

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“INERTIZACIÓN DE RELAVES MINEROS UTILIZANDO LA
VITRIFICACIÓN PARA SU APROVECHAMIENTO EN LA
CONSTRUCCIÓN”**

Realizado por:

KIMBERLY REBECA SALGUERO SALAZAR

Director del proyecto:

MSc. KATTY CORAL

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Quito,

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, KIMBERLY REBECA SALGUERO SALAZAR, con cédula de identidad # 1718419300, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

A photograph of a document showing a handwritten signature in blue ink. Below the signature, the text "FIRMA Y CÉDULA" is printed, followed by the handwritten identification number "1718419300".

FIRMA Y CÉDULA
1718419300

FIRMA Y CÉDULA

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“INERTIZACIÓN DE RELAVES MINEROS UTILIZANDO LA VITRIFICACIÓN PARA SU APROVECHAMIENTO EN LA CONSTRUCCIÓN”

Realizado por:

KIMBERLY REBECA SALGUERO SALAZAR

como Requisito para la Obtención del Título de:

INGENIERA AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

KATTY CORAL

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

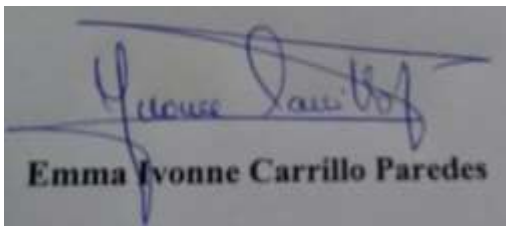
IVONNE CARRILLO

WALBERTO GALLEGOS

Después de revisar el trabajo presentado,

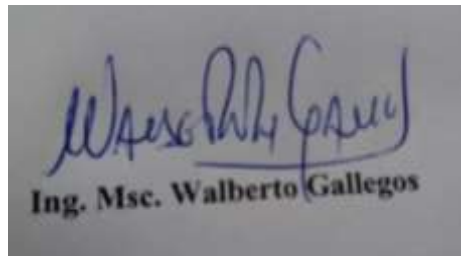
lo han calificado como apto para su defensa oral

ante el tribunal examinador



Emma Ivonne Carrillo Paredes

FIRMA



Ing. Msc. Walberto Gallegos

FIRMA

Quito,

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado las fuerzas y los recursos necesarios en el transcurso de la carrera y ayudarme a cumplir mis objetivos terminando este trabajo con excelencia. A mis padres Renato y Patricia, quienes me han brindado apoyo incondicional y han sabido guiarme por el camino del bien, permitiendo que fije mis metas y objetivos con mucho amor y motivación constante. A mi hermana Priscila quien ha sido mi hermana, consejera y amiga, siempre impulsándome a ser mejor siendo un modelo a seguir. A mi novio Juan Diego, que me ha apoyado incondicionalmente, retándome a ser mejor cada día con mucho amor y paciencia. A mis amigas Melissa, Victoria, Viviana y Marjurie, quienes me han brindado su apoyo durante toda mi carrera universitaria siendo personas sinceras e incondicionales. A mi tutora de tesis Katty, quien me ha sabido guiar tanto profesionalmente como ser humano y permitido realizar este trabajo superando toda expectativa.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida y permitir que me forme como profesional.

A mi madre por siempre ser mi mejor amiga y un modelo a seguir, motivándome a no darme por vencida y enseñarme a terminar todo lo que empiezo.

A mi padre quien ha sido mi apoyo incondicional y motor para seguir adelante a pesar de toda prueba que la vida me haya podido dar, por su tiempo y dedicación en todo lo que he necesitado.

A mi hermana y amigas quienes me han acompañado a lo largo de este viaje.

A mi novio que me impulso a esforzarme en la realización de este trabajo, gracias por tu apoyo y amor.

A mi tutora de tesis por la guía para la elaboración de este trabajo y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis.

¡Gracias a ustedes!

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Materiales y métodos	10
2.1 Caracterización de la muestra:	10
2.2 Selección de materiales para realizar la vitrificación:	10
2.2.1 Material Base	10
2.2.2 Fundentes	10
2.3 Preparación de la muestra (relave):	10
2.3.1 Determinación del contenido de humedad:	10
2.3.2 Tamaño de partícula:	11
2.4 Validación del proceso de vitrificación:	11
2.5 Diseño experimental:	11
2.5.1 Vitrificación de los desechos (relave minero, metales alternativos y cortopunzantes)	11
2.5.2 Requisitos de calidad:	14
2.5.3 Lixiviación:	16
2.5.4 Eficiencia de la técnica de vitrificación	16
2.5.4.1 Porcentaje de Inertización	16
2.5.4.2 Indicadores de Calidad ambiental.	17
3 Resultados	17
3.1 Resultado del porcentaje de humedad (%H) de la muestra del relave minero	17
3.2 Resultados de ensayos vitrificados de desechos (relaves mineros, metales alternativos y cortopunzantes)	17
3.3 Resultados de ensayos de vitrificación con diferentes cantidades de relave minero en condiciones ideales	22
3.4 Resultados obtenidos del ensayo de lixiviación	24
3.5 Resultados de eficiencia de la técnica de vitrificación	25
3.5.1 Porcentaje de inertización	25
3.5.2 Resultados del indicador de calidad ambiental	25
3.6 Requisitos de calidad	26
Discusión	27
Conclusiones	30
Referencias	32

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Ensayos de vitrificación preliminares</i>	13
<i>Tabla 2 Ensayos de vitrificación con diferentes cantidades de relave minero</i>	13
<i>Tabla 3 Ensayos de Vitrificación de relaves mineros sin secar y moler la muestra</i>	14
<i>Tabla 4 Requisitos de Calidad Cualitativos</i>	15
<i>Tabla 5 Porcentaje de humedad de la muestra</i>	17
<i>Tabla 6 Resultados de los ensayos de vitrificación con diferentes metales</i>	18
<i>Tabla 7 Resultado de los ensayos de vitrificación de relaves mineros sin secar ni moler</i>	21
<i>Tabla 8 Condiciones ideales de vitrificación</i>	22
<i>Tabla 9 Resultados de ensayos de vitrificación con diferentes cantidades de relave minero</i>	23
<i>Tabla 10 Valores medidos de Metales y Cianuro del lixiviado del relave sin inertizar</i>	24
<i>Tabla 11 Valores de Metales y Cianuro de la muestra del lixiviado del relave inertizado por vitrificación</i>	24
<i>Tabla 12 Límites máximos permisibles Acuerdo Ministerial 097 A</i>	25
<i>Tabla 13 Requisitos de Calidad Cuantitativos</i>	26

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1 Porcentaje de humedad</i>	11
<i>Ecuación 2 Cálculo del porcentaje de inertización</i>	17
<i>Ecuación 3 Cálculo del Indicador de Calidad del lixiviado</i>	17

Resumen

La elevada demanda de minerales metálicos produce que los relaves mineros se generen en enormes cantidades, provocando un problema para la industria al momento de gestionar estos desechos. Los relaves mineros, al no ser sometidos a un tratamiento adecuado pueden provocar contaminación al suelo, agua y mediante erosión contaminar el aire con partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, causando problemas a la salud y afectando al sistema respiratorio. La presente investigación presenta una alternativa de tratamiento a los relaves mineros tomados del Mineraducto del Distrito Minero Zaruma-Portovelo, mediante un proceso de inertización. Para lograr este objetivo, se usó la técnica de vitrificación *ex situ*, la cual consiste en someter la muestra seca de relave a altas temperaturas junto con vidrio en polvo y sustancias fundentes como bórax, para lograr un material químicamente inerte. El proceso aprovecha materiales que son residuos y que no tienen, en la actualidad, un gestor calificado, tal es el caso del vidrio; este mismo procedimiento se probó para otro tipo de desechos, como los cortopunzantes hospitalarios. Adicionalmente, se realizaron pruebas experimentales para obtener valores exactos de variables como temperatura, tiempo y composición para la vitrificación *ex situ* de los relaves mineros, con el fin de utilizarlos como materiales de construcción. Con la muestra inertizada, se comprobó mediante el ensayo de TCLP (Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad) que la técnica de vitrificación utilizada presenta elevados porcentajes de inertización, bordeando el 100% para Zn, Pb, Cu, en tanto que para el As se alcanzó 6,88%. Además, se desarrolló una metodología de vitrificación *ex situ*, que pueda aplicarse a diferentes tipos de residuos sólidos con elevadas concentraciones de metales pesados.

Palabras clave inertización, vitrificación, relaves mineros, aprovechamiento, contaminación, tratamiento, metales pesados.

Abstract

The high demand for metallic minerals means that mining tailings are generated in huge quantities, causing a problem for the industry when managing these wastes. The tailings mining, not being subjected to an adequate treatment can cause contamination to the soil, water and through erosion to contaminate the air with PM10 and PM2.5 particles, causing health problems and affecting the respiratory system. The present investigation presents an alternative of treatment to the mine tailings taken from the Mineraduct of the Zaruma-Portovelo Mining District, through an inertization process. To achieve this goal, the ex situ vitrification technique was used, which consists in subjecting the dry tailings sample to high temperatures together with powdered glass and fluxing substances such as borax, to achieve a chemically inert material. The process uses materials that are waste and that currently do not have a qualified manager, such is the case of glass; this same procedure was tested for other types of waste, such as hospital sharps. Additionally, experimental tests were carried out to obtain exact values of variables such as temperature, time and composition for ex situ vitrification of mining tailings, in order to use them as building materials. With the inert sample, it was verified through the TCLP test that the vitrification technique used has high percentages of inertization, bordering 100% for Zn, Pb, Cu, while for the As it was 6.88%. In addition, an ex situ vitrification methodology was developed, which can be applied to different types of solid waste with high concentrations of heavy metals.

Keywords

inertization, vitrification, mining tailings, exploitation, contamination, treatment, heavy metals.

Introducción

Para la mayoría de industrias, los minerales juegan un papel muy importante como base de los insumos utilizados para la elaboración de sus productos. Por esta razón, los mercados globales han aumentado la demanda de materias primas industriales y metales preciosos, así como también su costo, dando paso a que las cantidades extraídas de este material se multipliquen exponencialmente (Friess & Brotz, 2011). En los países en desarrollo, la actividad minera representa una oportunidad para que se generen inversiones extranjeras, lo cual ha permitido que el Producto Interno Bruto (PIB) se eleve (Jennings, 2001). Como es el caso de Chile, donde la producción minera de cobre ascendió desde el año 1960 de 14% de producción a 32% para el 2012, obteniendo un 60% en exportaciones al extranjero y 13% de PIB (Mendivinsky-Roa, G; Caroca, V; Vallejo, 2015).

La minería consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales recuperados de la corteza terrestre, donde, en su mayoría, se extraen físicamente grandes montos de materiales, de los cuales solo se recuperan ínfimas cantidades del producto deseado (Dammert & Molinelli, 2007). De acuerdo a la disponibilidad de cada país, se realizan distintos tipos de explotación minera como la minería a cielo abierto o minería subterránea, de las que se pueden extraer minerales metálicos o no metálicos (Enriquez, 2013). Cada tipo de explotación se regula de una manera diferente. Dependiendo de la magnitud de contaminación de la explotación, pero las instituciones de control muchas de las veces no alcanzan a controlar responsablemente todos los proyectos existentes, permitiendo que las actividades que conlleva la minería, generen repercusiones a nivel ambiental, económico, laboral y social (Moran, 2013).

Los procesos que se desarrollan en la minería pueden ocasionar sobre el ambiente impactos negativos a largo plazo y para identificarlos, es necesario conocer las actividades realizadas en cada etapa de la extracción minera. Según un informe del Banco Central del

Ecuador (2015), la extracción minera se realiza en ocho fases que consisten en: prospección, exploración, explotación, beneficio, fundición, refinación, comercialización y cierre de la mina.

La primera fase de prospección, identifica la existencia de áreas mineralizadas a explotar. Una vez que se ha detectado que la zona contiene minerales, se inicia la segunda fase de exploración, la cual determina mediante perforaciones, muestreos y análisis de contenido el tipo de mineral existente, su cantidad y la magnitud del yacimiento (Chaparro, 2003). Se realiza un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y de factibilidad, donde se logra identificar si la explotación de la mina será viable económicamente, su duración y el diseño de explotación a cielo abierto o subterráneo (Sociedad Nacional de MINERIA Y PETROLEO, 2006).

La tercera es la fase de explotación, considerada la más importante, dado que en ella se muestran los sitios donde se debe extraer el mineral y se realizan trabajos para la preparación y desarrollo del yacimiento, como la remoción de cobertura vegetal, construcción de vías para el ingreso de la maquinaria, perforación, voladura, extracción de los minerales, depósitos de relaves y construcción y operación de escombreras (Banco Central del Ecuador, 2015).

De acuerdo con Chaparro (2003), una vez que se han extraído enormes cantidades de suelo se aplica la fase de beneficio, donde se recuperan los metales mediante procesos físicos, químicos y/o metalúrgicos. Por ejemplo, en la minería de oro a gran escala, por lo general se utiliza el cianuro, el cual ayuda a la separación del metal de otros minerales presentes (Zorrilla, Sacher, Acosta, & Báez, 2011). Para el cobre, se realizan procesos de trituración de la roca, molienda con agua y flotación, donde se separan los metales por diferencia de densidad, siendo algunos precipitados y otros concentrados en la superficie con la ayuda de químicos. El resultado de esta cuarta fase es una pulpa, donde se recoge el metal por un lado y el residuo, conocido como colas o relaves mineros por otro (Sociedad Nacional de MINERIA Y PETROLEO, 2006).

A continuación se llevan a cabo las fases de fundición y refinación, donde se logra fundir los minerales extraídos y eliminar impurezas para su futura comercialización. Una vez que el yacimiento ya no tiene reservas de mineral es necesario cerrar la mina, proceso que debe ser programado desde antes del inicio de la explotación. En el cierre se realiza el retiro de las instalaciones y maquinaria que se usó en el tiempo de vida útil de la mina y se recuperan las zonas afectadas (Ley de Minería, 2011).

De los procesos mineros mencionados, los que más impactos negativos generan a nivel ambiental, se encuentran en las fases de explotación y beneficio. Específicamente, la fase de beneficio provoca la producción de elevadas cantidades de relaves mineros. Por ejemplo, en Perú el complejo minero Antamina, produce 24,78 millones de toneladas (MTon) de relaves mineros al año y cuenta con una presa de relaves reconocida como la más grande del mundo para almacenar 570 MTON durante los 23 años de vida útil que le quedan (Medina & Alarcon, 2010). Incluso, en Chile de acuerdo con el Servicio Nacional de Geología y Minería (2015), actualmente existen 603 presas de relaves de las cuales 216 se encuentran en estado activo, 244 no activas y 143 sin información.

Los relaves mineros se componen de una serie de elementos y compuestos químicos que fueron utilizados durante el desarrollo de las actividades del proceso minero, entre estos son el agua, metales pesados, minerales, ácidos (H_2SO_4), químicos mercurio (Hg), cinc (Zn), cadmio (Cd), arsénico (As), plomo (Pb), cianuro (CN), compuestos de nitrógeno utilizados en las voladuras (dinamita) y floculantes y coagulantes como sales de aluminio y hierro, que al depositarse directamente en el suelo provocan que sus características modifiquen el estado natural del mismo (Mendivinsky-Roa et al., 2015) (Medina & Alarcon, 2010). Esto provoca el aumento de la concentración de metales pesados y metaloides y la disminución del rendimiento agrícola y agropecuario por la persistencia y acción tóxica de estas sustancias (International Institute for Environment and Development MMSD, 2003).

En Ecuador por ejemplo, en los cantones de Zaruma y Portovelo, provincia de El Oro, de acuerdo con estudios realizados por la Fundación Salud Ambiente y Desarrollo (FUNSAD) (2007), en los relaves mineros de estas zonas, existen importantes concentraciones de compuestos inorgánicos como el As (396.0-8800.0 mg/kg), Hg (1.0-35.9 mg/kg), Pb (1796.8-4060.0 mg/kg), Zn (513.0-2670.0 mg/kg) y Cd (27.0-44.1 mg/kg); cantidades que sobrepasan los máximos permisibles señalados en la norma de calidad ambiental del recurso del suelo .

Adicionalmente, se genera contaminación al aire por la erosión del suelo de presas de relaves abandonadas, debido a que se liberan al ambiente partículas sólidas con cientos de metales y esto continua aún varios años después del cierre de la mina (Gundersaen et al.,2001). También puede contaminarse el aire por gases o vapores de CN, Hg y dióxido de azufre (SO₂) contenidos en gases residuales de las piscinas de relaves (Enriquez, 2013).

Pero el recurso más afectado es el hídrico, debido a que en las piscinas de relaves mineros se generan drenajes ácidos a partir de la oxidación de los minerales como la pirita, contaminando no solo ríos y lagos aledaños a la zona por efecto de la escorrentía, sino también las aguas subterráneas (Belmonte-Serrato, Romero-Díaz, & Moreno-Brotóns, 2010). Esta contaminación ha generado la variación de los componentes físico-químicos del agua como el pH, el aumento de las concentraciones de sólidos disueltos y la presencia de metales y cationes, permitiendo que la calidad de la misma no sea apta para el consumo y el riego (Banco Central del Ecuador, 2017).

Por otra parte, la ubicación de los relaves en espacios aledaños a zonas pobladas y la composición tóxica de los mismos, han dado paso a que se deteriore la salud tanto de los trabajadores como de las comunidades cercanas a la mina. Metales como el Hg, provoca alteraciones al sistema neurológico, cognitivo y psicológico, así como también actúa como un agente teratogénico en madres que fueron expuestas al metilmercurio (MeHg) (Español Cano,

2012). En cuanto al cobre (Cu), se ha demostrado que puede causar fibrosis en el hígado, degeneraciones hepáticas y cerebrales por acumulación del mismo (Tchernitchin & Herrera, 2006). El Cd por su lado, produce náuseas, vómitos, dolores abdominales, diarrea y cefalea en el caso de ingestión, y por inhalación puede provocar anemia, albuminuria y hepatitis (García & Cruz, 2012).

Estudios realizados por el FUNSAD (2001), a 200 personas de las comunidades de Portovelo y Zaruma, determinaron la presencia de un 52,4% y un 57,1% respectivamente de intoxicaciones en los pobladores a causa del Hg. Incluso, se confirma que en la misma zona minera, el Hg se bioacumula en peces y provoca alteraciones al sistema nervioso y sistema cardiovascular (López Bravo et al., 2016).

La minería ecuatoriana se clasifica según la tecnología utilizada en sus procesos y el nivel de activos, entre estas son la minería artesanal, pequeña minería y minería industrial (Castillo & Villacrés, 2009). Las cuales, se encuentran reguladas por la Ley de Minería, donde se describen técnicas para la neutralización de los impactos asociados a la misma; con el fin de mitigar, controlar y disminuir efectos adversos que se puedan ocasionar. El Art.44 permite que los residuos minero-metalúrgicos abandonados se puedan fundir, refinar, beneficiar o comercializar (Ley de Minería, 2009). Pero se debe considerar que en el país no existen gestores que traten de manera *ex situ* los desechos que genera la minería, como los relaves mineros, ni tampoco industrias que utilicen este tipo de residuos en su proceso productivo. Una alternativa de tratamiento de los mismos es la técnica de vitrificación, la cual mediante el uso de vidrio de desecho y fundentes adecuados, ayudan a inertizar los relaves mineros.

Actualmente, existen varias opciones para tratar el suelo contaminado con relaves mineros, como la vitrificación *in situ* (Volke Sepúlveda, Velasco Trejo, & A. de la Rosa Pérez, 2005). En ella se implantan electrodos en el suelo cubriendo toda el área que se desea

descontaminar (Conde Arias, 1996). La técnica alcanza los 1600° C a 2000° C y permite la estabilización de la mayoría de contaminantes inorgánicos (como CN, Hg, Pb, Cd, Cr, Ba y As) y destruye los materiales orgánicos mediante pirólisis (Volke Sepúlveda et al., 2005). Para que el tratamiento se realice de manera exitosa, el suelo debe contener una gran cantidad de sílice para permitir la formación de óxidos alcalinos sodio (Na), litio (Li), potasio (K) y una consistencia vítrea (Bernad et al., 2007). Pero, es necesario considerar que la profundidad del lugar no exceda los 9 metros e incluso vigilar que el contenido de limos y arcillas no impida la liberación del agua al calentar el suelo, porque de lo contrario el tratamiento resulta ineficiente e inviable económicamente (Volke Sepúlveda et al., 2005).

Por contraste, en la vitrificación *ex situ*, se eliminan los materiales gruesos presentes en el suelo y se utilizan hornos similares a los utilizados en la fabricación del vidrio alcanzando temperaturas entre 1100° C y 1400° C (Wait & Thomas, 2003). El vidrio es un producto inorgánico fundido que adquiere un estado rígido al momento de enfriarse y cuando alcanza temperaturas elevadas permite que algunos enlaces se rompan y su estructura sea capaz de incorporar metales pesados. La técnica de vitrificación cumple con el objetivo de reducir la posible lixiviación de sustancias tóxicas inertizadas (Elías Castells, 2001). Aun cuando un residuo es tratado por vitrificación, es necesario añadirle aditivos para corregir su formulación, es decir, sustancias vitrificantes y fundentes, para que consiga la textura final más parecida a un vidrio (fase amorfa mayoritaria) o a un vitrocerámico (fases cristalinas mayoritarias) (Elías Castells, 2012).

La presente investigación se realizó con el fin de gestionar los relaves mineros mediante la vitrificación *ex situ* incluyendo el uso de vidrio de desecho molido. Esto, con el objetivo de proveer un uso o aprovechamiento en la construcción, dando, de esta manera, una adecuada gestión al vidrio y los relaves mineros, que al momento no son agenciados en el Ecuador, promoviendo un manejo ambientalmente correcto de este tipo de desechos peligrosos y

especiales. La hipótesis del estudio consiste en comprobar si la vitrificación *ex situ* de relaves mineros permite alcanzar elevados porcentajes de inertización de los metales pesados contenidos en el residuo.

Adicionalmente se desarrolló un procedimiento sencillo de vitrificación *ex situ* a nivel de laboratorio, que permita su aplicación a varios tipos de residuos sólidos cargados de metales pesados, con el fin de alcanzar su correcto aprovechamiento. Para evaluar la eficiencia del proceso de vitrificación, se efectuaron ensayos de lixiviación utilizando el procedimiento de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, Environmental Protection Agency) Método 1311, denominado Procedimiento de Lixiviación Característico de Toxicidad “TCLP” (por sus siglas en inglés, Toxicity Characteristic Leaching Procedure).

Materiales y métodos

2.1 Caracterización de la muestra:

Para la realización de los ensayos de vitrificación, se tomó un kg de muestra de relave minero del año 2014, recogida de la Relavera Comunitaria El Tablón, ubicada en el Mineraducto del Distrito Minero Zaruma-Portovelo. Esta relavera, cuenta con un tiempo de vida útil de siete años a partir del año 2014 y ésta diseñada para recoger residuos mineros de 72 plantas de beneficio de minerales. Por lo tanto, la composición de estos relaves mineros varía de acuerdo a los diferentes procesos de recuperación del mineral y diferente disposición del relave. Los relaves provienen principalmente, de la explotación de plata, oro y cobre de las zonas de explotación de la provincia de El Oro (Bastidas, 2014).

2.2 Selección de materiales para realizar la vitrificación:

Para la selección de materiales se tomaron en cuenta las siguientes características:

2.2.1 Material Base

Se eligió un material base (cerámica) que fuese capaz de resistir altas temperaturas que van desde 800° C hasta 1100° C donde se vitrificó el desecho (relaves mineros, desechos hospitalarios cortopunzantes y metales alternativos). La cerámica utilizada debe secarse en sombra para luego ser horneada con el desecho y los fundentes (no fue necesario hornearla por ocho horas antes de colocar el desecho para que la misma sea resistente).

2.2.2 Fundentes

Se seleccionaron sustancias fundentes como bórax y carbonato de sodio (Na_2CO_3), para determinar mediante ensayos el más apto para vitrificar los relaves mineros, los desechos hospitalarios cortopunzantes y los metales alternativos.

2.3 Preparación de la muestra (relave):

2.3.1 Determinación del contenido de humedad:

Para la realización del proceso de vitrificación fue necesario que la muestra esté seca (relave minero). Por lo tanto se aplicó la técnica de secado según la norma ASTM E145, que consiste en secar el material en la estufa durante un período de 24 horas a 105°C. Se realizó tres veces este procedimiento, para sacar un promedio del porcentaje de humedad.

Para determinar, el porcentaje de humedad, se debe pesar previamente el crisol con el relave antes de ingresar a la estufa y luego tararlo después del proceso de secado. Con los valores obtenidos se procedió a calcular este valor aplicando la siguiente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** tomada de (Gardner et al., 1986):

$$\%H = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100$$

Ecuación 1 Porcentaje de humedad

Mo= masa del crisol con el relave antes de secar

Mf= masa del crisol con el relave después de secar

2.3.2 Tamaño de partícula:

Una vez seca la muestra, se procedió a moler el relave con un mortero para disminuir el tamaño de partícula. Posteriormente, se eliminaron las partículas de mayor tamaño al pasar la muestra por un tamiz de 150 μm .

2.4 Validación del proceso de vitrificación:

Se tomó como referencia los trabajos de Oviedo (2000) y Romero (2010) para el desarrollo metodológico de la fase de inertización a través del método de vitrificación basado en las técnicas de estabilización/solidificación de residuos.

Para la obtención del desecho vitrificado, se realizaron pruebas de ensayo y error utilizando sales metálicas alternativas como sulfato de cobre y desechos hospitalarios cortopunzantes (agujas y bisturíes), esto con el propósito de comprobar la vitrificación en metales.

2.5 Diseño experimental:

2.5.1 Vitrificación de los desechos (relave minero, metales alternativos y cortopunzantes)

Se realizaron 19 ensayos donde se inertizaron los cortopunzantes hospitalarios (agujas y bisturíes) y los metales alternativos como el sulfato de cobre (CuSO_4), latón y óxido de plomo (PbO) con vidrio de desecho, apoyado por fundentes como bórax, y Na_2CO_3 , en la base de cerámica seleccionada. Con la ayuda de una máquina destructora de jeringas (B-D 300C

SYRINGE DESTROYER marca BEST MAN INSTRUMENT) se permitió que las agujas se incineren, mediante un choque eléctrico de baja tensión que derrite el aguja al instante. En los ensayos de vitrificación se trabajó con agujas incineradas y no incineradas.

Los ensayos de vitrificación de prueba y error, se realizaron con la finalidad de obtener los valores de las variables exactas de tiempo, temperatura y cantidades de vidrio, bórax, carbonato de calcio y los metales alternativos, para determinar la vitrificación de los relaves mineros.

Una vez determinadas las variables para vitrificar con metales, se procedió a realizar el ensayo de inertización vitrificando los relaves mineros, con proporciones de 40% de vidrio, 40% de bórax y 20% de relave minero, a una Temperatura de 1100°C y un tiempo de 6 horas. Estas condiciones ideales de vitrificación se determinaron con la muestra # 18 como se puede observar en la .

A partir de las condiciones y proporciones encontradas, se realizaron 17 ensayos donde se mantuvo la cantidad de vidrio y bórax y se aumentó la cantidad de relave minero, partiendo de un 20% hasta un 75% de relave como se puede observar en la . Esto, con objeto de que el vitrificado, tenga la mayor cantidad de relave presente inertizado.

Además, se realizaron pruebas con relave minero sin ser secado ni molido como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 1 Ensayos de vitrificación preliminares

ESPECIFICACIONES				METALES							
# MUESTRA	Tiempo (horas)	Temperatura (°C)	VIDRIO (g)	BÓRAX (g)	Na ₂ CO ₃ (g)	LATÓN (g)	AGUJAS (unidad)	BISTURÍES (unidad)	CuSO ₄ (g)	PbO	RELAVE MINERO (g)
1	14	1100	2	2		3					
2	14	1100					3 agujas incineradas				
3	14	1100		1			1 aguja entera	1			
4	9	1100	1	1			1 aguja incinerada				
5	9	1100	3	1,5							
6	9	1100	2	2						1	
7	9	1100	2	2					1		
8	4	800	1	1			0,25 agujas incineradas				
9	4	800	3	3			3 agujas enteras				
10	8	900	4	4			3 agujas enteras				
11	8	900	3	3					3		
12	8	1100	2	2					1		
13	8	1100	4	4			3 agujas incineradas				
14	8	850	1		4		4 agujas incineradas				
15	8	850	1		4			1			
16	8	850	1		4				1		
17	6	1100	1	1							
18	6	1100	1	1					0,5		
19	6	1100	1	1			1 aguja incinerada				
20	6	1100	3	3							1,5

Tabla 2 Ensayos de vitrificación con diferentes cantidades de relave minero

Muestras	Vidrio	Bórax	Relave Minero
1	40,00%	40%	20%
2	37,50%	37,50%	25%
3	35,30%	35,30%	29,40%
4	33,30%	33,30%	33,30%
5	31,60%	31,60%	36,80%
6	30,00%	30%	40%
7	28,60%	28,60%	42,80%
8	27,30%	27,30%	45,50%
9	26,10%	26,10%	47,80%
10	25,00%	25%	50%

Muestras	Vidrio	Bórax	Relave Minero
11	23,01%	23,01%	53,80%
12	21,43%	21,43%	57,14%
13	20,00%	20,00%	60,00%
14	18,75%	18,75%	62,50%
15	17,65%	17,65%	64,70%
16	16,67%	16,67%	66,67%
17	12,50%	12,50%	75,00%

Tabla 3 Ensayos de Vitrificación de relaves mineros sin secar y moler la muestra

Muestras	Temperatura (°C)	Tiempo (horas)	Vidrio (g)	Bórax (g)	Relave Minero (g)
1	1100	8	33,33%	33,33%	33,33%
2	1100	8	28,60%	28,60%	42,80%
3	1100	8	25,00%	25,00%	50,00%
4	1100	8	22,20%	22,20%	55,60%
5	1100	8	28,56%	28,56%	71,42%

2.5.2 Requisitos de calidad:

Los requisitos de calidad se establecieron para los ensayos vitrificados realizados con distintos porcentajes de relave minero. Los mismos que fueron planteados de acuerdo a requerimientos operativos. Para poder aplicar los requisitos de calidad a los ensayos de vitrificación se dividieron en requisitos cualitativos y cuantitativos. Los requisitos cualitativos fueron aplicados a los 17 ensayos realizados como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Esta tabla consiste en determinar si las muestras cumplen (C) o no cumplen (NC) con los parámetros señalados a continuación.

Tabla 4 Requisitos de Calidad Cualitativos

Requisitos de Calidad Cualitativos				
# Muestra	Relave minero completamente vitrificado	Superficie de vitrificado lisa /no debe presentar grumos	No debe estar resquebrajado/ ni roto en el interior	Color homogéneo
1	C	C	NC	NC
2	C	C	NC	NC
3	C	C	NC	NC
4	C	C	NC	NC
5	C	C	C	NC
6	C	C	C	NC
7	C	NC	C	C
8	C	C	C	NC
9	C	C	NC	C
10	C	C	C	C
11	C	NC	C	NC
12	NC	NC	C	NC
13	C	NC	C	NC
14	NC	NC	C	NC
15	C	NC	C	NC
16	NC	NC	C	NC
17	NC	NC	NC	NC

C. Cumple

NC. No Cumple

Para determinar los requisitos de calidad cuantitativos, se tomó como referencia el producto vitrificado (muestra # 10) de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, debido a que es el único ensayo que cumple con todos los requisitos cualitativos y por otro lado se consideró el costo de análisis de los metales de lixiviación en caso de tomar más de una muestra como apta. El requisito cuantitativo consiste en comprobar si los resultados de la cantidad de metal del ensayo vitrificado cumplen con los parámetros de lixiviación para causas receptores del Acuerdo Ministerial 097 A.

2.5.3 Lixiviación:

Se realizó el ensayo vía lixiviado TCLP (EPA 1311) de la muestra del suelo de relave minero y a su vez del relave inertizado por vitrificación.

Para la selección del líquido extractante, se tomaron 6 g de relave para la determinación del pH y de acuerdo al valor del mismo, se eligió el fluido extractante #1. El cual, contiene NaOH (1N), ácido acético glacial y se afora con agua destilada en un balón de 1 litro. El fluido extractante # 1 se aplicó para la extracción del lixiviado de la muestra del relave sin tratamiento y del relave vitrificado.

El lixiviado de las dos muestras fue llevado a análisis en un laboratorio acreditado, donde la medición de metales se realizó con un equipo de absorción atómica. Los metales que se analizaron fueron: As, Cd, Hg, Pb, Zn, Cu y cianuro presentes en cada muestra respectivamente.

2.5.4 Eficiencia de la técnica de vitrificación

2.5.4.1 Porcentaje de Inertización

Se determinó la eficiencia de la técnica de vitrificación para cada uno de los metales con el cálculo del porcentaje de inertización con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** recuperada de la tesis de Oviedo (2000):

$$\%Inertización = \frac{\text{valor lixiviación sin inertización} - \text{valor lixiviación con inertización}}{\text{valor lixiviación sin inertización}} \times 100$$

2.5.4.2 Indicadores de Calidad ambiental.

Adicionalmente, se utilizaron indicadores de calidad ambiental del lixiviado, basados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** tomada de Coral (2013), en la que expresa la relación entre los valores de los metales obtenidos en el ensayo TCLP y los máximos permisibles establecidos por el Acuerdo Ministerial 097 Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA): Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes al Recurso Agua. Tabla 9. Límites de Descarga a un Cuerpo de Agua Dulce (el resultado es un valor adimensional).

$$\text{Indicador} = \frac{\text{valor metal inertizado en el lixiviado}}{\text{max permisible del metal en cauces receptores}} \leq 1$$

Ecuación 3 Cálculo del Indicador de Calidad del lixiviado

3 Resultados

3.1 Resultado del porcentaje de humedad (%H) de la muestra del relave minero

El porcentaje de humedad corresponde a un 0,25% del promedio obtenido de las tres veces realizadas de este procedimiento como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 5 Porcentaje de humedad de la muestra

# Muestra	Mo	Mf	%H
1	28	27,93	0,25 %
2	29	28,93	0,24%
3	26,75	26,68	0,26%
Promedio			0,25%

3.2 Resultados de ensayos vitrificados de desechos (relaves mineros, metales alternativos y cortopunzantes)

Las condiciones ideales de vitrificación se obtuvieron de los 19 análisis realizados. Donde, en las muestras # 17,18 y 19 de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,**

se definieron las variables ideales de vitrificación siendo la temperatura (1100°C) y el tiempo (6 horas). La muestra # 18, permitió fijar las proporciones de vidrio, bórax y relave (40%/40%/20%) respectivamente, con el uso de CuSO_4 . Adicionalmente se determinó que el Na_2CO_3 , no es apto como fundente debido a que al reaccionar con los metales como agujas o bisturíes, oxida el metal dando un aspecto de quemado a toda la muestra y presentando un color café oscuro como se puede observar en las fotografías de las muestras # 14 y 15 de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Incluso, en el ensayo con el CuSO_4 de la muestra #16 el acabado es opaco, a diferencia de las muestras que utilizan bórax como fundente.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan los resultados de la muestra vitrificada, con el relave minero sin ser secado, molido ni tamizado, es decir con un mayor tamaño de partícula y humedad.

Tabla 6 Resultados de los ensayos de vitrificación con diferentes metales

# MUESTRA	FOTOGRAFÍA	OBSERVACIONES
1		El latón se fundió
2		No hubo modificación con la agujas
3		Las agujas se fragilizaron

# MUESTRA	FOTOGRAFÍA	OBSERVACIONES
4		La aguja se fundió en el vidrio y bórax
5		El vidrio y el bórax se cristalizaron cambiando a un color verde en el centro por el vidrio y por afuera gris
6		El PbO se vitrificó presentando un color tomate en el centro y a los extremos verde por el vidrio
7		Se vitrificó el CuSO_4 con textura uniforme, pero debido al tiempo y temperatura exploto la base de cerámica
8		Las agujas incineradas no se vitrificaron debido a la poca cantidad de fundentes
9		Las agujas se vitrificaron cambiando el color del vidrio y bórax
10		Las agujas se vitrificaron cambiando el color del vidrio y bórax (superficie lisa)

# MUESTRA	FOTOGRAFÍA	OBSERVACIONES
11		El CuSO_4 no se vitrificó falto temperatura
12		Temperatura, tiempo y cantidades (vidrio y bórax) ideales para la vitrificación
13		Las agujas dieron un color verdoso al vitrificado
14		El Na_2CO_3 no sirve como fundente, da un aspecto quemado en donde se encuentran las agujas vitrificadas
15		El Na_2CO_3 no sirve como fundente, quemo el bisturí en lugar de quemarlo
16		El Na_2CO_3 no quemó el CuSO_4 , pero no le da una textura lisa

# MUESTRA	FOTOGRAFÍA	OBSERVACIONES
17		Temperatura, tiempo y cantidades (vidrio y bórax) ideales para la vitrificación pero con menos tiempo
18		Temperatura, tiempo y cantidades (vidrio y bórax) ideales para la vitrificación pero con menos tiempo
19		Temperatura, tiempo y cantidades (vidrio y bórax) ideales para la vitrificación pero con menos tiempo
20		Temperatura, tiempo y cantidades (vidrio, bórax) ideales para la vitrificación del relave minero

Tabla 7 Resultado de los ensayos de vitrificación de relaves mineros sin secar ni moler

Muestras	Fotografía
1	

Muestras	Fotografía
2	
3	
4	
5	

3.3 Resultados de ensayos de vitrificación con diferentes cantidades de relave minero en condiciones ideales

Los ensayos de vitrificación de relaves mineros se iniciaron con las condiciones ideales de tiempo, temperatura y proporciones establecidas de acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** A partir de estas condiciones, se aumentaron las cantidades de relave minero, donde de acuerdo a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el vitrificado ideal y con mayor cantidad de relave (50%) fue la muestra # 10.

Tabla 8 Condiciones ideales de vitrificación

Temperatura	Tiempo	Vidrio	Bórax	Relave
1100°C	6 HORAS	40%	40%	20%

Tabla 9 Resultados de ensayos de vitrificación con diferentes cantidades de relave mineral

Muestras	Fotografía	Muestras	Fotografía
1		9	
2		10	
3		11	
4		12	
5		13	
6		14	

Muestras	Fotografía	Muestras	Fotografía
7		15	
8		16	
		17	

3.4 Resultados obtenidos del ensayo de lixiviación

Los resultados obtenidos de la cantidad de metales presentes corresponden al ensayo vía lixiviado (TCLP) realizados para el relave minero y el vitrificado del relave minero como se puede observar en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 10 Valores medidos de Metales y Cianuro del lixiviado del relave sin inertizar

Valores medidos en mg/L de Metales y Cianuro del lixiviado del relave sin inertizar						
Cd	Cianuro	Zn	Cu	Hg	Pb	As
<0,77	<0,007	7,7	0,88	<0,005	37	0,1627

Tabla 11 Valores de Metales y Cianuro de la muestra del lixiviado del relave inertizado por vitrificación

Valores medidos en mg/L de Metales y Cianuro del lixiviado del relave inertizado por vitrificación						
Cd	Cianuro	Zn	Cu	Hg	Pb	As
<0,77	<0,007	0,21	<0,05	<0,005	<0,90	0,1515

3.5 Resultados de eficiencia de la técnica de vitrificación

3.5.1 Porcentaje de inertización

Se calculó el porcentaje de inertización para los siguientes metales: As, Cd, Zn, Cu, Hg, Pb y CN con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Donde el Zn obtuvo un 97,27% de inertización, mientras que el As un 6,88%, demostrándose que la inertización del As no alcanzó ni el 50% de efectividad. El Pb pasó de contener 37 mg/L del relave minero a <0,9 mg/L del vitrificado y el Cu pasó de contener 0,88 mg/L del relave minero a <0,05 mg/L del vitrificado, por lo que se entiende que los valores casi despreciables obtenidos de la muestra vitrificada indican que el porcentaje de inertización estaría alcanzando cerca del 100% de efectividad. En el caso de Cd, Hg y el Cianuro, se encontraron concentraciones inferiores a 0,77, 0,005 y 0,007 respectivamente, tanto en el lixiviado del relave minero como en el vitrificado, por lo tanto existen concentraciones muy bajas de estos metales y el cianuro, por lo que al inertizar las muestras los valores no varían.

3.5.2 Resultados del indicador de calidad ambiental

Tabla 12 Límites máximos permisibles Acuerdo Ministerial 097 A

Parámetros	Límite Max Permisible (mg/L)
Arsénico	0,1
Cadmio	0,02
Cianuro	0,1
Cinc	5
Cobre	1
Mercurio	0,005
Plomo	0,2

Los resultados obtenidos del indicador medido con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,** que corresponden a los valores de los metales de la muestra del lixiviado del relave vitrificado y los valores de acuerdo a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de los límites de descarga a un cuerpo de agua dulce del Acuerdo Ministerial

097, indican que el Zn tiene un valor de 0,042, el cual se encuentra por debajo de 1. Con respecto al As el valor corresponde a 1,5; sobrepasando el valor fijado por el indicador. Y para el resto de metales y cianuro, el indicador no se aplica debido a que las concentraciones de los mismos en la muestra del lixiviado vitrificado no son detectables dentro del rango de aplicación del laboratorio.

3.6 Requisitos de calidad

Respecto a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** de los requisitos de calidad cualitativos, de los cuatro parámetros fijados la muestra #10 es la única que cumple con todos. Esta muestra, se encuentra vitrificada con condiciones ideales de temperatura 1100°C, 6 horas y cantidades de 25% de vidrio, 25% de bórax y 50 % de relave minero. Esta cantidad es la máxima que se puede agregar con las proporciones establecidas, porque de lo contrario como se pudo observar en la muestra # 17 que contiene un 75% de relave minero, el mismo no se vitrifica en su totalidad. El objetivo de realizar ensayos agregando más cantidad de relave minero, radica en poder trabajar con menor cantidad de fundentes y más cantidad de desecho inertizado por vitrificación, para dar más efectividad al proceso.

En razón de que la muestra # 10 fue la única en cumplir todos los requisitos cualitativos, se procedió a analizar cuantitativamente, mediante el cumplimiento de los parámetros del Acuerdo Ministerial 097. Donde el Cianuro, Zn, Cu y Hg cumplen los límites permisibles, mientras que para As no cumple. Para los valores de Cd y Pb no es posible determinar si cumplen o no debido a que los valores de estos metales respectivamente no son detectables dentro del rango de aplicación del laboratorio en comparación con los valores del Acuerdo Ministerial 097 A.

Tabla 13 Requisitos de Calidad Cuantitativos

Parámetros	Valor Medido	Límite Máx Permisible (mg/L)	Cumple
------------	--------------	------------------------------	--------

Arsénico	0,1515	0,1	NO
Cadmio	<0,77	0,02	NA
Cianuro	<0,007	0,1	SI
Cinc	0,21	5	SI
Cobre	<0,05	1	SI
Mercurio	<0,005	0,005	SI
Plomo	<0,9	0,2	NA

NA. No aplica por límite de detección del Laboratorio.

Discusión

El producto final corresponde a una muestra de relave minero inertizado por vitrificación *ex situ*, que, para su obtención fue sometido a una temperatura de 1100°C, un tiempo de 6 horas y las proporciones adecuadas corresponden a un 25% de vidrio y bórax y un 50% de relave minero.

Por consiguiente, para la preparación de la muestra del relave minero sin inertizar se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que el porcentaje de humedad corresponde a un 0,25% de la muestra utilizada. Este valor se justifica, debido a que la muestra corresponde al año 2014, donde tuvo un periodo de cuatro años para eliminar cierta cantidad de humedad, es decir es una muestra antigua que ya pasó por muchos inviernos y veranos; y al secar la muestra según la norma ASTM E145 se eliminó lo que restaba de humedad presente. Según Kaifer et al. (2004), para la vitrificación *ex situ* el porcentaje de humedad se encuentra en un rango muy amplio, donde se citan casos de hasta 70% aceptable, por lo tanto el valor obtenido se encuentra muy por debajo del porcentaje que se mencionó. Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el relave minero al no ser secado, molido y tamizado no logra mezclarse adecuadamente con los fundentes y por lo tanto su estructura no cumpliría con los requisitos cualitativos establecidos. Tanto los requisitos cualitativos como los requisitos cuantitativos, se fijaron con el fin de, por una parte obtener un resultado que presente características agradables estéticamente como superficie lisa, sin grumos, color homogéneo y que en su interior no se encuentre roto; y por otra parte que el

mismo no tenga la capacidad de que sus componentes migren con facilidad, es decir que se encuentre inertizado.

Por otro lado, se determinó las condiciones ideales para vitrificar los relaves mineros, con ensayos realizados en diferentes metales. Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la muestra # 18 en la vitrificación con el CuSO_4 se obtuvo un color azulado atractivo a la vista, pero cabe recalcar que esta sustancia no es un residuo, sino una sustancia química procesada. Por lo que, al utilizar los relaves mineros el color dependerá de los metales presentes y la reacción que tengan los mismos con el vidrio y bórax. También, es importante considerar que la cantidad del relave que se utilizó en la vitrificación determina el color de la muestra cómo se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra # 20, en comparación con la muestra #10 de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Según Martínez (1996), la incorporación de relaves mineros con la presencia de Zn, hierro (Fe), Cromo (Cr) y Pb en los componentes de fabricación de las cerámicas, permite la obtención de un producto cerámico de colores oscuros, que sustituye el aditivo que es preciso añadir en el proceso industrial por los residuos antes especificados e incluso los metales quedan fijados a la estructura cerámica, que los lixiviados de la muestra presenta valores por debajo de los límites máximo permisibles de la Norma SW 846, 1986-Orden 13/10/89. Por otra parte, en la vitrificación utilizando agujas, si se aplica un diseño con las mismas se podría obtener increíbles resultados de inertización de este tipo de desechos peligrosos como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra # 19, en razón de que este tipo de residuos al ser sometidos a altas temperaturas todo patógeno presente es eliminado.

Además, se comprobó que se pueden utilizar elevadas cantidades de relave minero en las muestras vitrificadas, y obtener altos porcentajes de inertización de metales pesados. La muestra con más cantidad de relave minero fue la que tuvo proporciones de 25% de vidrio, 25%

de bórax y 50% de relave minero, de la cual se determinó la cantidad de los metales pesados presentes mediante el ensayo de lixiviación como podemos ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra #10. De acuerdo a los resultados obtenidos de esta muestra el Zn, Pb, Cu obtuvieron resultados que bordearon el 100% de inertización con excepción del As que solo alcanzó un 6,88%.

En base a la literatura revisada para la elaboración del estudio, se puede citar a Romero (2010), sobre la utilización de relaves mineros como insumo para materiales de construcción para la fabricación de ladrillos y baldosas, Martinez (1996), acerca de la inertización de residuos industriales y urbanos entre desechos mineros y de canteras y Abdrakhimov (1991), que utiliza residuos de cantera para la fabricación de cerámica de construcción. También se encuentran otras aplicaciones de estabilización de residuos, como en el estudio realizado por Oviedo (2000) en el que se inertiza cenizas de incineradora de una empresa petrolera y Navarro (2009), que investiga la vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera. Gracias a estos estudios, podemos decir que la presente tesis es innovadora con respecto a los tratamientos de relaves mineros ya existentes.

En otro orden de ideas, mediante la técnica de vitrificación se logró incluir la mayor cantidad de relave minero, tomando en cuenta requisitos tanto cualitativos como cuantitativos. Con los requisitos cualitativos se puede determinar características estéticas para la aplicación de la técnica de vitrificación en materiales decorativos para la construcción. Y en los requisitos cualitativos, cuatro de los siete metales analizados como son el CN, Zn, Cu, Hg, se encuentran dentro de los límites permisibles por el Acuerdo Ministerial 097, el As no cumple y Cd y Pb se encuentran con valores fuera de los límites de detección, como se pudo observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Por lo tanto es necesario recalcar que para inertizar el As se debe agregar una mayor cantidad de fundentes y vidrio o a su vez utilizar otro tratamiento.

Es por esto que el presente proyecto utilizó estos residuos para aprovecharlos como materia prima en la construcción, considerando que las fábricas que usan residuos como materia prima o producen los mismos, tienen una ventaja económica en comparación con aquellas que usan materias primas vírgenes, debido a que los residuos se pagan mínimas cantidades de donde se recogieron los residuos si el productor decide vender sus residuos o no se pagan y las materias primas hay que comprarlas (Elías Castells, 2012). Con esto, no sólo se estaría evitando la degradación del ambiente al adquirir materia prima nueva, sino que se tratan los desechos que podrían terminar en un relleno sanitario o en el caso de los relaves mineros, migrando al medio ambiente.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación, muestran que con la aplicación de la técnica de vitrificación *ex situ* de relaves mineros, se han alcanzado elevados porcentajes de inertización bordeando el 100% de los metales pesados encontrados en el residuo. Para lo cual es necesario que la mezcla entre los metales, el fundente y el vidrio sea homogénea para que exista una mayor superficie de contacto y el vidrio atrape en su estructura los metales pesados para evitar que lixivien con facilidad y se sigan las condiciones ideales de temperatura y tiempo. Incluso estéticamente adquiere una textura más lisa y compacta.

Por lo anterior, se acepta la hipótesis planteada: la vitrificación *ex situ* de relaves mineros permite alcanzar elevados porcentajes de inertización de los metales pesados contenidos en el residuo.

Respecto de la calidad del relave minero vitrificado, mediante pruebas realizadas a partir del ensayo de TCLP como la determinación del porcentaje de inertización, los indicadores y requisitos de calidad se estableció que el producto final, que es el vitrificado obtenido a partir de relaves mineros, no inertiza completamente el As, pero si lo hace con los demás metales. Por

lo que, se deberían realizar más ensayos con varias muestras de relaves mineros de diferentes lugares y de esta manera determinar que metales se inertizan con mayor facilidad en comparación a otros. Por consiguiente, para que la eficiencia de la técnica de inertización mediante vitrificación *ex situ* alcance valores más altos sobre todo con el As, se debería realizar más ensayos aumentando la cantidad de fundentes y vidrio, para determinar si disminuye la lixiviación de este contaminante o a su vez utilizar otro tratamiento.

Los resultados del porcentaje de inertización del Zn, Pb y Cu, se encuentran bordeando el 100%, por lo que se comprueba la eficiencia de la técnica de vitrificación. Del resto de metales, como el Cd, Hg y Cianuro no fue posible determinar la eficiencia de inertización, puesto que las cantidades presentes tanto en la muestra inicial sin inertización como en el vitrificado fueron muy escasas.

La técnica de vitrificación *ex situ* trabaja con elevados porcentajes de humedad como se mencionó hasta un 70%, pero en vista de que la presente investigación se encuentra orientada a la aplicación de esta técnica como material decorativo de construcción, los ensayos realizados sin secar ni moler la muestra presentaron grumos en la textura superficial, aun después de haber añadido más cantidad de los materiales fundentes.

El color de la muestra vitrificada dependerá de los metales pesados y las sustancias químicas presentes en el relave minero debido a que de acuerdo con los ensayos realizados con diferentes metales alternativos el color de la muestra variaba.

Referencias

- Abdrakhimov, V. . (1991). Composición de fase de los títulos de carreras basadas en chatarra de producción, (9), 21–22.
- Banco Central del Ecuador. (2015). La Minería Ecuatoriana. *Cartilla Informativa*, 1, 1–4.
Retrieved from
<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/cartilla00.pdf>
- Banco Central del Ecuador. (2017). Reporte de Minería. *Dirección Nacional de Síntesis Macroeconómica*.
- Bastidas, D. (2014). ESIA DEL MINERADUCTO DEL DISTRITO MINERO ZARUMA-PORTOVELO. *APROPLASMIN*.
- Belmonte-Serrato, F., Romero-Díaz, A., & Moreno-Brotóns, J. (2010). Contaminación ambiental por estériles mineros en un espacio turístico en desarrollo, la sierra minera de Cartagena-la Unión (sureste de España). *Cuadernos de Turismo*, 25, 11–24.
<https://doi.org/1139-7861>
- Bernad, Irene Ortiz ; García, Juana ; Valiño, Miriam, Fernández, S. (2007). Técnicas de

recuperación de suelos contaminados.

Castillo, S., & Villacrés, N. (2009). Fiebre Extractiva Minando la Salud de los Pueblos.

Asociación de Comités Populares de Salud de Sucumbios ACOPSAS, 1–38.

Chaparro, E., & Ortiz, G. (2003). Guía para la Gestión de las Autoridades Locales de Pueblos y Distritos Mineros de América Latina y el Caribe, 136. Retrieved from

[http://www.cepal.org/cgi-](http://www.cepal.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/6/13966/P13966.xml&xsl=/drni/tpl/p9f.xsl&base=/drni/tpl/top-bottom.xslt)

[bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/6/13966/P13966.xml&xsl=/drni/tpl/p9f.xsl&ba](http://www.cepal.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/6/13966/P13966.xml&xsl=/drni/tpl/p9f.xsl&base=/drni/tpl/top-bottom.xslt)
[se=/drni/tpl/top-bottom.xslt](http://www.cepal.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/6/13966/P13966.xml&xsl=/drni/tpl/p9f.xsl&base=/drni/tpl/top-bottom.xslt)

Conde Arias, G. (1996). Tratamiento de Suelos Contaminados. In *Suelos Contaminados*

(TIASA GRÁF, pp. 33, 34). Madrid: INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA.

Coral, K. (2013). *Control de la contaminación de aguas residuales* (Universida).

Dammert, A., & Molinelli, F. (2007). Panorama de la Minería en el Perú. *Osinerghmin*, 13.

Elías Castells, X. (2001). Tratamiento Avanzado de Residuos Hospitalarios. In *Tratamiento de Residuos Hospitalarios* (p. 50). Medellín: CNPMLTA.

Elías Castells, X. (2012). *Residuos Vitrificables* (Díaz de Sa). Madrid.

Enriquez, E. (2013). Manual de Minería. *Estudios Mineros Del Perú*, 290.

Español Cano, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica. Revista Del Instituto Nacional de Salud*, 32.

<https://doi.org/https://doi.org/10.7705/biomedica.v32i3.1437>

Friess, S., & Brotz, H. (2011). La Minería en los Países en Desarrollo - Desafíos y Propuestas de Acción., 42.

- Fundación Salud Ambiente y Desarrollo (FUNSAD). (2001). La pequeña minería del oro: Impactos en el ambiente y la salud humana en la Cuenca del Río Puyango, Sur del Ecuador, *Quito*.
- Fundación Salud Ambiente y Desarrollo (FUNSAD). (2007). Impactos en el ambiente y la salud por la minería del oro a pequeña escala en el Ecuador (segunda fase). *Fundación Salud Ambiente y Desarrollo*, (Informe Técnico Final), 90.
- García, P. E. P., & Cruz, M. I. A. (2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, 17(3), 199–205.
- Gardner, W. H., Klute, A., Campbell, G. S., R.D., J., Mortland, M. M., & Nielsen, D. R. (eds). (1986). Contenido de Humedad. *Metodos de Análisis Del Suelo*, 493–544.
- Gundersen, P., Olsvik, P. A., & Steinnes, E. (2001). Variaciones en la concentración de metales pesados en dos arroyos contaminados por la minería en el centro de Noruega. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 978–984.
- International Institute for Environment and Development MMSD. (2003). Minería , Minerales y Medio Ambiente. *Mineria, Minerales y Medio Ambiente*, 322, 323,324,325,326.
Retrieved from <http://pubs.iied.org/pdfs/G00684.pdf>
- Jennings, N. (2001). Minas y canteras. *Enciclopedia de Seguridad y Salud En El Trabajo*, 3, 35–40. Retrieved from <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/74.pdf>
- Kaifer, M. J., Aguilar, A., Arana, E., Balseiro, C., Torá, I., Caleyá, J. M., & Pijls, C. (2004). GUÍA DE TECNOLOGÍAS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS. In *Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio*.

(pp. 91–97). Retrieved from

[http://www.madrid.org/cs/BlobServer?blobkey=id&blobwhere=1196191019103&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-
Disposition&blobheadervalue1=filename%3DCapitulo+8.pdf&blobcol=urldata&blobtable=MungoBlobs](http://www.madrid.org/cs/BlobServer?blobkey=id&blobwhere=1196191019103&blobheader=application%2Fpdf&blobheadername1=Content-Disposition&blobheadervalue1=filename%3DCapitulo+8.pdf&blobcol=urldata&blobtable=MungoBlobs)

Ley de Minería. (2009). Ley de Minería. 2009, *Asamblea N*, 36.

https://doi.org/10.1300/J091v17n04_01

Ley de Minería. (2011). Ley De Minería, 1–47. Retrieved from

http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_ecu_mineria.pdf

López Bravo, Marcelo; Santos Luna, Jovanny; Quezada Abad, C., & Segura Osorio, Marisela;

Pérez Rodríguez, J. (2016). Actividad minera y su impacto en la salud humana The mining and its impact on human health. *Ciencia UNEMI*, 9(17), 92–100. Retrieved from https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiXidGNpI3OAhVKFR4KHJJsCZIQFggaMAA&url=http://ojs.unemi.edu.ec/index.php/cienciaunemi/article/download/255/238&usg=AFQjCNEYx0FcLBPfczYa-5O3o0ENN-t6_A&sig2=OWb-06qX

Martínez, S. (1996). Reciclaje y tratamiento de residuos, 30(1995), 63–72.

Medina, E., & Alarcon, F. (2010). Impacto De Los Relaves Mineros En El Perú.

Investigación Del Departamento de Investigación y Documentación Parlamentaria, 17.

Retrieved from

[http://www2.congreso.gob.pe/Sicr/dgp/ciae.nsf/vf07web/BA9A77F64A43DBDC0525780E0070D202/\\$FILE/IT021_04011111.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/Sicr/dgp/ciae.nsf/vf07web/BA9A77F64A43DBDC0525780E0070D202/$FILE/IT021_04011111.pdf)

Mendivinsky-Roa, G; Caroca, V; Vallejo, J. (2015). Informe sobre la situación de los Relaves

Mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el

Comité de Derechos Económicos , Sociales y Culturales , perteneciente al consejo
Económico Social de la Naciones Unidas . Fundac.

Moran, R. (2013). Preguntas y Respuestas sobre Minería, 18. Retrieved from
http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2013/cambio_climatico/Informe-Moran-mineria.pdf

Navarro, A. (2009). *Vitrificación solar de lodos flotación de la zona minera de Sierra
Almagrera (Almería)*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Oviedo Costales, J. E. (2000). *Inertización de cenizas de un incinerador de residuos de una
Empresa Petrolera*. Universidad Internacional Sek.

Romero, A., & Flores, S. (2010). Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración
de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. *Revista de La Facultad
de Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú*, 13(1), 75–
82.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2015). *Catastro Nacional de Depósitos de Relave*.
Chile. Retrieved from <http://ignacioacosta.com/wp-content/uploads/2017/04/Catastro-relaves-chile-2015.pdf>

Sociedad Nacional de MINERIA Y PETROLEO. (2006). El ciclo productivo de la minería.
Informe Quincenal de La Snmpe, 1–3.

Tchernitchin, A. N., & Herrera, L. (2006). Relaves mineros y sus efectos en la salud, medio
ambiente y desarrollo económico. *Cuad. Méd Soc*, (Ejemplo de reave en el valle de
Chacabuco-Polpaico), 22–43.

Volke Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J., & A. de la Rosa Pérez, D. (2005). *Suelos
contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*

(Secretaría). México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

- Wait, S. ., & Thomas, D. (2003). La caracterización del aceite base recuperado de la desorción térmica a baja temperatura de los recortes de perforación. In *SPE/EPA Exploration and Production Environmental Conference, March 10-1* (pp. 151–158).
- Zorrilla, C., Sacher, W., Acosta, A., & Báez, M. (2011). 21 preguntas para entender la Minería del Siglo 21, 1–18.