agentes reductores. Las especies de mercurio que se presentan en un ambiente en específico o en solución, dependen del potencial redox, del pH, de la naturaleza de los aniones y otros grupos presente en los lodos con los cuales el Hg puede formar complejos estables. [37]

Como se observa en la tabla 7 los resultados obtenidos en cada una de las muestras de agua fueron negativos lo cual indicó un proceso de reducción en donde se producen más iones de hidroxilo (de carga negativa), con el cual se perdieron electrones haciendo que el agua se alcalinizará, esto ocurrió con la presencia del cubo (Lodo + Cemento). Se presentó un menor resultado en la piscina 1 con la mezcla 30/70 con un resultado de -337,73 y el mayor fue en la piscina 2 de la mezcla 70/30 dando como resultado -304,29 donde hubo mayor fluctuación fue en la mezcla 70/30, es importante también mencionar que los resultados promedio del blanco fueron 232,70 Mv y su desviación estándar fue de 1,013 durante los días de mediciones de los parámetros, cabe aclarar que este blanco es de agua destilada llevada a un pH 2. Cuando las condiciones son extremadamente reductoras aumenta la solubilidad de Hg en los lodos, lo que hizo posible que se pudiera encapsular con el cemento, según los resultados obtenidos con el potencial redox no hay formación de metilmercurio acuoso ya que este se da en un ambiente de oxidación. [38]

Tabla 7. Potencial Redox

Muestra	Potencial REDOX mV	pH
Piscina 1 30/70	-333,73	12,87
Piscina 1 70/30	-333,48	12,87
Piscina 1 50/50	-315,92	12,51
Desviación Estándar Piscina 1	12,417	
Piscina 2 30/70	-331,83	12,84
Piscina 2 70/30	-304,29	12,85
Piscina 2 50/50	-332,88	12,86
Desviación Estándar Piscina 2	16,212	
Piscina 3 30/70	-330,83	12,82
Piscina 3 70/30	-326,91	12,74
Piscina 3 50/50	-330,94	12,83
Desviación Estándar Piscina 3	2,296	

Se observa una fluctuación mayor en los datos obtenidos en la piscina 2 con una desviación estándar de 16,212 con respecto al potencial redox y un menor porcentaje de variaciones en la piscina 3 con una desviación estándar de 2,296.

4.3.3. Temperatura

Tabla 8. Promedio de Temperatura durante 15 días.

Temperatura (°C)				
Mezcla	Piscinas de Lodos			
	Piscina 1	Piscina 2	Piscina 3	Desviación estándar
30/70	22.115	22.236	22.241	0,55
70/30	22.114	22.214	22.289	0,59
50/50	22.136	22.28	22.318	0,57

La temperatura es un parámetro que no se puede dejar de lado siendo que esta influye indirectamente en los resultados de pH y conductividad y no tomarla en cuenta puede causar errores en las mediciones. Cuando aumenta la temperatura, las vibraciones moleculares aumentan, lo que conduce a la capacidad del agua para ionizar y formar más iones de hidrógeno, por lo que es muy probable que el pH baje con estas condiciones [39]. En el caso de la conductividad, cuando la temperatura de una muestra aumenta, la conductividad tiende a aumentar de igual forma, se debe a que la viscosidad de la muestra tomada disminuye, por lo tanto, conduce a una movilidad de los iones, aunque la concentración de estos se mantenga invariable

Estas muestras no fueron sometidas a cambios de temperatura extremas, por el contrario, se tomaron registros diarios de este parámetro a temperatura ambiente con el fin de simular la temperatura de la zona de estudio donde su clima es frío-húmedo teniendo una variación mínima con una desviación estándar de 0,5 [40].

Durante 15 días se realizó la toma de parámetros, donde se evidencio una variación mínima de temperatura debido a las condiciones en las que se encontraban almacenadas las muestras, estas estuvieron entre un rango de 22.114°C en la piscina 1 en la mezcla 70/30 y 22.318°C en la Piscina 3 en la mezcla 50/50. Los datos se mantuvieron coherentes a la temperatura ambiente de la ciudad de Popayán

Al no presentarse altas temperaturas y estar expuestos durante pocos días, es probable que el mercurio no se haya volatilizado de ninguna manera, a pesar de que el estudio se haya

realizado bajo condiciones que no se podían controlar como la temperatura de Popayán durante esos días de medición. [41]

4.3.4. Conductividad

En los parámetros de conductividad, se tiende a ver una variación más alta en la piscina 1, donde su mezcla 50/50 arroja el mayor resultado de 15,215 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y resultados mínimos de 8.689 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la misma piscina, pero en la mezcla 30/70 también se registraron los datos más altos con promedio de 15.215 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Teniendo así una clara conducta donde en la mezcla 30/70 se presentan los mayores datos por cada piscina y en la mezcla 50/50 los menores datos en todas las piscinas.

Tabla 9. Promedio de parámetro conductividad durante 15 días

Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$				
Mezcla	Piscina 1	Piscina 2	Piscina 3	Desviación estándar
30/70	15.215	14.408	13.023	4,98
70/30	14.182	14.925	10.568	5,17
50/50	8.689	14.062	13.020	5,02

Este parámetro tuvo una disminución progresiva vs el tiempo, debido a que la conductividad aumenta con respecto al tiempo y estas muestras se mantuvieron a temperatura ambiente, es decir que no hubo un aumento representativo de este parámetro. El blanco tubo una conductividad promedio de 2,17 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La relación con la conductividad sugiere similarmente que su carga de iones y otras partículas minerales transportan también considerable carga de mercurio, lo que quiere decir que la conductividad del agua retiene elevada carga iónica. El mercurio no es buen conductor de calor, aunque si buen conductor de electricidad. [42]

4.4. Pruebas de absorción por agua

En el ensayo de sumergir los bloques de concreto en 300 mL de agua se mostraron resultados positivos frente a la concentración de cada cubo realizado, por lo que se estima que se logró

la encapsulación del mercurio. Los resultados para el ensayo de migración de mercurio en el agua se presentan en la tabla 9.

Ilustración 8. Agua lista para tomar mediciones de mercurio final



4.5. Concentración Final de Mercurio.

A continuación, se presentan los resultados finales de la concentración de mercurio tras la prueba de migración, para establecer cuánto del metal se trasladó a las muestras de agua en la que estuvieron los cubos sumergidos

Los resultados de concentración final de Hg en los bloques con respecto a la concentración inicial, arrojados por el espectrofotómetro y el generador de hidruros dieron un porcentaje de encapsulación del Hg por encima del 97% en las tres mezclas, tal como se puede observar en la tabla 10, lo cual indica que el cemento es un excelente medio encapsulador del mercurio.

Tabla10. Resultados concentración final de Mercurio por cada Mezcla y Piscina.

Concentración Final (mg/L) y límites permisibles de Mercurio (Hg)				
Muestra	Concentración Final (mg/L)	Concentración final mgHg/g Bloque	Concentración Inicial mgHg/g Bloque	Porcentaje de encapsulamiento (%)
Piscina 1 30/70	2,246x 10 ⁻⁴	1,871+10 ⁻⁷	1,513*10 ⁻³	99,988
Piscina 1 70/30	3,260x10 ⁻⁴	2,716*10 ⁻⁷	3,532*10 ⁻³	99,992
Piscina 1 50/50	3,260x10 ⁻⁴	2,716*10 ⁻⁷	2,523*10 ⁻³	99,989
Piscina 2 30/70	1,571x10 ⁻⁴	1,309*10 ⁻⁷	1,9056*10 ⁻³	99,993
Piscina 2 70/30	3,260x10 ⁻⁴	2,716*10 ⁻⁷	4,4464*10 ⁻³	99,994 0,006109812
Piscina 2 50/50	5,288x10 ⁻⁴	4,406*10 ⁻⁷	3,1760*10 ⁻³	99,986
Piscina 3 30/70	No registra	No registra	4,266*10 ⁻³	no registra
Piscina 3 50/50	7,754x10 ⁻⁴	6,4616*10 ⁻⁷	7,110*10 ⁻⁴	99,935
Piscina 3 70/30	1,571x10 ⁻⁴	1,3091*10 ⁻⁷	9,9554*10 ⁻⁴	99,982

Los resultados obtenidos en las concentraciones de Hg están por debajo de los límites permisibles (Anexo 6 tabla completa de concentraciones) establecidos en la Resolución 631 del 2015, el cual es de 0,002 mg/L, y el decreto 1287 establece 0,02mgHg/g, como se logra observar ningún resultado sobrepasa los límites mencionados anteriormente en la normatividad ambiental colombiana.

4.5.1. Mezcla 30/70

Esta mezcla se encuentra compuesta de 30% Lodo y 70% Cemento, presentó la concentración más baja de mercurio en las tres piscinas, teniendo el menor resultado en la piscina 3 en donde su concentración fue tan baja que estuvo por debajo de detección del equipo, seguido de la piscina 2 con una concentración de $1,309 \cdot 10^{-7}$ mgHg/g bloque y finalmente $1,871 \cdot 10^{-7}$ mgHg/g bloque de la piscina 1, lo cual indica que sería la mezcla óptima para el encapsulamiento del mercurio.

4.5.2. Mezcla 70/30

Se compone de 70% Lodo y 30% Cemento al igual que la anterior no incumple con ninguno de los límites permisibles establecidos para las concentraciones de mercurio según su uso, en las piscinas 1 y 2 se obtuvo igual resultado en sus concentraciones con un valor de $2,716 \cdot 10^{-7}$ y la piscina 3 presentó una concentración de $1,3091 \cdot 10^{-7}$ mgHg/g bloque de indicando que, aunque fue mayor que las anteriores mezclas aún siguen siendo buenos resultados.

4.5.3. Mezcla 50/50

Esta mezcla se encuentra compuesta de 50% Lodo y 50% Cemento, presentó un valor bajo en la Piscina 1 con un valor de $2,716 \cdot 10^{-7}$ seguidamente la piscina 2 con $4,406 \cdot 10^{-7}$ y posteriormente en la piscina 3 con $6,4616 \cdot 10^{-7}$ siendo este último el valor más alto en las concentraciones finales de Mercurio. Aunque no superó los límites máximos permisibles se debe tener en cuenta que está ocurriendo en esta piscina para que no siga incrementando estas concentraciones.

4.6. Diseño de protocolo para la disposición final de residuos peligrosos (lodos mineros) generados en la mina aurífera de Curiaco del municipio de Santa Rosa.

Se diseñó un paso a paso para la encapsulación del mercurio contenido en lodos provenientes de la mina Aurífera de Curiaco del Municipio de Santa Rosa Cauca, el cual tiene como objetivos:

Objetivo general

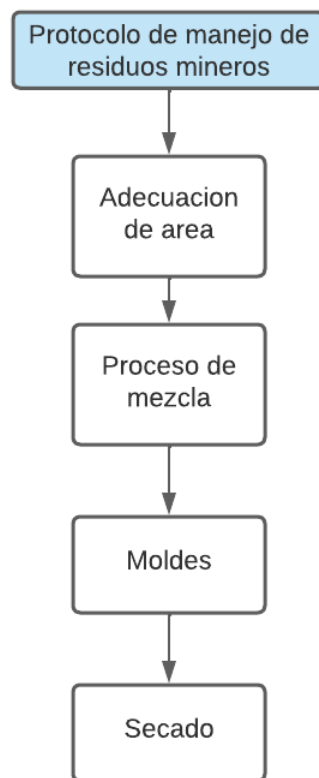
Implementar el protocolo para el manejo de los lodos residuales de la mina Curiaco, del municipio de Santa Rosa, Cauca.

Objetivos específicos

- Desarrollar la guía de capacitaciones para el personal de la mina Curiaco, del municipio de Santa Rosa, Cauca.
- Definir la mezcla (30/70, 70/30 o 50/50) según su eficiencia y presupuesto para la encapsulación del mercurio
- Diseñar los bloques a escalas mayores según las necesidades de la mina CURIACO, del municipio de Santa Rosa, Cauca.

El propósito del protocolo para el manejo de los sedimentos contaminados es mejorar rápidamente la situación actual de la mina como consecuencia de la extracción del oro utilizando el mercurio, teniendo un mal manejo y disposición final de los lodos.

Ilustración 9. Procedimiento para manejo de sedimentos contaminados con mercurio



Guía de capacitación

Inicialmente se debe diseñar un plan de capacitación y concientización al personal de la mina, a través de herramientas visuales y lúdicas, evitando terminaciones técnicas debido al nivel

de estudio de algunos trabajadores de la mina con el fin de lograr una mayor percepción del tema

Tabla 13. Capacitación de Protocolo Para la Encapsulación de Mercurio

Tema	Descripción
Mercurio	Que es Usos Ficha Técnica del mercurio (EPP, almacenamiento, manipulación, derrames etc) Impactos a la salud impactos al medio ambiente
lodos mineros	Que son Qué composición tienen Porque es importante tratarlos
Encapsulación	Que es Para qué sirve Proceso de encapsulamiento
Sostenibilidad	En qué consiste Como se puede implementar en la mina
Observaciones	Recolección de sugerencias de los trabajadores de la mina sobre el proyecto.

paso 1: Adecuación del área

Es necesario para el proceso de encapsulación del mercurio contar con un espacio adecuado para la recepción de materias primas(lodo/cemento) con medidas de (5m ancho*7m largo*2m Alto) el cual debe estar bajo techo, el piso cubierto con material (se sugiere baldosa o piso primario) que no permita la permeabilidad al suelo, esto para permitir que no se tengan pérdidas de sedimentos por escorrentías. Estas medidas se toman según corresponda, en este caso la mina no cuenta con mucho espacio por lo que se planteó con las medidas anteriores ya que se debe dejar el espacio donde se reciben y almacenan las materias primas, el espacio donde se mezclan y finalmente el secado. Se aclara que las medidas de esta área pueden variar según las condiciones y la necesidad de la mina.

Paso 2 Proceso de Mezcla

Mezcla óptima

Los resultados de este estudio arrojaron que la mezcla óptima es de 30% Lodo y 70% Cemento ya que su porcentaje de encapsulamiento fue del 99.79% pero, por reducción de costos se recomienda usar cualquiera de las tres ya las otras dos mezclas 70/30 y 50/50 obtuvieron un porcentaje de encapsulamiento del 98.73% y 97.45% respectivamente los cuales representan también un alto grado de confiabilidad

Una vez escogido el porcentaje de mezcla a usar se procede a pesar el material y a mezclarlo en un recipiente de 0.5m³

Para 30/70

30% Lodo 70% cemento, esta mezcla es un poco costosa ya que si se tienen 0.5 m³ se deben pesar 150 Kg de lodo y 350 Kg de cemento.

70/30

70% Lodo 30% cemento: para 0.5 m³ se deben pesar 350 Kg de lodo y 150 Kg de cemento

50/50

50% Lodo 50% cemento para 0.5 m³ se deben pesar 250 Kg de lodo y 250 Kg de cemento

Mezclado

Para este proceso se puede realizar mecánicamente a través de una mezcladora o proceso manual en donde se debe mezclar hasta que el cemento y el lodo estén homogéneos sin dejar secar la muestra se disponen en moldes. Estos procesos se deben realizar con los Equipos de Protección Personal adecuados como (Tapabocas, mascarilla, overol y guantes gruesos).

Paso 3 Moldes

Los moldes se establecen dependiendo de la necesidad de la mina, se sugiere realizar bloques en forma de ladrillos teniendo en cuenta si son para mampostería de uso interior o estructural

las medidas de dichos ladrillos deben ser tomadas según lo establecido en la Norma Técnica Colombiana 4205 Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades De Mampostería De Arcilla Cocida. Ladrillos Y Bloques Cerámicos. Su uso podría ser para completar las paredes de infraestructura de la misma, se aclara que mediante este estudio de investigación se le realizaron pruebas de absorción en agua, pero no de resistencia y compresión, por tanto, está a disposición de la mina la realización de estas pruebas

Paso 4 Secado

Se debe realizar el secado de lodos el cual debe variar según el tamaño escogido para los moldes, se recomienda hacer una proyección ya que para este estudio se estableció 5 días de secado para cubos de lados de 5 cm con un volumen de 125cm^3 y a una temperatura promedio de $22\text{ }^\circ\text{C}$

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones

En este estudio de investigación se evaluó la posibilidad de encapsular el mercurio contenido en lodos residuales de la mina artesanal aurífera Curiaco del municipio de Santa Rosa-Cauca a través de bloques de cemento, el cual fue un resultado positivo en el que se logró una eficiencia de encapsulación de Hg mayor a 97% , en donde el mercurio se inmovilizó en cada mezcla de cada piscina de lodos, las concentraciones finales estuvieron por debajo de los límites permisibles establecidos en la resolución 631 del 2015 y el decreto 1287 del 2014, sin embargo las concentraciones iniciales analizadas en volúmenes excedían el límite máximo permisible, por el contrario paso en las concentraciones iniciales analizadas como biosólidos en donde las concentraciones iniciales no excedieron el límite máximo permisible, si bien estos resultados no sobrepasaron la norma, se realizó de igual manera este estudio con el fin de tener el porcentaje final de encapsulación del Hg y verificar la eficiencia del cemento como agente encapsulador.

En este proceso de encapsulación con el fin de complementar los resultados finales y analizar si en el proceso de lixiviación el Hg afecta otros parámetros, se tomaron mediciones diarias de pH, Conductividad, Potencial redox y temperatura a cada muestra en donde las conductividades fueron ascendentes, el pH en contacto con el bloque (lodo +Cemento) se alcalinizó con resultados de 11-12, con respecto al potencial redox fue negativo en todas las muestras lo cual indica un sistema reductor, en donde no hay formación de metilmercurio ya que este se da en mayor porcentaje en sistemas oxidantes acuoso

Se logró establecer la mezcla óptima de concreto-lodo, para el encapsulamiento del mercurio a través de diferentes concentraciones, la cual fue (30% Lodo/70% Cemento), donde se obtuvo un 99,79% de eficiencia en el encapsulamiento de mercurio. La mayoría de las concentraciones finales leídas por el espectrofotómetro, estuvieron por debajo de la lectura de este, lo que indicó que el cemento es un buen medio para encapsular el mercurio, dado que las otras dos mezclas de 50/50 y 70/30 también tuvieron porcentajes por encima del 97%.

Se diseñó un protocolo con el paso a paso para encapsular el mercurio contenido en lodos mineros, esto con el fin de que los trabajadores de la mina tuvieran una guía para el desarrollo

de este estudio, en el tratamiento de sus lodos mineros, el cual incluye objetivos, capacitaciones, manejo de EPP (Elementos de Protección Personal), diseño de área, mezclado y disposición final según las necesidades de la mina aurífera Curiaco del municipio de Santa Rosa Cauca.

5.2. Recomendaciones

Con la investigación realizada y la información recolectada en este proyecto da pie para nuevas investigaciones donde se tenga en cuenta equipos con menor rango de detección de mercurio para evaluar el mineral que está siendo encapsulado durante el proceso.

Se recomienda implementar este proceso de encapsulamiento sometiendo las muestras a diferentes temperaturas con todos los protocolos en el manejo de mercurio, ya que es un parámetro fundamental en este tipo de investigaciones.

Se sugiere continuar con esta investigación como primera fase y realizar estudios de compresión y resistencia a los bloques de cemento.

Se recomienda analizar las concentraciones de otros tipos de metales contenidos en los lodos de minería como el cianuro y verificar si al igual que el Mercurio se encapsula con cemento.

6. REFERENCIAS

- [1] L. Rocha Roman, J. Olivero Verbel, And K. R. Caballero Gallardo, “Impacto De La Minería Del Oro Asociado Con La Contaminación Por Mercurio En Suelo Superficial De San Martín De Loba, Sur De Bolívar (Colombia),” 34, 2018.
- [2] E. Velasco Ambuila, “Evaluación Ecotoxicológica En Lodos Contaminados Con Mercurio Y/O Cianuro Producidos En El Beneficio De Oro En Suárez - Cauca Por Medio De Procesos Biológicos,” Corporación Universitaria Autónoma Del Cauca, 2021.
- [3] A. Romero And S. Flores, “Reuso De Relaves Mineros Como Insumo Para La Elaboración De Agregados De Construcción Para Fabricar Ladrillos Y Baldosas,” *Univ. Nac. Mayor San Marcos*, Vol. 13, 2010, [Online]. Available: <https://go-gale-com.bdigital.sena.edu.co/ps/l.do?p=ifme&u=sena&id=gale%7ca309458750&v=2.1&it=r%0a>.
- [4] Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible, “Sinopsis Nacional Aurífera Al De La Minería Artesanal Y De Pequeña Escala,” Vol. 1, P. 68, 2012, [Online]. Available: https://www.minambiente.gov.co/images/asuntosambientalesysectorialyurbana/pdf/mercurio/sinopsis_nacional_de_la_asm.pdf.
- [5] National Risk Management Research Laboratory, Land Remediation And Pollution Control Division, U.S. Environmental Protection Agency, Office Of Research And Development, And Battelle Memorial Institute, “Advances In Encapsulation Technologies For The Management Of Mercury-Contaminated Hazardous Wastes,” *J. Hazard. Mater.*, Vol. 114, No. 1–3, Pp. 211–223, 2004.
- [6] “Desarrollo Del Sector Minero Colombiano 2018-2022,” P. 28, [Online]. Available: http://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/2018/10/desarrollosectorminero-versionweb_1-1.pdf.
- [7] E. L. Duarte Reina, “Utilidades Obtenidas En La Exploración Y Evaluación De La Minería En Colombia Según Niif 6 Que Generan Fuertes Impactos En El Medio Ambiente,” P. 9, 2018, [Online]. Available:

[https://Repository.Unimilitar.Edu.Co/Bitstream/Handle/10654/18144/Duarte Reina Erika Lorena 2018.Pdf?Sequence=2&Isallowed=Y](https://Repository.Unimilitar.Edu.Co/Bitstream/Handle/10654/18144/Duarte_Reina_Erika_Lorena_2018.Pdf?Sequence=2&Isallowed=Y).

- [8] Ministerio De Minas Y Energia And Unidad De Planeacion Minero Y Energetica, “Informe De Gestion 2014,” *Repub. Colomb.*, P. 112, 2014, [Online]. Available: [Http://Www.Upme.Gov.Co/Upme12/2014/Informe_Upme_2014.Pdf](http://Www.Upme.Gov.Co/Upme12/2014/Informe_Upme_2014.Pdf).
- [9] M. Bonilla Madriñan And A. M. Rojas Bernal, “Cuantificacion De Liberaciones Antropogenicas De Mercurio En Colombia,” *Univ. Antioquia Grup. Diagnostico Y Control La Contam. Minist. Ambient. Vivienda Y Desarro. Territ.*, P. 83, 2010, [Online]. Available: [Https://Www.Minambiente.Gov.Co/Wp-Content/Uploads/2021/06/Inventario_Cuantificacion_Mercurio.Pdf](https://Www.Minambiente.Gov.Co/Wp-Content/Uploads/2021/06/Inventario_Cuantificacion_Mercurio.Pdf).
- [10] M. F. Arciniegas Jimenez, “Estabilizacion De Residuos Solidos Toxicos Mediante Encapsulamiento: Una Alternativa En La Gestion De Residuos,” Universidad De Los Andes, 2003.
- [11] C. D. R. Ortiz Lopez, “Estudio De Solidificacion Macroencapsulacion,” Escuela Politecnica Nacional, 2009.
- [12] L. E. Rojas Huamani And L. E. Ventura Huaman, “Utilizacion Del Relave Minero Para La Elaboracion De Bloques De Concreto Tipo Ensamble,” Universidad Nacional De Huancavelica, 2017.
- [13] D. Sanchez Chinchay, “Encapsulamiento De Metales Pesados En Matriz Concreto Con Cemento Tipo 5,” Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo,” 2014.
- [14] A. Navarro Flores, “Inmovilizacion De Mercurio En Suelos Contaminados Mediante El Empleo De Cemento Portland (Opc),” *Univ. Politec. Cataluña*, Vol. 1, P. 9, 2021, [Online]. Available: [Https://Www.Researchgate.Net/Profile/Andres-Navarro-4/Publication/350515380_Inmovilizacion_De_Mercurio_En_Suelos_Contaminados_Mediante_El_Empleo_De_Cemento_Portland/Links/60644f11299bf173677e23cc/Inmovilizacion-De-Mercurio-En-Suelos-Contaminados-Mediante-](https://Www.Researchgate.Net/Profile/Andres-Navarro-4/Publication/350515380_Inmovilizacion_De_Mercurio_En_Suelos_Contaminados_Mediante_El_Empleo_De_Cemento_Portland/Links/60644f11299bf173677e23cc/Inmovilizacion-De-Mercurio-En-Suelos-Contaminados-Mediante-).
- [15] A. Navarro, “Inmovilizacion De Mercurio En Suelos Contaminados Mediante El Empleo De Cemento Portland,” *Univ. Politec. Catalonia*, 2021, [Online]. Available:

https://www.researchgate.net/publication/350515380_inmovilizacion_de_mercurio_en_suelos_contaminados_mediante_el_empleo_de_cemento_portland.

- [16] Ministerio De Minas Y Energia, “Explotacion Ilicita De Minerales,” *Iniciativa Para La Transparencia De Las Industrias Extractivas*, 2016. <https://www.eiticolombia.gov.co/es/informes-eiti/informe-2016/marco-institucional/explotacion-ilicita-de-minerales/#:~:Text=159>) Así%3a “La Exploración,Privada%2c Sin El Correspondiente Título.
- [17] Unidad De Restitucion De Tierras, “Cartilla Minería,” P. 40, 2015, [Online]. Available: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/documentosanm/cartilla_de_mineria_final.pdf.
- [18] Gobierno De Colombia, “Decreto 933 De 2013,” 2013, [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=53054>.
- [19] Bnamericas, “Panorama Minero De Colombia,” P. 10, Aug. 11, 2022.
- [20] M. J. Rubiano, M. A. Velez, And X. Rueda, “Minería De Oro Artesanal Y De Pequeña Escala: Estrategias Para Su Formalizacion Y Diferenciacion De La Minería Ilegal,” *Cent. Estud. Sobre Seguridad Y Drog.*, P. 58, 2020, [Online]. Available: <https://cesed.uniandes.edu.co/mineria-de-oro-artesanal-y-de-pequena-escala-estrategias-para-su-formalizacion-y-diferenciacion-de-la-mineria-illegal/>.
- [21] E. A. Goñi Pachioni, A. Sabogal Moreno, And R. Asmat, “Minería Informa Aurífera En Colombia,” *Cent. Investigacion Econ. Y Soc.*, P. 89, 2014, [Online]. Available: [https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/368/Mineria Informal Aurifera En Colombia - Informe_Linea_Base_Mineria Informal - Pagina Fedesarrollo.Pdf?Sequence=2&Isallowed=Y](https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/368/Mineria%20Informal%20Aurifera%20En%20Colombia%20-%20Informe_Linea_Base_Mineria_Informal%20-%20Pagina%20Fedesarrollo.Pdf?Sequence=2&Isallowed=Y).
- [22] Pais Minero, “Minería En Colombia, Una Historia De Oro Y Tradición,” 2017.
- [23] Y. A. Gomez Ruiz And Y. C. Urrutia Imbachi, “Evaluación Del Uso Potencial De Los Lodos Residuales Provenientes De La Actividad Minera Aurífera Para La Elaboración De Bloques De Mampostería En El Municipio De Suarez Cauca,” Uniautónoma Del

Cauca, 2021.

- [24] J. F. Hernandez Gomez, “Crónica De La Minería De Oro En Colombia: De La Montaña Al Texto,” *Estudios Colombianos*, P. 4, 2018.
- [25] Commission Of The European Communities, “Strategy For A Future Chemicals Policy,” P. 32, 2001, [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/Lexuriserv/Lexuriserv.Do?Uri=Com:2001:0088:Fin:En:Pdf>.
- [26] Gobierno De Colombia, “Ley 1658 De 2013,” 2013, [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/Eva/Gestornormativo/Norma.Php?I=53781>.
- [27] K. J. Santander Muñoz And V. S. Quijo Chavarro, “Sistema De Manejo Para Lodos De Dique De Colas Provenientes De La Minería De Oro En La Vereda El Tamboral, Suarez - Cauca,” Uniautonomia Del Cauca, 2018.
- [28] Biomédica, “Contaminación Con Mercurio Por La Actividad Minera,” *Inst. Nac. Salud*, Vol. 32, P. 3, 2012, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/843/84324092001.pdf>.
- [29] Subdirección De Salud Ambiental, “Mercurio,” *Minist. Salud Y Prot. Soc.*, P. 16, 2022, [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/Sites/Rid/Lists/Bibliotecadigital/Ride/Vs/Pp/Sa/Abc-Mercurio.Pdf>.
- [30] V. E. Pizo, “Programa De Manejo Integral De Colas De Sedimentos De La Mina Curiaco,” *I*, P. 18, 2021.
- [31] Environmental Protection Agency, “Mercury In Solid Or Semisolid Waste (Manual Cold-Vapor Technique),” Vol. 2, 2007, [Online]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/doc17.pdf>.
- [32] M. R. Martinez Guijarro, “Técnicas De Generación Por Vapor Acopladas A Espectrofotometría De Absorción Atómica,” Universidad Politécnica De Valencia, 2021.
- [33] A. A. Arango Escobar, “Implementación Y Estandarización Del Método Para La

Determinacion De Arsenico En Muestras De Agua En Influencia Minera Por Espectroscopia De Absorcion Atomica Generador De Hidruros,” Universidad Nacional Abierta Y A Distancia, 2020.

- [34] Instituto Distrital De Patrimonio Cultural, “Plan De Gestión Integral De Residuos Peligrosos Y Especiales -Pgirp,” 2018. [Online]. Available: https://idpc.gov.co/wp-content/uploads/2018/11/120182300080653_00002.pdf.
- [35] Escoria Argos, “Hoja De Datos De Seguridad.” P. 14, [Online]. Available: <https://www.argos-us.com/wp-content/uploads/2021/03/10-Argos-Slag-Safety-Data-Sheet-Espanol-6-16-2020.pdf>.
- [36] “Folleto Informativo Ph,” Vol. 3.1.4.0, [Online]. Available: https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3140sp.pdf.
- [37] A. M. Jimenez Gomez, “Interaccion Del Mercurio Con Los Componentes De Las Aguas Residuales,” Universidad Nacional De Colombia, 2005.
- [38] J. L. Valls, “Potencial Redox De Oxidacion - Reduccion Orp, Para La Bioseguridad De Nuestras Granjas,” P. 5, 2019.
- [39] “Como Afecta La Temperatura En Las Mediciones De Ph,” 2019, [Online]. Available: <https://medidordeph.com/blog/2019/11/como-afecta-la-temperatura-en-las-mediciones-de-ph/>.
- [40] Municipios De Colombia, “El Municipio De Santa Rosa,” 2021, [Online]. Available: <https://www.municipio.com.co/municipio-santa-rosa-cau.html>.
- [41] P. Rivera Machado And J. S. Valencia Herrera, “Validacion De La Metodologia Para El Analisis De Mercurio En Agua Tratada Y Cruda, Y Estandarizacion Del Analisis De Mercurio En Pescados Por El Metodo De Absorcion Atomicavapor Frio Para El Laboratorio De Analisis De Aguas Y Alimentos De La Universidad T,” Universidad Tecnologica De Pereira, 2013.
- [42] A. L. Loza Del Carpio And Y. Ccancapa Salcedo, “Mer Curio En Un Arroyo Altoandino Con Alto Impacto Por Minería Aurífera Artesanal (La Rnconada, Puno,

Peru),” Vol. 36, 2020, [Online]. Available:
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992020000100033.

7. ANEXOS

Anexo 1: Tabla completa de pesos y pérdidas de pesaje por humedad

Muestra	Peso cajas (gr)	Peso día 1 (gr)	Día 1 total lodos (gr)	Día 2 (gr)	Día 2 total lodos (gr)	Perdida Día 1-Día 2 (gr)	Día 6 (gr)	Día 6 Total lodos (gr)	Perdida Día 6-Día 3 (gr)	Día 7 (gr)	Día 7 Total lodos (gr)	Perdida Día 7-Día 6 (gr)	día 8	día 8 Total lodos (gr)	Perdida 7 - Perdida 8
Piscina 1 M.1	88,937	134,807	45,870	0,000	-88,937	134,807	128,855	39,918	-128,855	128,448	39,511	0,407	127,789	38,852	0,659
Piscina 1 M.2	92,248	147,339	55,091	142,343	50,095	4,996	141,785	49,537	0,558	141,36	49,112	0,425	140,746	48,498	0,614
Piscina 2 M.1	84,526	129,260	44,734	123,874	39,348	5,386	123,330	38,804	0,544	123,01	38,484	0,320	122,884	38,358	0,126
Piscina 2 M.2	87,402	132,023	44,621	127,676	40,274	4,347	127,176	39,774	0,500	126,835	39,433	0,341	126,323	38,921	0,512
Piscina 3 M.1	83,932	111,552	27,620	107,949	24,017	3,603	107,951	24,019	-0,002	107,95	24,018	0,001	107,946	24,014	0,004
Piscina 3 M.2	84,947	115,751	30,804	111,635	26,688	4,116	111,657	26,710	-0,022	111,657	26,710	0,000	111,652	26,705	0,005

Anexo 2 Parámetros iniciales del lodo

Parámetros de lodos iniciales			
PARAMETROS	Piscina 1	Piscina 2	Piscina 3
Conductividad 1999	217	121	0,41
Conductividad 19,99	0,2	0,1	0,02
Conductividad 199,9	186,2	110,7	41
pH	7,86	8,14	8,12
Temperatura	22,4°C	22,7°C	23,0°C
Redox	-55,7	-34,6	-71,1

Anexo 3 Tablas de mediciones diarios de parámetros Piscina 1

Piscina 1 Mezcla 30/70

Parámetro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70
pH	11.98	11.7	11.68	12.54	12.58	12.59	12.65	12.65	12.66	12.74	12.74	12.76	12.74	12.72	12.71
Temperatura °C	23.4	23.2	23	21.9	22.1	22.2	22.8	22.8	23	21.7	21.9	21.9	21.7	21.6	21.5
Conductividad	2.2	2.2	2.1	9.2	10	10.4	10.4	8.9	10.1	13.3	14	14.5	15	14.5	15.8

Parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra a 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra a 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra 3 30/70	Piscina 1. Muestra 1 30/70	Piscina 1 Muestra 2 30/70	Piscina 1 Muestra a 3 30/70
pH	12.779	12.8	12.82	12.842	12.859	12.866	12.77	12.784	12.797	12.84	12.86	12.85	12.835	12.877	12.874
Temperatura °C	21.6	21.6	21.6	21.6	21.5	21.6	22.6	22.6	22.7	22.3	22.4	22.8	22.2	22	21.9
Conductividad	15.6	15.7	16.6	17.8	17.9	18.4	17.9	18.4	19.1	19.1	19	19.8	19.2	19.2	19.7
Redox										-332.3	-333.3	-333.3	-331.5	-333.6	-333.3

Piscina 1 Mezcla 70/30

Parametro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30
pH	11.89	11.64	11.66	12.38	12.54	12.52	12.655	12.606	12.619	12.73	12.67	12.73	12.691	12.664	12.63
Temperatura °C	23.3	23.1	23.2	22	22.1	21.9	22.7	23.2	23.7	21.9	21.9	21.7	21.6	21.6	21.6
Conductividad	2.2	1.3	1.4	9.3	7.2	9.4	9.6	9	8.2	13.5	10.5	11.6	15.3	11.9	14.9
Redox															

Parametro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30	Piscina 1. Muestra 1 70/30	Piscina 1 Muestra 2 70/30	Piscina 1 Muestra 3 70/30
pH	12.828	12.771	12.829	12.884	12.825	12.874	12.817	12.764	12.807	12.89	12.83	12.86	12.885	12.84	12.881
Temperatura °C	21.6	21.5	21.6	21.5	21.5	21.6	22.6	22.7	22.8	22.2	22.2	22.4	22	22	21.9
Conductividad	16.3	13	15.8	18.3	15.2	17.8	19.1	15.3	18.3	19.7	15.8	19.2	20	16.5	19.3
Redox										-334.6	-331.6	-333.4	-334.1	-331.6	-333.7

	1 50/50	2 50/50	3 50/50	1 50/50	2 50/50	3 50/50	1 50/50	2 50/50	3 50/50	1 50/50	2 50/50	3 50/50	1 50/50		
pH	12.829	12.429	12.595	12.876	12.479	12.573	12.81	12.429	12.433	12.88	12.48	12.44	12.854	12.489	12.382
Temperatura °C	21.6	21.8	21.6	21.5	21.7	21.4	22.7	22.9	22.6	22.3	22.4	22.2	22.4	22.1	22
Conductividad	15.5	6.1	9.3	18	6.4	7.9	18.5	6.9	6.7	19.1	0.7	6.2	19.5	7.1	5.5
Redox										-334	-312.8	-310.4	-332.8	-312.8	-306.8

Parámetro	10/7/2022			10/10/2022		
	Piscina 1. Muestra 1 50/50	Piscina 1 Muestra 2 50/50	Piscina 1 Muestra 3 50/50	Piscina 1. Muestra 1 50/50	Piscina 1 Muestra 2 50/50	Piscina 1 Muestra 3 50/50
pH	12.89	12.51	12.25	12.898	12.547	11.493
Temperatura °C	21.8	21.9	21.8	21.8	21.9	21.8
Conductividad	19.9	7.4	4.9	20.9	9.9	3.8
Redox	-334.5	-313.9		-334.6	-315.7	-258.5

Anexo 4. Tablas de mediciones diarios de parámetros Piscina 2

Parámetro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70
pH	11.68	11.75	11.79	12.54	12.57	12.58	12.62	12.64	12.66	12.7	12.75	12.75	12.79	12.83	12.85
Temperatura °C	23.2	23.3	23.3	22.3	22.3	22.2	23.1	23.3	23.3	21.7	21.7	21.7	21.5	21.5	21.4
Conductividad	0.6	0.8	0.7	7.8	9.2	9.7	11.2	12.7	13.1	12.9	14.3	14.6	12.6	14.3	15.4

Parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70
pH	12.819	12.837	12.839	12.573	12.841	12.851	12.761	12.791	12.802	12.8	12.83	12.83	12.813	12.841	12.86
Temperatura °C	21.7	21.7	21.7	21.4	22	22.1	22.5	22.6	22.7	22.4	22.7	22.8	22.3	22.4	22.3
Conductividad	13.5	15.8	15.9	15.6	16.9	17.7	16.7	18	18.4	17.3	18.3	18.7	16.9	18.7	19
Redox										-330	-332.2	-332.2	-330.6	-332.1	-333

Parámetro	10/7/2022			10/10/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra a 3 30/70	Piscina 2. Muestra 1 30/70	Piscina 2 Muestra 2 30/70	Piscina 2 Muestra 3 30/70
pH	12.81	12.84	12.86	12.852	12.86	12.874
Temperatura °C	22	22	22.1	21.8	21.8	21.8
Conductividad	17.7	18.7	19.1	18.3	18.8	18.9
Redox	-330	-332.1	-332.8	-331	-332.6	-333.3

Piscina 2 mezcla 70/30

parámetro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30
pH	11.90	11.95	11.85	12.38	12.54	12.52	12.64	12.64	12.65	12.63	12.68	12.7	12.81	12.83	12.83
Temperatura °C	23.1	23.1	23.1	22	22.1	21.9	23.4	23.3	23.2	22	21	21.7	21.5	21.5	21.4
Conductividad	0.6	1.1	1	7.4	7.8	9.1	11.3	12.3	12.3	13.2	14.3	14.2	14.1	15.2	15.1

Parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30
pH	12.789	12.817	12.828	12.842	12.853	12.857	12.802	12.811	12.811	12.84	12.85	12.85	12.852	12.765	12.868
Temperatura °C	21.6	21.6	21.7	22	22	22.1	22.6	22.7	22.7	22.4	22.7	22.6	22.3	22.3	22.4
Conductividad	15.1	16.1	16.5	16.8	17.8	18	16.9	19	19	17.9	19.3	19.2	18.4	19.8	19.8
Redox										-332.1	-332.9	-333	-332.6	-332.7	12.87

	10/7/2022			10/10/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30	Piscina 2. Muestra 1 70/30	Piscina 2 Muestra 2 70/30	Piscina 2 Muestra 3 70/30
pH	12.85	12.86	12.87	12.87	12.886	12.897
Temperatura °C	22.1	22.1	22.1	21.8	21.8	21.8
Conductividad	18.7	20.1	20.2	19	20.6	20.1
Redox	-332.5	-333.2	-333.7	-333.1	-334	-334.6

Piscina 2 mezcla 50/50

Parámetro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50
pH	11.869	11.812	11.971	12.51	12.54	12.53	12.631	12.605	12.61	12.72	12.69	12.68	12.836	12.796	12.772
Temperatura °C	23.3	23.4	23.4	21.8	21.7	21.8	23.7	23.5	23.1	21.7	21.7	21.8	21.5	21.5	21.5
Conductividad	1.9	1.3	1.9	9.8	8.2	8.9	12.6	10.9	11.2	13.8	11.8	12.3	14.7	12.8	13.2
Redox															

parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50	Piscina 2. Muestra 1 50/50	Piscina 2 Muestra 2 50/50	Piscina 2 Muestra 3 50/50
pH	12.835	12.806	12.789	12.867	12.826	12.811	12.831	12.797	12.78	12.86	12.83	12.81	12.87	12.85	12.829
Temperatura °C	21.7	21.7	21.8	22.1	22.1	22.2	22.6	22.7	22.8	22.5	22.6	22.7	22.3	22.4	22.5
Conductividad	15.9	13.9	14.1	17.5	15.6	15.4	18.4	16.2	16.3	19	16.6	17	19.2	17.1	17.4
Redox										-333.4	-332	-330.7	-333.6	-332.6	-331.6

Parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70
pH	12.809	12.783	12.779	12.833	12.804	12.796	12.81	12.761	12.749	12.8	12.79	12.77	12.824	12.811	12.802
Temperatura °C	21.6	21.6	21.5	22	22.1	22	22.5	22.6	22.7	22.7	22.9	23	22.4	22.5	22.6
Conductividad	14.7	13.1	13.4	15.7	14.4	14.7	16.4	15.3	15.3	16.8	15.7	15.8	16.9	15.8	16.2
Redox										-330.5	-329.2	-329.2	-331.2	-330.7	-330.2

Parámetro	10/7/2022			10/10/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70	Piscina 3. Muestra 1 30/70	Piscina 3 Muestra 2 30/70	Piscina 3 Muestra 3 30/70
pH	12.82	12.81	12.81	12.87	12.855	12.84
Temperatura °C	22.2	22.2	22.2	21.9	21.9	21.9
Conductividad	15.9	15.8	16.2	16.4	16.6	16.8
Redox	-330.8	-330.4	-330.1	-333.2	-332.3	-332.1

Piscina 3 Mezcla 70/30

parámetro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30
pH	11.921	11.95	11.978	12.41	12.42	12.41	12.573	12.565	12.542	12.64	12.63	12.59	12.836	12.76	12.824
Temperatura °C	23.1	23.2	23.1	21	21.6	22	23.6	23.4	23.1	21.9	21.8	21.9	21.6	21.6	21.6
Conductividad	1.3	1.5	1.6	7.9	7.9	7.3	12.5	10	12.6	9.7	9.5	9	11	10.2	9.4
Redox															

Parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30
pH	12.741	12.713	12.681	12.765	12.723	12.694	12.733	12.697	12.667	12.75	12.7	12.68	12.778	12.733	12.71
Temperatura °C	21.6	21.6	21.6	22	22.1	22.2	22.6	22.6	22.8	22.8	23	23	22.5	22.5	22.6
Conductividad	11.5	10.6	9.7	12.6	11.4	10.8	13.3	12.1	11.5	13.7	12.2	11.8	13.8	12.4	11.9
Redox										-327.5	-325.2	-323.9	-328.8	-326.4	-325.2

Parámetro	10/7/2022			10/10/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30	Piscina 3. Muestra 1 70/30	Piscina 3 Muestra 2 70/30	Piscina 3 Muestra 3 70/30
pH	12.78	12.74	12.71	12.817	12.774	12.758
Temperatura °C	22.2	22.3	22.3	21.8	21.9	21.9
Conductividad	14	12.5	12.1	15.1	13.2	12.8
Redox	-328.8	-326.6	-325.2	-330.2	-328	-327.1

Piscina 3 mezcla 50/50

Parámetro	10/1/2022			10/3/2022			10/4/2022			10/5/2022			10/6/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50
pH	12.775	12.805	12.789	12.798	12.823	12.801	12.769	12.806	12.778	12.77	12.8	12.79	12.799	12.831	12.817
Temperatura °C	21.7	21.7	21.6	22.1	22.2	22.2	22.6	22.7	22.8	22.9	22.9	22.9	22.7	22.7	22.6
Conductividad	14.5	15.6	13.8	15.6	16.8	15.3	16.5	17.9	16.2	16.7	18.2	16.2	16.6	18.5	16.7
Redox										-328.9	-330.8	-329.1	-330.2	-331.9	-331

Parámetro	9/26/2022			9/27/2022			9/28/2022			9/29/2022			9/30/2022		
	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50
pH	11.92	11.95	11.97	12.51	12.54	12.53	12.60	12.63	12.61	12.7	12.7	12.69	12.82	12.41	12.61
Temperatura °C	23.3	23.1	23.1	21.8	21.7	21.8	22.9	22.9	23.1	22	21.9	21.9	21.6	21.7	21.6
Conductividad	1.6	1.4	1.7	9.3	9.8	8.8	11.7	4.9	11.5	12.5	13.4	11.7	13.5	14.5	13.1
Redox															

10/7/2022			10/10/2022		
Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50	Piscina 3. Muestra 1 50/50	Piscina 3 Muestra 2 50/50	Piscina 3 Muestra 3 50/50
12.8	12.83	12.82	12.836	12.864	12.853
22.3	22.3	22.3	22	21.9	21.9
16.8	18.7	17.1	17.2	19.1	17
-329.9	-331.7	-331.2	-331.4	-332.9	-332.3

Anexo: 6 Concentraciones finales de mercurio

Tipo	Muestra	Concentración estándar	Concentración leída	Abs
UNK1	30/70 P1M1	<0.5	0,4274	0,006
UNK5	30/70 P1M2		0,1233	0,003
UNK7	30/70 P1M3		0,1233	0,003
UNK8	70/30 P1M1		0,5288	0,007
UNK9	70/30 P1M2		0,326	0,005
UNK10	70/30 P1M3		0,1233	0,003
UNK12	5050 P1M2		0,6302	0,008
UNK13	50/50 P1M3		0,326	0,005
UNK14	50/50 P1M1		0,0219	0,002
UNK15	30/70 P2M1		0,2247	0,004
UNK16	30/70 P2M2		-0,2822	-0,001
UNK17	30/70 P2M3		0,5288	0,007
UNK18	70/30 P2M1		0,6302	0,008
UNK19	70/30 P2M2		0,2247	0,004
UNK20	70/30 P2M3		0,1233	0,003
UNK21	50/50 P2M1		0,6302	0,008
UNK22	50/50 P2 M2		0,4274	0,006
UNK23	50/50 P2M3		0,5288	0,007
UNK24	30/70 P3M1		-0,3836	-0,002
UNK25	30/70 P3M2		-0,485	-0,003
UNK26	30/70 P3M3		0,1233	0,003
UNK27	50/50 P3M1		-0,0795	0,001
UNK28	50/50 P3M2		0,6302	0,008
UNK29	50/50 P3M3		0,2247	0,004

UNK30	70/30 P3M1		-0,2822	-0,001
UNK31	70/30 P3M2		0,7316	0,009
UNK32	70/30 P3M3		0,0219	0,002
UNK33	Blanco acido nitrico		0,326	0,005

Ppb

LC	0.5 ppb
----	---------

0,2