

EVALUACIÓN DEL USO Y APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS  
GENERADOS EN LA INDUSTRIA DE LA ROCA FOSFÓRICA EN BOYACÁ.

ELISA MARÍA AVELLANEDA DÍAZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS – SECCIONAL TUNJA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN MANEJO Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL  
TUNJA  
2025

EVALUACIÓN DEL USO Y APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS  
GENERADOS EN LA INDUSTRIA DE LA ROCA FOSFÓRICA EN BOYACÁ.

ELISA MARÍA AVELLANEDA DÍAZ  
Ingeniera Civil e Ingeniera Ambiental

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Manejo y Sostenibilidad  
Ambiental.

Directora:  
Ing. Sandra Consuelo Diaz Bello.  
PhD. Ingeniería de los Materiales.

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS – SECCIONAL TUNJA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
MAESTRÍA EN MANEJO Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL  
TUNJA  
2025

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Tunja (20,02,2025)

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a Dios, porque él ha sido quien ha guiado mi vida. De manera especial a mis papas Julio y Yanira, quienes son el motor que impulsa mi andar en este camino, por su amor incondicional, sus sacrificios, sus consejos y la formación que me brindaron, agradeciendo siempre la confianza que han depositado en mí y el haberme motivado a lo largo de mi vida a confiar en mis capacidades y abrir mis alas en búsqueda de mis anhelos.

No podría faltar mi abuela Leo quien en vida me acompañó e inspiró para día a día luchar por mis sueños y demostrarme que tengo mucho por aportar al mundo, por hacerme entender que ni siquiera el cielo es el límite y que la vida se afronta con templanza, veracidad, resiliencia y poniéndole amor a cada labor. A su vez a aquellos que hoy no están junto a mí, pero que han sido ángeles en mi camino.

A mi hermana, mis sobrinos y todos aquellos familiares que me han animado a seguir creciendo en mi formación profesional; a mis amigos y amigas quienes con sus palabras me motivan a mejorar cada día. A mi pareja que ha estado junto a mí en este proceso brindándome fuerzas para seguir y no desfallecer, sujetándome siempre de su mano. Finalmente, y no menos importantes a mis docentes, compañeros y estudiantes aquellos que han contribuido en mi formación tanto personal como profesional.

Psda: A mi amiga de cuatro patas quien alegra mis días "Alahia".

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas aquellas personas que han contribuido con sus conocimientos para llevar a término este trabajo de grado. De manera especial a mi directora, amiga y compañera la Ing. Sandra Consuelo Díaz Bello, mi admiración y respeto por sus conocimientos, por la labor que realiza día a día por la investigación y por la calidad humana que brinda. A la empresa Fosfatos de Boyacá SA por permitirme desarrollar mi trabajo de grado en aplicación a su industria. A la Universidad Santo Tomas seccional Tunja por la formación en la Maestría en Manejo y Sostenibilidad Ambiental. A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia junto con la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, por la infraestructura y equipos de laboratorio que han permitido el análisis de las muestras para el desarrollo del presente trabajo de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	14
Objetivo general.....	14
Objetivos específicos.....	14
ESTADO DEL ARTE.....	15
MARCO TEÓRICO.....	21
METODOLOGÍA.....	25
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	31
Caracterización de roca fosfórica.....	31
Caracterización de líquidos.....	33
Caracterización de lodos.....	35
USOS Y APLICACIONES.....	45
METODOLOGÍA DE APROVECHAMIENTO.....	49
Aplicación de la metodología de aprovechamiento.....	53
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO.....	58
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
ANEXOS.....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición elemental de la roca fosfórica.....	32
Tabla 2. Elementos presentes en muestra de roca fosfórica. ....	33
Tabla 3. Resultados cuantificación de fósforo producto de acidulación (85%). ....	34
Tabla 4. Resultados cuantificación de fósforo producto de acidulación (30%). ....	34
Tabla 5. Muestras de lodo. ....	35
Tabla 6. Material seco en horno - mufla a 100 °C.....	36
Tabla 7. Composición elemental de muestra ingreso ducto de ventilación.....	38
Tabla 8. Composición elemental de muestra salida ducto de ventilación. ....	39
Tabla 9. Análisis químico elemental con EDS muestra ingreso ducto de ventilación punto 1.....	40
Tabla 10. Análisis químico elemental con EDS muestra ingreso ducto de ventilación punto 2.....	41
Tabla 11. Análisis químico elemental con EDS muestra salida ducto de ventilación punto 1.....	42
Tabla 12. Análisis químico elemental con EDS muestra salida ducto de ventilación punto 2.....	43

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso industrial de la explotación y transformación de la roca fosfórica en Boyacá.....	23
Figura 2. Proceso de control ambiental. ....	24
Figura 3. Puntos de toma de muestras sistema "Control ambiental". ....	26
Figura 4. Equipo de FRX portátil S TITAN 500 marca BRUKER. ....	26
Figura 5. Equipo difracción de rayos X (DRX). ....	27
Figura 6. Equipo microscopia electrónica de barrido. ....	27
Figura 7. Equipo espectroscopía de Raman. ....	28
Figura 8. Equipo potencial Z. ....	29
Figura 9. Metodología para cumplir el objetivo de la investigación. ....	30
Figura 10. Espectros de difracción de rayos X para la muestra de RF. ....	31
Figura 11. Espectros Raman para las muestras de roca fosfórica.....	32
Figura 12. Morfología para muestra de roca fosfórica técnica SEM. ....	33
Figura 13. Análisis químico mediante técnica EDS para muestra de RF. ....	33
Figura 14. Espectros de difracción de rayos X para la muestra ingreso ducto de ventilación.....	37
Figura 15. Espectros de difracción de rayos X para la muestra salida ducto de ventilación.....	37
Figura 16. Análisis FRX para material seco. ....	38
Figura 17. Análisis SEM y EDS para material seco. ....	39
Figura 18. Estructura muestra de lodo seco – ingreso ducto de ventilación por microscopia electrónica de barrido a) 200X, b) 500X. ....	40
Figura 19. Análisis químico a través de EDS para muestra ingreso ducto de ventilación punto 1. ....	40
Figura 20. Análisis químico a través de EDS para muestra ingreso ducto de ventilación punto 2. ....	41
Figura 21. Estructura muestra de lodo seco – salida ducto de ventilación por microscopia electrónica de barrido a) 200X, b) 500X. ....	42

Figura 22. Análisis químico a través de EDS para muestra salida ducto de ventilación punto 1.....	42
Figura 23. Análisis químico a través de EDS para muestra salida ducto de ventilación punto 2.....	43
Figura 24. Grafica potencial Z - muestra ingreso ducto de ventilación. ....	44
Figura 25. Grafica potencial Z - muestra salida ducto de ventilación.....	44
Figura 26. Metodología de aprovechamiento de los lodos.....	51
Figura 27. Estructura de pavimento flexible.....	52

### **LISTA DE ANEXOS**

Anexo 1. Certificado de participación - 4to. Congreso Internacional de Ingeniería de Minerales. ....	72
Anexo 2. Certificado de participación - 3er. Congreso Internacional Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	73

## RESUMEN

La industria de la roca fosfórica en Boyacá enfrenta grandes desafíos relacionados con la operación del sistema industrial debido a la expansión de la línea de producción y las situaciones que se presentan en el sistema de control ambiental. La investigación se centra en la posibilidad de aprovechar los lodos formados en el ducto de ingreso al sistema de control ambiental bajo los lineamientos de economía circular. Se empleó una metodología mixta con enfoque teórico – práctico donde a partir de información bibliográfica y análisis de tipo experimental se cumplió el objetivo general. Los resultados mostraron que los lodos tienen una composición de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), compuesto que es altamente aprovechable. En referencia al estado del arte se estableció que su aplicación es adecuada principalmente en sustituciones parciales de materiales para la construcción, especialmente en el área de pavimentos flexibles para construcción de carreteras con uso en la subbase granular, ya que presenta un comportamiento adecuado en cuanto a las propiedades físico – mecánicas. Se desarrolló una metodología mediante una ruta que permite el aprovechamiento de los lodos, esto no solo aporta a la reutilización como insumo, sino que fomenta la sostenibilidad desde la visión social, económica y ambiental.

**Palabras clave:** aprovechamiento, fertilizante, lodo, roca fosfórica, sílice.

## ABSTRACT

The phosphate rock industry in Boyacá faces great challenges related to the operation of the industrial system due to the expansion of the production line and the situations that arise in the environmental control system. The research is focused on the possibility of taking advantage of the sludge formed in the entry duct to the environmental control system under the guidelines of circular economy. A mixed methodology with a theoretical-practical approach was used, where the general objective was achieved based on bibliographic information and experimental analysis. The results showed that the sludge has a silica composition ( $\text{SiO}_2$ ), a compound that is highly usable. In reference to the state of the art, it was established that its application is suitable mainly in partial substitutions of construction materials, especially in the area of flexible pavements for road construction with use in the granular subbase, since it presents an adequate behavior in terms of physical-mechanical properties. A methodology was developed by means of a route that allows the use of sludge, which not only contributes to reuse as an input, but also promotes sustainability from a social, economic and environmental point of view.

**Keywords:** utilization, fertilizer, sludge, phosphate rock, silica.

## INTRODUCCIÓN

La empresa FOSFATOS DE BOYACÁ S.A. se localiza en el municipio de Pesca, zona que se destaca por la presencia del mineral de roca fosfórica. La empresa es un referente en la exploración, explotación, transformación y comercialización de este mineral, que es la materia prima para la elaboración de fertilizantes; la organización cuenta con una experiencia de más de 40 años en el mercado con presencia nacional e internacional (David & Caro, 2021). Esta industria juega un rol crucial en la elaboración de fertilizantes ya que optimizan la fisiología de la planta a través de la mejora de los procesos de floración y fructificación (Espinel Pérez et al., 2022). El incremento en la demanda de estos productos por parte del sector agrícola ha llevado a la empresa a expandir su capacidad de elaboración, generando retos considerables en cuanto a la operación de la línea de producción y la incorporación de tecnologías como la fase de "control ambiental" que tiene como finalidad minimizar los efectos vinculados a la extracción y transformación del mineral.

Uno de los problemas más importantes que se han detectado en la empresa es la falta de claridad respecto a la eficiencia del proceso de producción, en particular en la fase de "control ambiental". Esta área comprende un tren que parte de una campana extractora y está conformado por un tubo Venturi, dos torres de separación y una chimenea que produce residuos en forma de gas, lodos y líquidos. Aunque el gas se expulsa mediante la chimenea, los lodos (se forman entre la campana extractora y el tubo Venturi) y líquidos (se forman luego del tubo Venturi y en las demás partes del tren) se neutralizan y luego se reincorporan al ciclo. El interés de la empresa se centra en conocer la composición de los lodos ya que se ha observado un problema operativo significativo pues el desgaste acelerado en las estructuras es notorio por la presencia de "corrosión". Se debe reconocer que, si los desechos entran en contacto con el suelo o el agua, pueden convertirse en una amenaza. Por lo tanto, se ve la necesidad de implementar estrategias de manejo y aprovechamiento sostenible (Valdés López et al., 2019).

Este proyecto no solo enfrenta un reto para la industria de la roca fosfórica en Boyacá, sino que también investiga soluciones que combinan innovación tecnológica, sostenibilidad ambiental y crecimiento económico, evidenciando que la correcta gestión de los residuos industriales puede convertirse en un instrumento significativo para la preservación de los recursos naturales y el bienestar social a largo plazo. Esta problemática transversal, que incluye tanto aspectos operativos como ambientales, ofrece la posibilidad de convertir los desechos en materia prima o recurso reduciendo su efecto adverso. Solución que se alinea con los principios del desarrollo sostenible, a nivel internacional con los objetivos del Millennium Project y el ODS 12, mientras que a nivel nacional con las metas del Plan Nacional de Desarrollo. De esta manera, este estudio se centra en analizar las posibilidades de utilización y aprovechamiento de los lodos producidos en la industria de la roca fosfórica, con el fin de contribuir a la conservación de los ecosistemas y promover el desarrollo sostenible. Se puede concluir que las aplicaciones y posibilidad de aprovechamiento de los lodos generados en la industria de explotación y transformación de Pesca se relacionan con el uso en materiales de construcción.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar el uso y el aprovechamiento de los lodos generados en la industria de la roca fosfórica en Boyacá.

### **Objetivos específicos**

- Identificar las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas de los lodos generados en la industria de la roca fosfórica en Boyacá.
- Determinar los posibles usos y aplicaciones de los lodos generados en la industria de la roca fosfórica en Boyacá.
- Formular un método para el aprovechamiento de los lodos generados en la industria de la roca fosfórica en Boyacá.

## ESTADO DEL ARTE

Los fertilizantes son importantes en el desarrollo de la actividad agrícola, ya que estos brindan nutrientes esenciales que permiten mejorar la productividad de los cultivos. Dichos insumos contienen elementos como potasio (K), nitrógeno (N) y fósforo (P), y algunos micronutrientes que fomentan el desarrollo de la estructura vegetal de la planta y optimizan procesos como los metabólicos, la síntesis de proteínas y la fotosíntesis (FAO, 2019). Actualmente su uso es necesario para poder satisfacer la demanda alimentaria de una población que día a día está en aumento. Los nutrientes como (KNP) combaten los factores que pueden generar deficiencias y limitación en el rendimiento de los cultivos, permitiendo incluso duplicar el rendimiento en comparación con aquellos cultivos que no están fertilizados (ANFFE, 2008).

Es importante reconocer que los fertilizantes no solo mejoran la cantidad de los productos, sino que también mejoran la calidad nutricional, y esta es una característica indispensable para mantener la seguridad alimentaria al hablar de un enfoque nutritivo y adecuado para la población (Zschimmer & Schwarz, 2021). Ahora bien, se debe tener en cuenta que el uso adecuado de los fertilizantes permite hablar de la sostenibilidad agrícola, ya que se maximiza la producción sin necesidad de expandirse en territorio. Teniendo en cuenta que hay muchas zonas donde las áreas arables son limitadas en espacio y por algunas condiciones como topografía y pendiente, por tanto, se habla de un equilibrio adecuado entre conservación y producción (FAO & IFA, 2002).

Por otra parte, se debe tener en cuenta que el uso excesivo de los fertilizantes fosfatados genera retos económicos y ambientales, ya que la extracción y transformación de la roca fosfórica base del fósforo resulta ser un recurso finito que se ve amenazado por el agotamiento de los mantos (Van Vuuren et al., 2010). A su vez, la adición ineficiente de los productos fosfatados puede resultar en la acumulación de este elemento en el suelo, excediendo la capacidad de asimilación de la planta y generando la contaminación de cuerpos de agua por arrastre en la

escorrentía, causando afectaciones como la eutrofización que es el crecimiento descontrolado de algas produciendo disminución de oxígeno disuelto y por tanto alterando el ecosistema y afectando la diversidad acuática (Schindler et al., 2016).

A la vez, se debe reconocer que la roca fosfórica es de tipología sedimentaria y contiene minerales de fosfato que se deben procesar para generar superfosfato triple (TSP) y fosfato diamónico (DAP) que son fertilizantes solubles. Mundialmente la roca fosfórica ha alcanzado una producción aproximada de 220 millones de toneladas anuales (Guevara, 2024). Lo que permite ver que esta materia prima es indispensable en la producción de fertilizantes pero que también es utilizada como suplemento alimenticio. Este sector está empezando a enfrentar retos, ya que las reservas de roca fosfórica son limitadas y con depósitos en pocos países, lo que ha generado preocupación por la disponibilidad futura y la relación que esto tendría con la seguridad alimentaria (Scholz, Amit, et al., 2014). En la actualidad, Colombia genera una alta demanda de fertilizantes fosfatados pero pocas empresas están en el sector debido a la baja disponibilidad del recurso, se está explotando el material en los departamentos de Huila, Norte de Santander y Boyacá (Palencia Angelica & Granados German, 2019). Ya que se localizan sobre las formaciones arenosas del cretáceo superior de la cordillera oriental donde se presentan los yacimientos, las empresas productoras emplean elementos como (KNP) enriquecidos (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2005).

La producción de fertilizantes a base de roca fosfórica necesita la aplicación de tratamientos químicos que permiten solubilizar el mineral para hacerlo asimilable para la planta. Cuando se transforma el fósforo en fertilizante se brinda a la planta una liberación controlada de nutrientes, los necesarios para cada una de las etapas de crecimiento (Market Research Intellect, 2024). De manera particular el fósforo (P) es un elemento clave que permite el desarrollo de raíces robustas y por tanto una fructificación óptima, dando como resultado la reducción a la recarga de las áreas agrícolas (Bouwman et al., 2013). Los fertilizantes fosfatados como el fosfato diamónico (DAP) contienen nutrientes esenciales como el pentóxido de fósforo

( $P_2O_5$ ) en un 46% y nitrógeno (N) en un 18% quienes promueven el crecimiento vegetativo de la planta (EuroChem Group, 2024). El fósforo (P) juega un papel importante ya que contribuye al crecimiento radicular de la planta, generando una eficiencia en el uso de agua y mejora la respuesta de la planta al estrés abiótico (Cordell et al., 2009). Se debe reconocer la limitación de la disponibilidad del fósforo en estado natural ya que este elemento tiende a formar compuestos insolubles por lo que la adición de fertilizantes fosfatados es indispensable para satisfacer la demanda agrícola (Elser & Bennett, 2011).

En la producción de fertilizantes fosfatados es indispensable someter el elemento a una reacción química empleando ácido, lo que permite mejorar la solubilidad y de esta forma una mejor absorción por la planta (Heffer & Prud'homme, 2010). Es importante reconocer la agresividad que tiene el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) con los metales ya que puede provocar picaduras, corrosión uniforme o cristalina en los metales (Zholud et al., 2012). Estos procesos de transformación industrial generan algunos subproductos como gases, lodos y líquidos, que pueden generar riesgos ambientales si no tienen su adecuado manejo y disposición.

A su vez, se puede comprender que el aumento en la producción de fertilizantes en búsqueda de la satisfacer la demanda puede conllevar a problemas como la contaminación por residuos y la emisión de gases tipo efecto invernadero (Cordell et al., 2009). Es importante que el ácido empleado tenga una alta pureza y que la roca fosfórica sea de un grado bueno ya que los carbonatos consumen ácido sulfúrico generando espuma. En el proceso de acidulación se reconoce que se llevan a cabo reacciones secundarias como la producción de ácido fosfórico, usualmente tienen un contenido de 31 a 35% de  $P_2O_5$ ; de 1,5 a 4% de  $Al_2O_3 + Fe_2O_3$  y de 2 a 10% de  $SiO_2$ , por tanto, el Fe y Al forman fosfatos solubles en ácido fosfórico y reducen la concentración del ácido por lo que aparecen lodos pesados cuando el ácido se concentra (Soto, 2000).

Los subproductos generados en la industria de transformación de la roca fosfórica han sido considerados como desechos, pero poco a poco han ido ganando

reconocimiento como recursos por el contenido que tienen. Se destacan los lodos que son una mezcla entre sólido y agua en conjunto con algunos componentes minerales resultado de las fases de procesamiento de la roca fosfórica (UBCO, 2023). Si bien es cierto que la mala disposición genera problemas ambientales dados por la contaminación del suelo y el agua, su composición abre la posibilidad de aprovecharlos en diferentes aplicaciones mejorando la sostenibilidad industrial bajo el concepto de economía circular por el reciclaje de nutrientes (Withers et al., 2014).

En Benguerir (Marruecos) se han caracterizado los desechos de minas de fosfatos y se ha establecido una composición diversa pero valiosa para la reutilización, la caracterización química se llevó a cabo por el método de fluorescencia de rayos X. El análisis mineralógico se desarrolló mediante el método de difracción de rayos X, donde se identificó presencia de Oxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y Oxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). En cuanto a los usos potenciales se pudo establecer que son aptos como agregados de subbase en los pavimentos, agregados alternativos para concreto y agregados ligeros en la producción de concreto ligero (Safhi et al., 2022a). En el norte de Perú están los yacimientos de fosfato que se consideran de los más grandes del pacífico, se ha identificado que esta roca tiene contenido de fluor-hydroxiapatita y resalta la presencia de Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) (Alegre JC & Chumbimune R, 1991).

En el golfo de Gabes – sureste de Túnez se emplearon técnicas como la espectroscopia fotoeléctrica de rayos X, espectroscopia de Raman y microscopia electrónica de barrido para analizar la forma y presencia de flúor y fósforo en el residuo ácido de roca fosfórica. Se identificó que el flúor (F) y Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), a su vez que hay una cantidad de material insoluble en la acidulación que es rico en silicio (Si) y en conjunto con el flúor (F) y el fósforo (P) tienen potenciales para usos secundarios (El Zrelli et al., 2018). El análisis de la composición química de roca fosfórica de Tolima (Colombia) ha destacado los siguientes resultados, primero 3.9% de fluor (F), 42.3% de Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y 42.3% de Oxido

de calcio (CaO), segundo, 6.8% de cloro (Cl), 41% de Pentóxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y 53.8% de Oxido de calcio (CaO) (Bustamante-Rúa et al., 2019).

Se ha podido identificar que la composición de los lodos que se generan en el proceso de transformación de la roca fosfórica en el área de “control ambiental” (entre la campana extractora y el tubo Venturi) es compleja y que depende de los insumos agregados a lo largo del proceso industrial. Estos residuos contienen calcio (Ca), compuestos de silicio y oxígeno, es posible que se encuentren elementos menores en concentraciones bajas, pero aun así pueden influir en la posibilidad de reuso y el tratamiento previo que debe ejecutarse (Scholz, Roy, et al., 2014). La composición mineralógica puede variar por el tipo de ácido empleado ya que esto influye en la estabilidad y aplicabilidad. Se ha podido identificar que cuando se lleva a cabo la acidulación se forman algunos compuestos como el tetrafluoruro de silicio (SiF<sub>4</sub>), el fluoruro de hidrógeno (HF) y el óxido silícico (SiO<sub>2</sub>), los anteriores compuestos provocan daños ambientales al suelo, el agua y la atmosfera, además de material particulado por la combustión que se ejecuta en el proceso (Chen et al., 2023).

En cuanto al tratamiento alternativo de los lodos fosfatados, se encontraron varias aplicaciones, en Marruecos se emplearon bacterias solubilizadoras de fosfato (PSB) con características compatibles entre sí. Se pudo establecer que producen cianuro de hidrogeno (CHN), ácido indol acético (C<sub>10</sub>H<sub>9</sub>NO<sub>2</sub>), sideróforos, sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), emplear estos lodos solubilizados aumentaron la biomasa de la raíz y la altura de la planta (Benbrik et al., 2020). Por su parte en algunos residuos de Jordania y Marruecos se aplicó la lixiviación del flúor contenido en la roca fosfórica usando ácido cítrico para extraer el fluoruro y resultó ser un método eficiente ya que evita la separación por otros métodos (Al-Othman & Sweileh, 2000). Otra opción que ha tomado fuerza es la aplicación en la rama de la ingeniería civil con la fabricación de ladrillos de roca estéril de fosfato (PWR) y lodo de lavado de fosfato (PWS). Junto con cemento presentan ventajas como buenas condiciones térmicas y de aislamiento, mostrando características

pares a las materias primas de los materiales de construcción, por lo que se infiere que los ladrillos son una opción viable que brinda seguridad a la construcción y crea un espacio confortable adecuado para el hábitat (Inabi et al., 2024). Se ha podido reconocer que los lodos de fosfato generan un reto de tratamiento por lo que luego de los procesos de trituración, lavado y flotación se generan una cantidad considerable. Como método de aprovechamiento han sido empleados como materia prima en la creación de cerámicas y materiales de construcción, las cerámicas presentan características de análisis como porosidad, absorbancia de agua y resistencia, dando como resultado la viabilidad de la utilización de estos lodos en la fabricación de cerámicas (Harech et al., 2024). De manera general se puede concluir que las aplicaciones y posibilidad de aprovechamiento de los lodos generados en la industria de explotación y transformación de la roca fosfórica se relacionan con el uso en materiales de construcción ofreciendo una variedad de opciones que se relacionan con la composición química y mineralógica.

## MARCO TEÓRICO

El aprovechamiento de recursos hace referencia a la utilización eficiente de los componentes disponibles en el entorno en el que se localiza el proyecto, con el fin de aportar al desarrollo. Esto también incluye la optimización en el uso de los minerales y sus potencialidades, siempre teniendo presente la gestión económica. A su vez, el aprovechamiento contribuye a la disminución de impactos ambientales bajo la promoción de prácticas que garantizan la preservación de los ecosistemas y por ende la satisfacción de las generaciones futuras (Tamayo Orbegozoa et al., 2012).

Los recursos minerales son elementos presentes en la corteza de la tierra, poseen un valor económico y son determinantes como materias primas en varias industrias y desarrollo de diversos procesos productivos, la extracción y la transformación de estos son fundamentales para la productividad de las organizaciones. Tienen aplicación en diferentes sectores como la manufactura, energía, infraestructura y construcción, salud y uno de los más importantes, en la agroindustria con el desarrollo de fertilizantes, pues estos mejoran las condiciones de producción al proporcionar los nutrientes que el suelo carece. La economía industrial hace referencia al estudio de los mercados en términos de producción de bienes y servicios. Ejemplifica como las empresas toman decisiones estratégicas para que su compañía mejore en términos de competitividad, eficiencia, rentabilidad y producción con el fin de resaltar en el mercado y tener un valor agregado frente a los demás competidores (Souza Piao et al., 2023)

A continuación, se relaciona el proceso industrial de la exploración, explotación, transformación y comercialización de la roca fosfórica en Boyacá como se muestra en la figura 1, se da inicio con la ejecución de prácticas de minería bajo tierra que permite la extracción eficiente de un mineral o conjunto de minerales de un yacimiento situado a cierta profundidad (Herrera Herbert, 2020). Para el caso de estudio se emplea dinamita ya que tiene la capacidad de fragmentar la roca debido a que crea ondas de choque, es importante hacer la práctica de manera controlada

y eficiente (Alvarez & Pallo, 2024). La roca fosfórica se encuentra usualmente en formaciones sedimentarias, es un insumo indispensable para la fabricación de diferentes productos industriales, aunque se emplea comúnmente en la fabricación de fertilizantes de uso agrícola (Chien et al., 2009). Por su parte, el proceso de trituración permite reducir el tamaño del material y brinda la oportunidad de procesarlo y utilizarlo de mejor manera, es una etapa muy importante ya que prepara el material para las siguientes etapas (Feijoo et al., 2021). Seguido por el proceso de secado que básicamente busca eliminar la humedad que puede poseer el mineral, mediante la separación de sólido no volátil y un líquido volátil, depende de factores como la humedad del ambiente y la temperatura (Torres Tamayo, 2003).

Posteriormente el proceso de molienda representa una gran importancia dada la reducción del tamaño del mineral para liberar los componentes valiosos (Francisco Anticoi Sudzuki Directors & Pura Alfonso Abella Josep Oliva Moncunill, 2019). A continuación, se encuentran dos silos (silo 2 – silo 1) que son estructuras para almacenar el material donde están protegidos de algunos factores ambientales y de la intemperie (Khalil et al., 2022). El proceso de dilución (mediante acidulación) se realiza con ácido sulfúrico y agua, se espera aumentar el porcentaje del pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) y mejora la capacidad de absorción de los nutrientes presentes en los fertilizantes (Jones et al., 2023). Es importante reconocer que la acidulación con ácido sulfúrico es importante para solubilizar la roca fosfórica, sin embargo, este ácido es altamente corrosivo, razón por la que se está presenciando el desgaste de las estructuras (Ouarga et al., 2023).

El curado es un proceso fundamental ya que mediante la hidratación del mineral se mejora la eficiencia del fertilizante y sus propiedades químicas, es importante controlar las condiciones de humedad y temperatura (Skut et al., 2012). El diseño de mezcla es la sección donde se busca determinar la fórmula adecuada para satisfacer la necesidad agrícola específica por lo que se comercializan diferentes tipos de productos con variaciones en el contenido elemental (Nils & Mannkhajm, 2020). Como su nombre lo indica la granulación es la transformación del mineral

reducción en las fases anteriores en gránulos que facilitan labores como almacenamiento, manipulación y aplicación (Izydorczyk et al., 2022). El secado final disminuye el contenido de humedad presente en el producto, de esta forma se disminuye la posibilidad de que se formen grumos ya que esto podría afectar la aplicación del producto, a su vez limita el crecimiento microbiano (Xuejiang, 2016). Finalmente, el empaque brinda una protección al producto, así como seguridad para manipularlo y llevarlo al consumidor final, juega un papel importante en el manejo de marca y presentación de la empresa (R. Andrade et al., 2018).

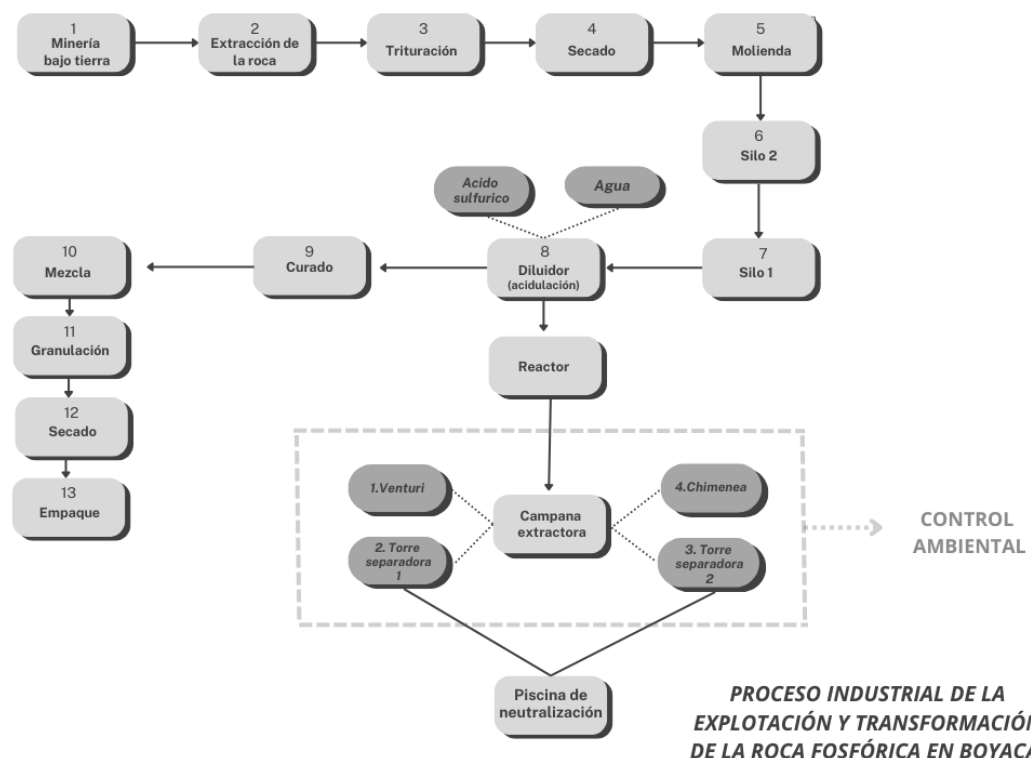
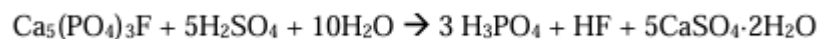


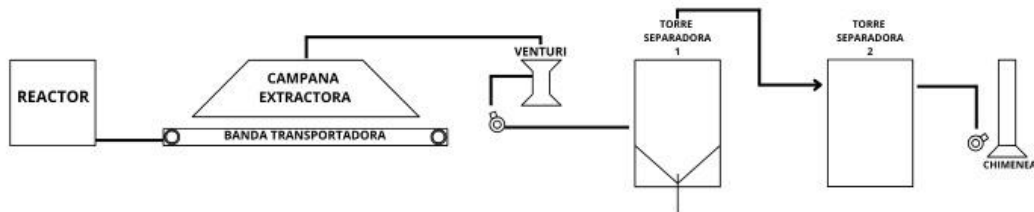
Figura 1. Proceso industrial de la explotación y transformación de la roca fosfórica en Boyacá.

En cuanto al proceso de control ambiental surge de la división posterior al proceso de dilución o acidulación es importante recordar que allí hay adición de ácido sulfúrico y agua que causa una reacción con el mineral (roca fosfórica) como se ve a continuación:



El reactor facilita la reacción química de las sustancias, bajo un proceso de agitación, con control de temperatura (Quiñones, 2019). El producto se envía a la banda transportadora donde la campana extractora capta y da inicio al proceso de tratamiento en el sistema de control ambiental (figura 2) donde se espera remover, separar y aprovechar las impurezas generadas en el proceso industrial de la roca fosfórica. En cuanto a la información suministrada por la empresa se indica la presencia de los siguientes compuestos y sus porcentajes de remoción:

1.  $\text{SiF}_4$  Tetra-fluoruro de Silicio 99.9% de remoción.
2. HF Fluoruro de Hidrógeno 99.9% de remoción.
3. PM Material Particulado 97% de remoción.
4.  $\text{SiO}_2$  Óxido Silícico 97% de remoción.



*Figura 2. Proceso de control ambiental.*

El sistema gestiona los elementos captados aplicando los principios de la dinámica de fluidos y las reacciones químicas. La campana extractora capta los residuos, se identificó que hay una formación de lodos a lo largo del ducto de ventilación que conduce al tubo Venturi. Este busca controlar el flujo del fluido mediante el aumento de la velocidad y la reducción de la presión, así como el intercambio de temperaturas. En la torre separadora 1 se cuenta con un sistema atrapaniebla que genera la división de la mezcla de agua y vapor en función de la densidad y por condensación las gotas se capturan en el atrapaniebla. A su vez, en la torre separadora 2 hay presencia de un scrubber que limpia los gases de escape por lo que el HF reacciona con el Si y aumenta la humedad de los gases formando sílice hidratada, que queda retenida en los ductos de la chimenea (Bellmann, 1992).

## METODOLOGÍA

La metodología que se llevó a cabo para el desarrollo del proyecto está enmarcada en un proceso teórico - práctico donde a partir de información bibliográfica y análisis de tipo experimental se llegó a cumplir el objetivo general (figura 9). Las actividades metodológicas son:

- **Revisión bibliográfica.** Esta se realizó durante toda la ejecución del proyecto con el fin de tener datos actualizados de los usos y aplicaciones de los residuos de fosfatos.
- **Selección y toma de muestras de la roca fosfórica.** Se tomaron 4 muestras de diferentes minas de roca fosfórica donde se extrae el material que se emplea en la empresa para la industrialización y comercialización de los productos.
- **Selección de muestras de lodos y líquidos.** La empresa cuenta con 17 productos comerciales del mineral de roca fosfórica, sin embargo, los productos base son 5, estos varían en el porcentaje de acidulación, se estableció que el análisis se haría con muestras de la fase de control ambiental tomadas en diferentes puntos durante el proceso de industrialización del producto de menor acidulación (30%) y de mayor acidulación (85%).
- **Toma de muestras de lodos y líquidos.** Se realizó la toma de muestras representativas en el proceso de control ambiental por parte de la empresa. Las muestras que se tomaron fueron: en el ducto de la campana extractora (ingreso ducto de ventilación y salida ducto de ventilación), en el área de recirculación del Venturi, en la torre separadora 1 y en la chimenea, cinco muestras para análisis del producto con mayor acidulación (85%), es importante mencionar que las dos primeras tenían un aspecto de lodo, mientras que las siguientes tres se estaban en estado líquido con alta presencia de sedimento; en el área de recirculación del Venturi, en la torre separadora 1 y en la chimenea. En total se tomaron ocho muestras para

análisis, dos de lodo y seis de líquido. En la figura 3 se puede apreciar el tren del sistema de “control ambiental” y se identifican los puntos de toma de muestra.

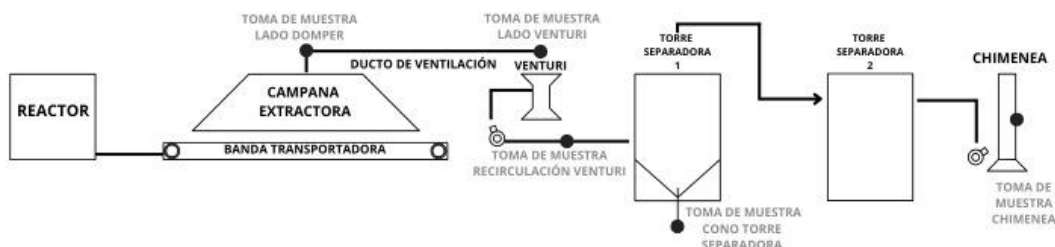


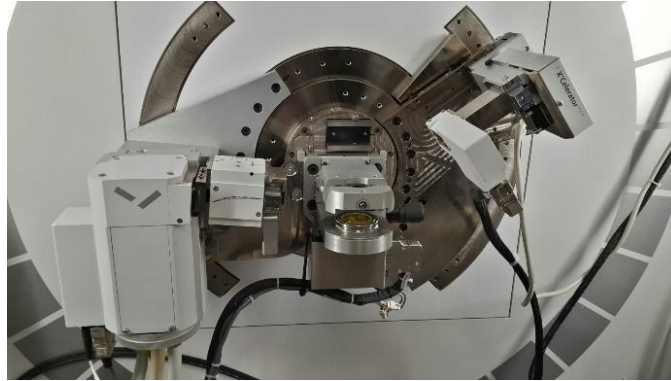
Figura 3. Puntos de toma de muestras sistema "Control ambiental".

- **Caracterización de la roca fosfórica.** Se realizó la identificación de las propiedades químicas mediante fluorescencia de rayos X con el fin de identificar los elementos presentes en la muestra, empleando el equipo de FRX portátil S TITAN 500 marca BRUKER.



Figura 4. Equipo de FRX portátil S TITAN 500 marca BRUKER.

Para las propiedades mineralógicas se realizó difracción de rayos X (DRX) con equipo marca Panalytical referencia Empyrean, cuyas condiciones de operación fueron fijadas para un barrido en el eje  $2\theta$  desde  $5^\circ$  a  $70^\circ$  con pasos de  $0.02^\circ$  y un tiempo de 0.5 s/paso con el fin de determinar las especies mineralógicas presentes.



*Figura 5. Equipo difracción de rayos X (DRX).*

Para las propiedades morfológicas se empleó microscopía electrónica de barrido mediante el equipo marca ZEISS modelo EVO MA10 en conjunto con el análisis EDS ofrece evaluaciones mineralógicas rápidas e identifica las principales tendencias mineralógicas.



*Figura 6. Equipo microscopía electrónica de barrido.*

Finalmente se ejecutó la espectroscopía de Raman en un equipo marca Thermo Scientific referencia 912A0999 teniendo en cuenta las siguientes condiciones: laser 532nm, red 900 líneas/mm, apertura del espectrógrafo orificio 25nm, nivel de potencia del láser 5.0 mW para conocer el comportamiento de los iones de fósforo y calcio.



*Figura 7. Equipo espectroscopía de Raman.*

- **Caracterización de líquidos.** La identificación se realizó para el análisis de fósforo total siguiendo el Standard Methods 4500 D. Ed 24th -2023 bajo la técnica de espectrofotometría. Es una técnica analítica cuantitativa que se utiliza para determinar la concentración de compuestos en solución. Su principio se fundamenta en la capacidad de las moléculas de absorber radiación electromagnética dentro del espectro ultravioleta y visible, donde la absorbancia se relaciona linealmente con la concentración del analito, conforme a la ley de Beer-Lambert.(Garrido, 2023).
- **Caracterización de lodos.** Se realizó la identificación de las propiedades físicas a través de la técnica del potencial Z, para las propiedades químicas se realizó fluorescencia de rayos X, para las propiedades mineralógicas se empleó DRX y para las propiedades morfológicas se usó microscopia electrónica de barrido con análisis EDS con el fin de conocer el contenido de los lodos residuales.

La técnica del potencial Z, es una medida que refleja qué tan fuerte es la atracción o repulsión electrostática entre las partículas, y es uno de los factores clave que influyen en la estabilidad de las especies mineralógicas presentes.



*Figura 8. Equipo potencial Z.*

- **Usos y aplicaciones.** A través de la literatura se hizo una identificación de los usos y potencial de aprovechamiento de los residuos y al conocer los resultados de la caracterización se pudo sugerir las opciones de aprovechamiento y se seleccionó la más viable siguiendo la idea de formulación de una metodología para darle un valor agregado a los residuos.
- **Formulación de la metodología de aprovechamiento.** Se estableció una ruta para aprovechar los lodos que se están generando en el ducto de ingreso al sistema de control ambiental con la finalidad de aplicarlo como insumo bajo un modelo de economía circular.

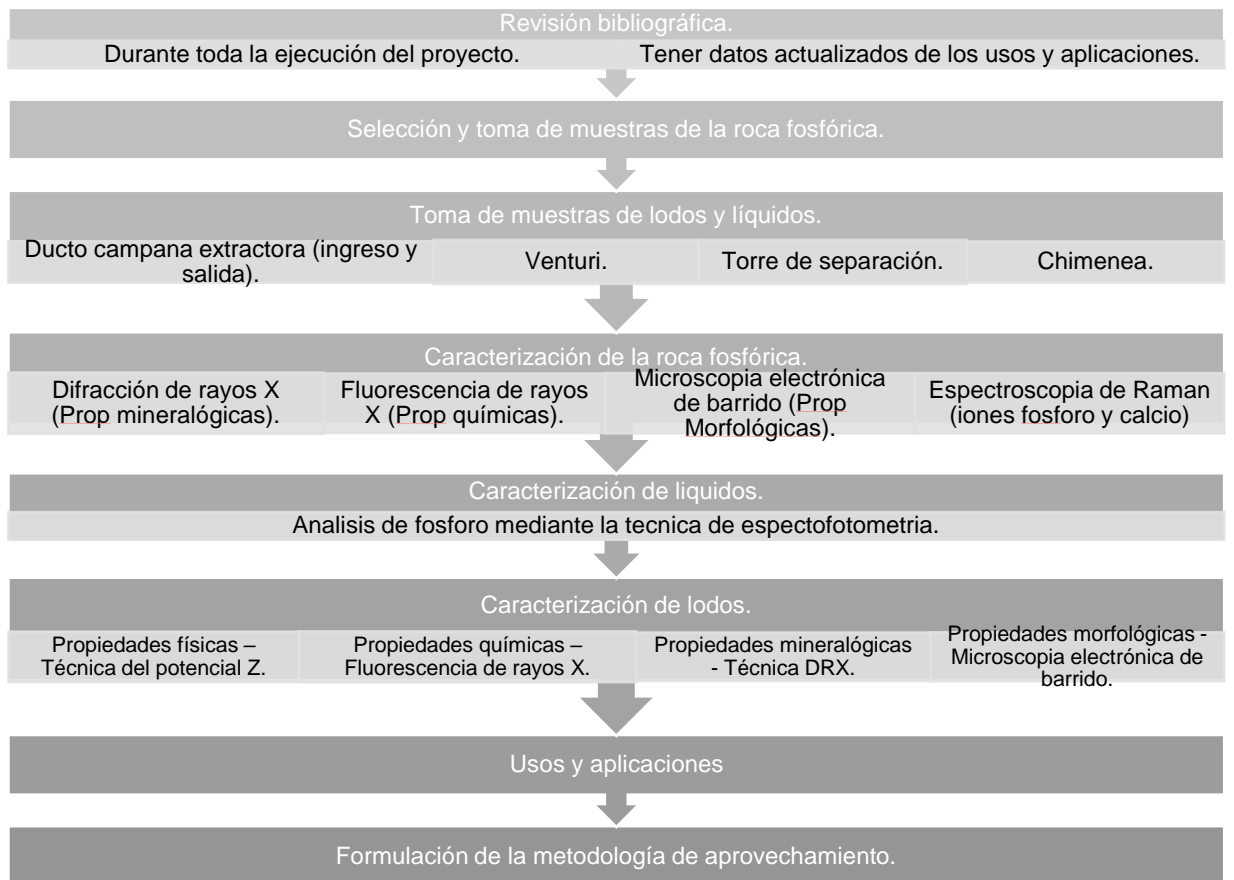


Figura 9. Metodología para cumplir el objetivo de la investigación.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Siguiendo la metodología propuesta se evidencia el análisis de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas de los lodos generados en el ducto del sistema de “control ambiental” de la empresa FOSFATOS DE BOYACÁ S.A. En cuanto a los líquidos que se forman en otros tramos del proceso (como lo describe la metodología sección toma de muestras de lodos y líquidos), se presenta el análisis de fósforo total con el fin de conocer la cantidad presente en cada área y evaluar posibles pérdidas del componente principal de la fabricación de los fertilizantes (fósforo). Se muestra a continuación el análisis de roca fosfórica, seguido del análisis de líquidos y posteriormente el análisis de lodos.

### Caracterización de roca fosfórica

A través de la difracción de rayos X se identificó que las especies predominantes de la roca fosfórica son calcita en un 7%, cuarzo en un 34% y fluorapatita en un 59%, como se muestra en la figura 10:

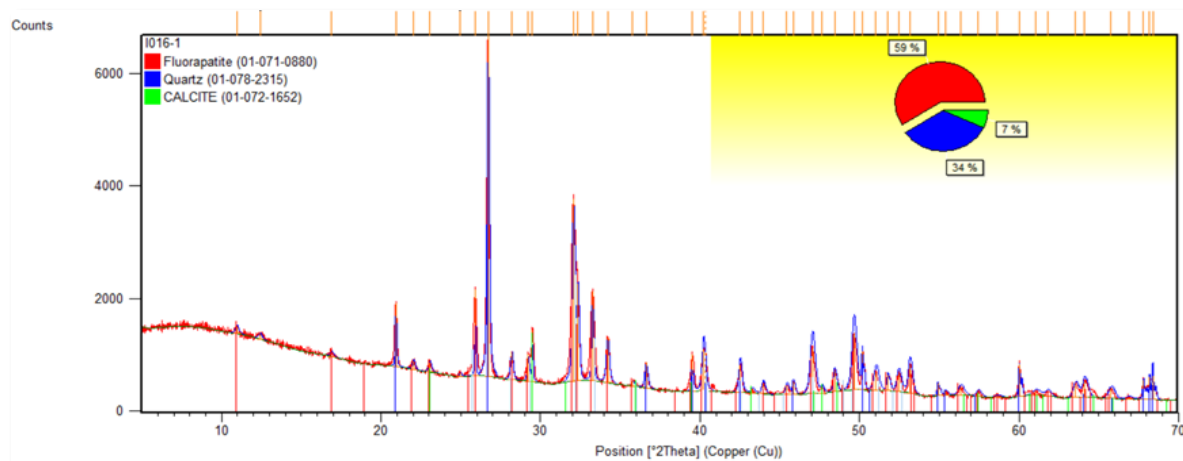


Figura 10. Espectros de difracción de rayos X para la muestra de RF.

Por medio de la fluorescencia de rayos X se estableció que la composición química elemental de la roca fosfórica sustenta porcentajes de Ca del 36.76% y P del 13.44% entre otros elementos como se relacionan en la tabla 1:

Tabla 1. Composición elemental de la roca fosfórica.

Elemento	Composición (%)
Ca	36,76
P	13,44
Si	12,48
Mg	3,54
Al	1,29
Fe	1,06
Cl	0,33
K	0,23
Sr	0,15
Ti	0,09
S	0,08
Mn	0,02

Mediante la espectroscopia de Raman se identificaron los espectros en los que se determina el comportamiento de diferentes nodos de vibraciones, mostrando una semejanza entre las muestras, pero presentando mayores intensidades en las muestras 2 y 4, los picos altos que se muestran en la figura 11 evidencian la presencia de iones de fosfato y calcio.

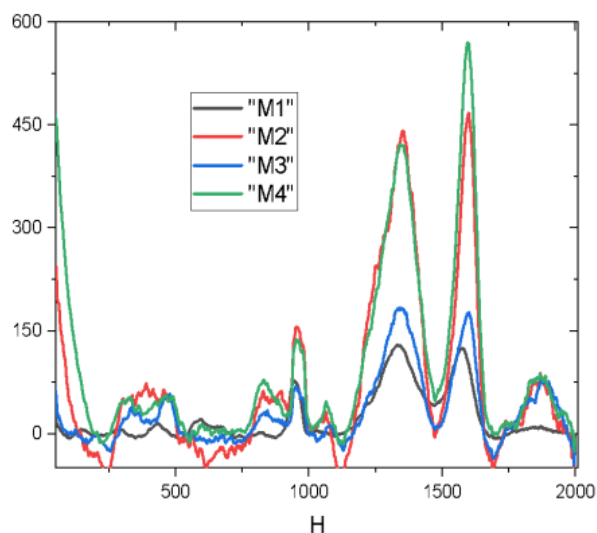


Figura 11. Espectros Raman para las muestras de roca fosfórica.

Empleando la microscopia electrónica de barrido (SEM) se estableció que la morfología son cristales de fosfato de calcio en forma de fluorapatita (figura 12), que se corrobora con el análisis DRX.

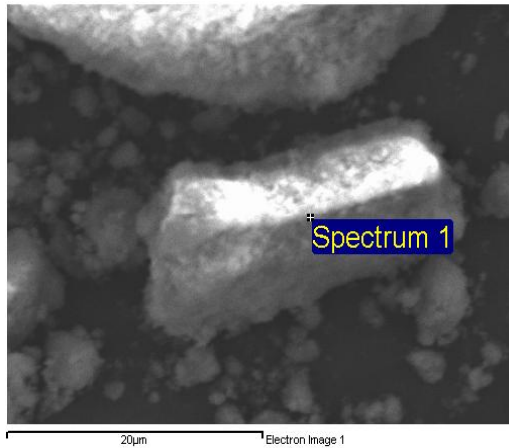


Figura 12. Morfología para muestra de roca fosfórica técnica SEM.

Por medio de la técnica EDS se identificaron y cuantificaron los elementos presentes en el punto de muestra donde resalta la presencia de calcio (Ca), como se relacionan en la figura 13:

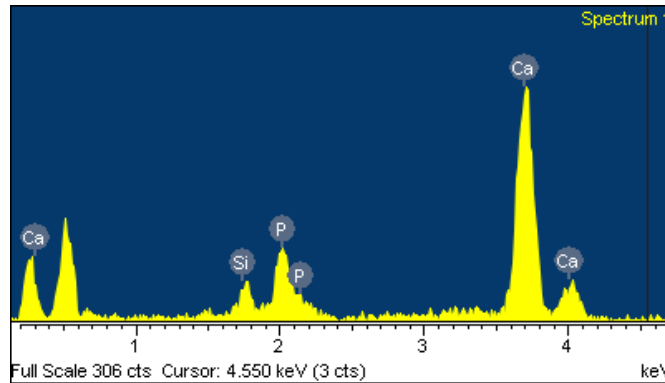


Figura 13. Análisis químico mediante técnica EDS para muestra de RF.

Tabla 2. Elementos presentes en muestra de roca fosfórica.

Elemento	Composición (%)
Ca	83,99
P	11,33
Si	4,68

### Caracterización de líquidos

Mediante la técnica de análisis de espectrofotometría se realizó el análisis de fósforo para las muestras líquidas, en las tablas 3 y 4 se relacionan los resultados de los productos de acidulación (85%) y acidulación (30%) respectivamente.

### Producto de acidulación (85%):

Tabla 3. Resultados cuantificación de fósforo producto de acidulación (85%).

Punto de toma	Método	Técnica analítica	Resultado de medición	Unidades
Recirculación Venturi	Standard Methods 4500 D. Ed 24th - 2023	Espectrofotometría	1,191	mg/L
Torre separadora	Standard Methods 4500 D. Ed 24th - 2023	Espectrofotometría	1,176	mg/L
Chimenea	Standard Methods 4500 D. Ed 24th - 2023	Espectrofotometría	1,254	mg/L

### Producto de acidulación (30%):

Tabla 4. Resultados cuantificación de fósforo producto de acidulación (30%).

Punto de toma	Método	Técnica analítica	Resultado de medición	Unidades
Recirculación Venturi	Standard Methods 4500 D. Ed 24th - 2023	Espectrofotometría	1,214	mg/L
Torre separadora	Standard Methods 4500 D. Ed 24th - 2023	Espectrofotometría	1,575	mg/L
Chimenea	Standard Methods 4500 D. Ed 24th - 2023	Espectrofotometría	3,522	mg/L

En relación con los resultados se puede establecer que son valores bajos en los dos productos, sin embargo, se identifica un aumento en el valor del producto de

acidulación (30%) en el área de chimenea etapa final, donde se esperaría que los valores se mantuvieran e incluso que disminuyeran. No se puede contrastar con normativa ya que no se realizan vertimientos debido a que hay un proceso de recirculación industrial, pero es importante contar con el monitoreo en caso de una visita por parte de la autoridad ambiental. El análisis es importante porque el monitoreo permite conocer el estado químico del sistema ya que la acumulación puede desencadenar en corrosión o formación de incrustaciones (Fernández et al., 2019).

### Caracterización de lodos


A continuación, se muestran el estado de los lodos cuando ingresaron al laboratorio para ejecutar el tratamiento preliminar (tabla 5), es importante recordar que estos lodos corresponden al producto de acidulación (85%):

Tabla 5. Muestras de lodo.

<p>INGRESO DUCTO DE VENTILACIÓN</p>		
<p>SALIDA DUCTO DE VENTILACIÓN</p>		

Antes de realizar cada una de las pruebas para la caracterización el lodo se secó en horno – mufla a 100°C, se pudo establecer el porcentaje de humedad y se presenta en la tabla 6:

*Tabla 6. Material seco en horno - mufla a 100 °C.*

<b>Zona de muestra</b>	<b>Peso lodo (g)</b>	<b>Peso material seco (g)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Fotografía</b>
INGRESO DUCTO DE VENTILACIÓN	612,1	524,9	14,2	
SALIDA DUCTO DE VENTILACIÓN	796,9	714,9	10,3	

### **Difracción de rayos X (DRX):**

Es una técnica de análisis que permite identificar la cantidad de fases mineralógicas presentes, los parámetros de red y el volumen de la celda cristalina que presenta cada una de las fases bajo la emisión de un haz de rayos X.

### **Ingreso ducto de ventilación:**

A través de la difracción de rayos X se observa que para esta etapa del proceso hay presencia de cuarzo en diferentes formas cristalinas y no se presentan otros compuestos en este lodo, lo que puede sugerir que este material puede emplearse en la generación de materiales de construcción (figura 14).

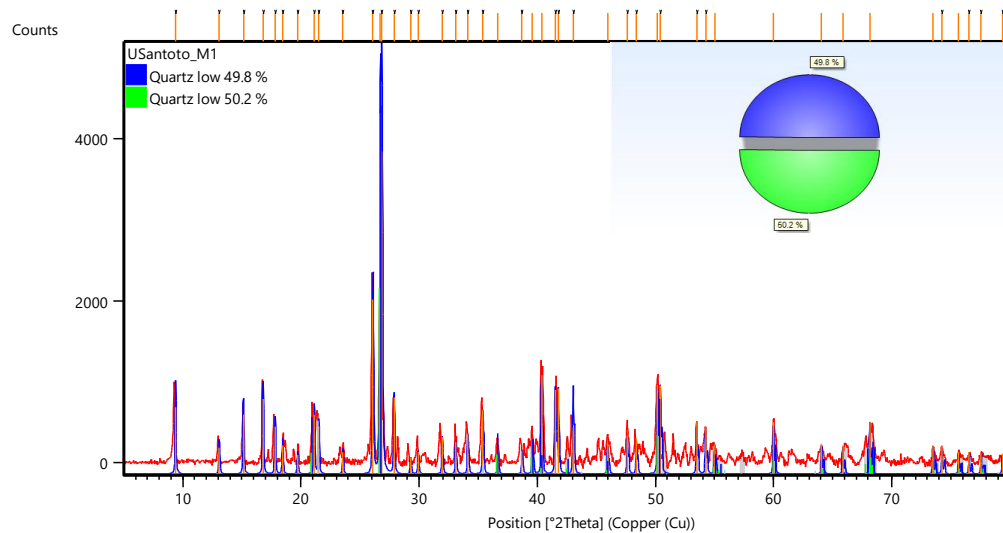


Figura 14. Espectros de difracción de rayos X para la muestra ingreso ducto de ventilación.

### Salida ducto de ventilación:

A través de la difracción de rayos X se observa que hay presencia de cuarzo en diferentes formas cristalinas y no se presentan otros compuestos en este lodo, lo que puede sugerir que este material puede emplearse en la generación de materiales de construcción por la composición de Sílice -  $\text{SiO}_2$  (figura 15).

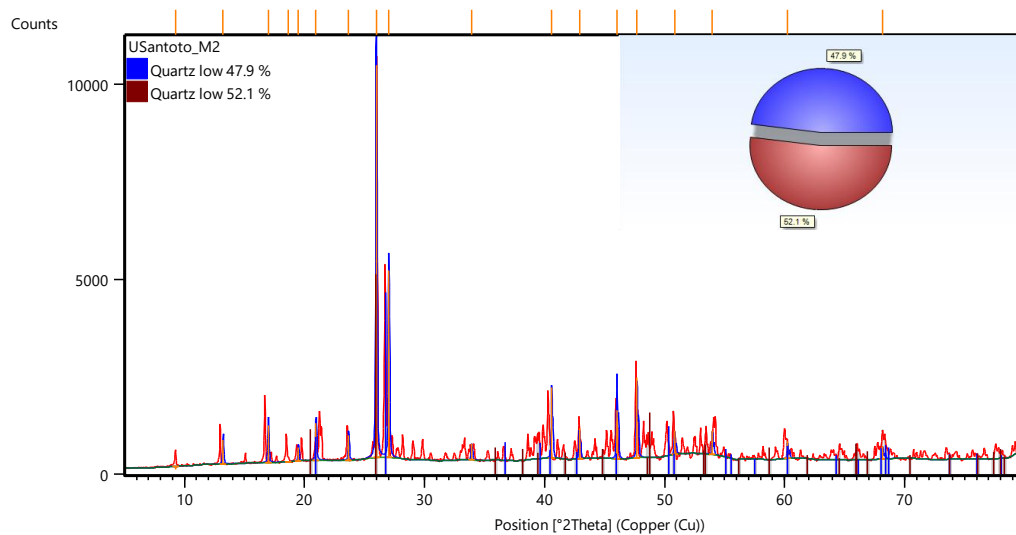


Figura 15. Espectros de difracción de rayos X para la muestra salida ducto de ventilación.

### Fluorescencia de rayos X (FRX)

Permite conocer la composición de una muestra, ya que identifica los elementos mediante la detección de la radiación cuando pasan los rayos X, es una pistola que

al disparo realiza el análisis de la composición de la muestra tal como se muestra en la figura 16:



Figura 16. Análisis FRX para material seco.

### Ingreso ducto de ventilación:

Por medio de la fluorescencia de rayos X se estableció que la composición química elemental del material seco extraído del punto de muestra ingreso ducto de ventilación, tiene porcentajes mayores en tres compuestos: Óxido silícico ( $\text{SiO}_2$ ), Pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), teniendo en cuenta 5 compuestos adicionales en menor proporción como se relacionan en la tabla 7:

Tabla 7. Composición elemental de muestra ingreso ducto de ventilación.

Compuesto	Composición (%)
$\text{SiO}_2$	70,76
$\text{P}_2\text{O}_5$	11,14
$\text{CaO}$	10,99
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,39
$\text{SO}_3$	2,48
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,16
$\text{TiO}_2$	0,07
$\text{MnO}$	0,02

### Salida ducto de ventilación:

Por medio de la fluorescencia de rayos X se estableció que la composición química elemental del material seco extraído del punto de muestra salida ducto de ventilación, sustenta porcentajes mayores en dos compuestos: Óxido silícico ( $\text{SiO}_2$ ) y Oxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), teniendo en cuenta 5 compuestos adicionales en menor proporción como se relacionan en la tabla a continuación:

Tabla 8. Composición elemental de muestra salida ducto de ventilación.

Compuesto	Composición (%)
SiO <sub>2</sub>	72,3
CaO	20,22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,66
SO <sub>3</sub>	1,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,54
TiO <sub>2</sub>	0,10

### **Microscopia electrónica de barrido (SEM) y Espectroscopia de energía dispersa (EDS).**

Estos métodos brindan una visión integral de la muestra a nivel estructural, composicional y morfológico.

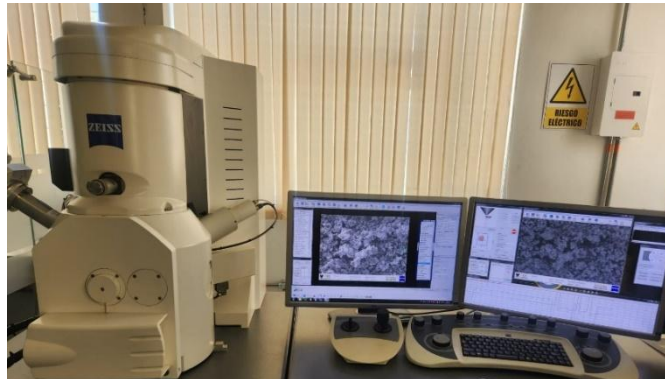
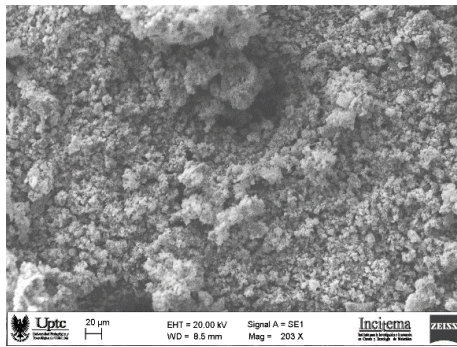


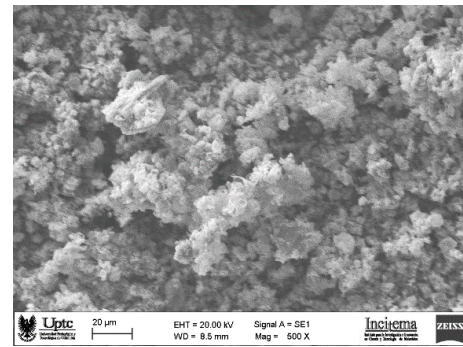
Figura 17. Análisis SEM y EDS para material seco.

### **Ingreso ducto de ventilación:**

Por medio de la técnica SEM se identificó la morfología de las partículas del lodo en estudio como se relaciona a continuación:



a



b

Figura 18. Estructura muestra de lodo seco – ingreso ducto de ventilación por microscopia electrónica de barrido a) 200X, b) 500X.

En la figura 18 se observa una estructura en forma de gránulos tomados a magnitud 200X y 500 X que sugieren de acuerdo con el EDS partículas de Sílice que provienen de los compuestos mineralógicos iniciales que no reaccionaron en el proceso de acidulación.

Por medio de la técnica EDS se identificaron y cuantificaron los elementos presentes en dos puntos de la muestra cómo se observa en las figuras 19 y 20:

**Punto 1**

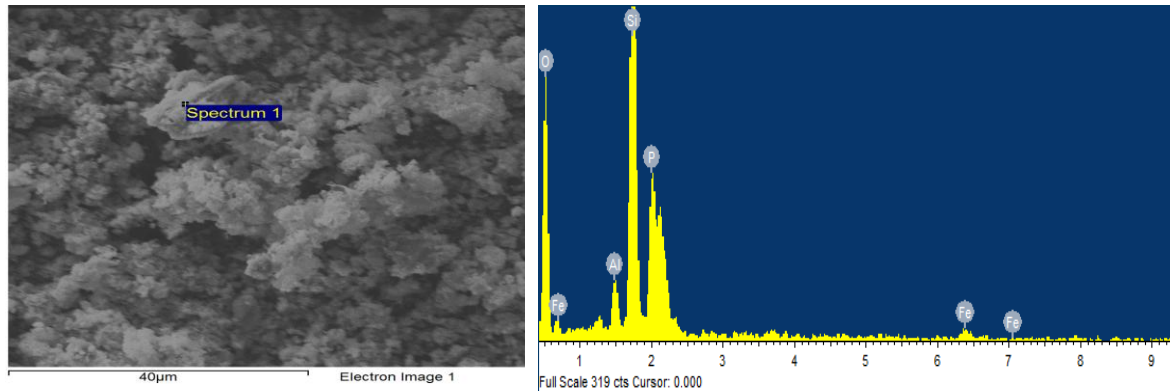


Figura 19. Análisis químico a través de EDS para muestra ingreso ducto de ventilación punto 1.

Tabla 9. Análisis químico elemental con EDS muestra ingreso ducto de ventilación punto 1.

Elemento	Composición (%)
O2	71,53
Si	19,91
P	5,45
Al	2,28
Fe	0,83

## Punto 2

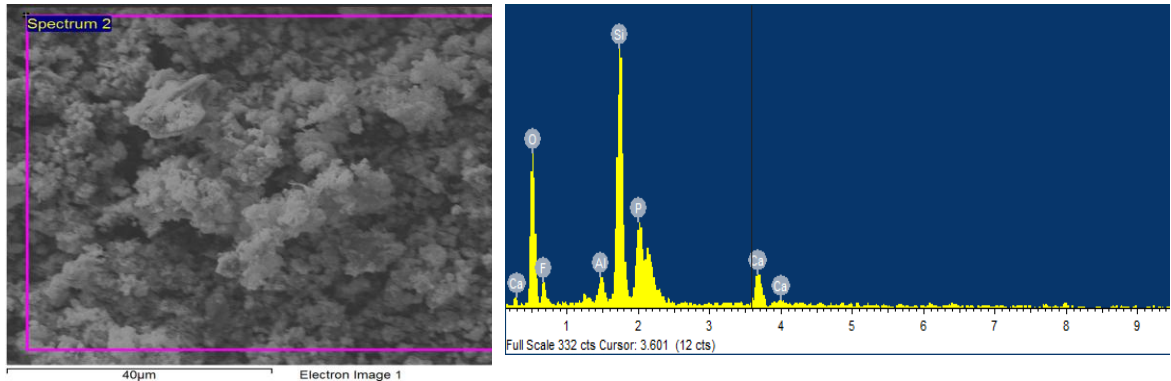


Figura 20. Análisis químico a través de EDS para muestra ingreso ducto de ventilación punto 2.

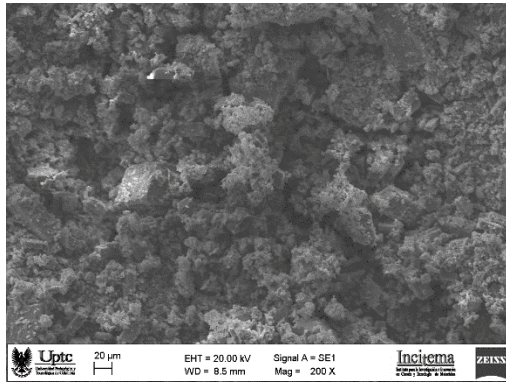
Tabla 10. Análisis químico elemental con EDS muestra ingreso ducto de ventilación punto 2.

Elemento	Composición (%)
O <sub>2</sub>	62,24
F	14,87
Si	14,79
P	4,19
Ca	2,24
Al	1,67

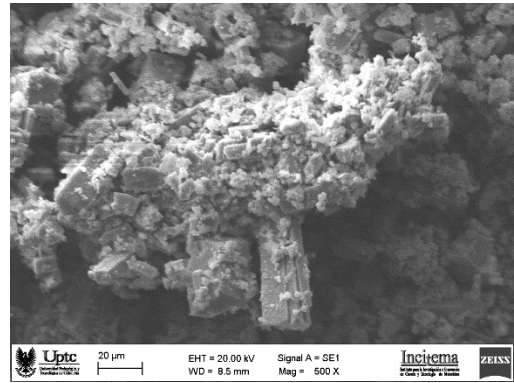
En la figura 19 se observa el espectro de un punto, sobre la muestra de lodo de ingreso ducto de ventilación, donde se evidencia presencia de Si, O<sub>2</sub>, P y otros elementos en pequeñas cantidades. En la figura 20, se observa un barrido general de la muestra de lodo de ingreso ducto de ventilación, donde se corrobora la presencia de los elementos mencionado anteriormente.

### Salida ducto de ventilación:

Por medio de la técnica SEM se identificó la morfología de las partículas del lodo en estudio como se relaciona a continuación:



a



b

Figura 21. Estructura muestra de lodo seco – salida ducto de ventilación por microscopia electrónica de barrido a) 200X, b) 500X.

En la figura 21 se observa una estructura en forma de granos de sílice a 200X y 500X que sugieren de acuerdo con el EDS partículas que provienen de los compuestos mineralógicos iniciales que no reaccionaron en el proceso de acidulación.

Por medio de la técnica EDS se identificaron y cuantificaron los elementos presentes en dos puntos de la muestra cómo se observa en las figuras 22 y 23:

### Punto 1

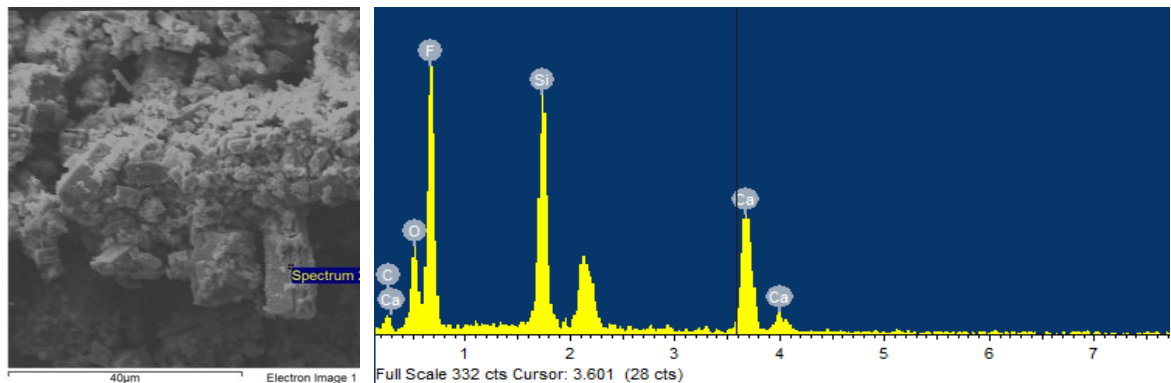


Figura 22. Análisis químico a través de EDS para muestra salida ducto de ventilación punto 1.

Tabla 11. Análisis químico elemental con EDS muestra salida ducto de ventilación punto 1.

Elemento	Composición (%)
F	51,78
C	20,79
O <sub>2</sub>	17,27
Si	6,64
Ca	3,52

## Punto 2

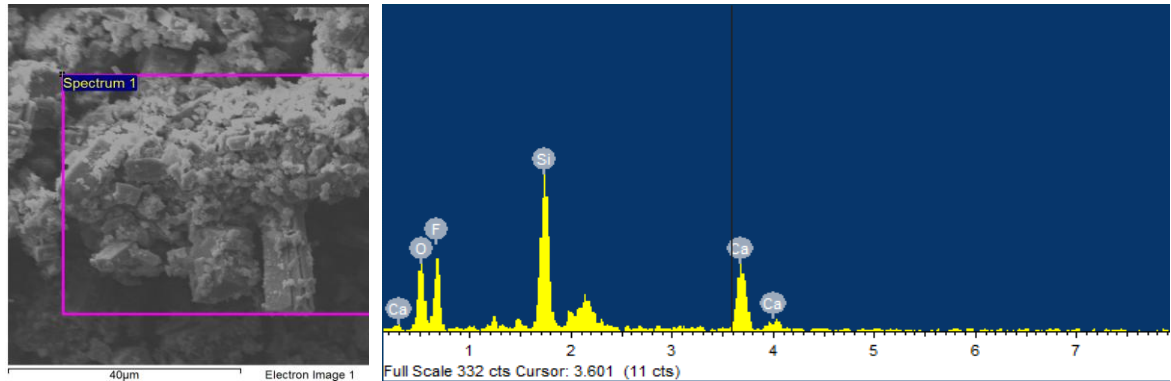


Figura 23. Análisis químico a través de EDS para muestra salida ducto de ventilación punto 2.

Tabla 12. Análisis químico elemental con EDS muestra salida ducto de ventilación punto 2.

Elemento	Composición (%)
F	47,55
O <sub>2</sub>	35,44
Si	11,51
Ca	5,29

En la figura 22 se observa el espectro de un punto, sobre la muestra de lodo salida ducto de ventilación, donde se evidencia presencia de F, C y O<sub>2</sub> y otros elementos en pequeñas cantidades. En la figura 23, se observa un barrido general de la muestra de lodo salida ducto de ventilación, donde se corrobora la presencia de los elementos mencionado anteriormente.

### **Potencial Z:**

Permite conocer la estabilidad de suspensión de las partículas, el comportamiento de la carga superficial y la interacción entre partículas como se muestra a continuación:

### Ingreso ducto de ventilación:

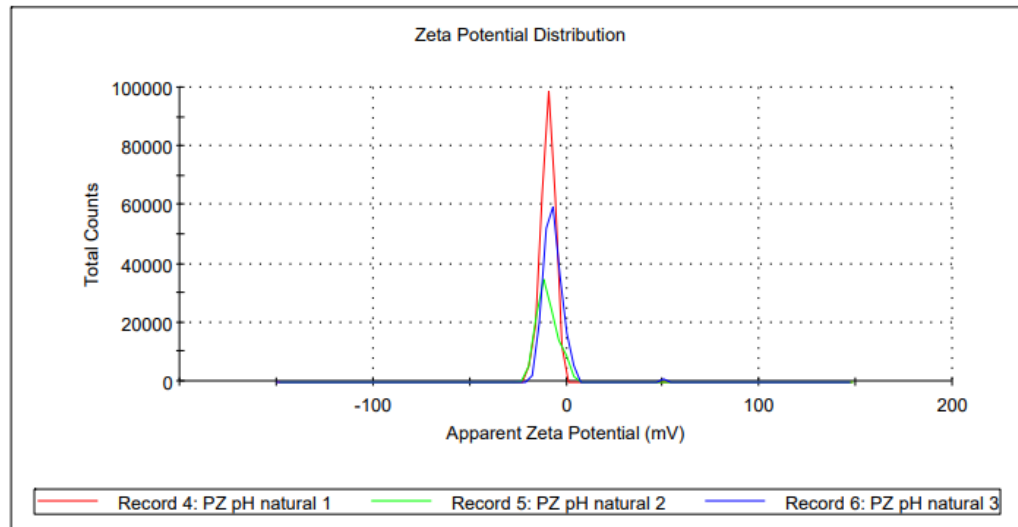


Figura 24. Grafica potencial Z - muestra ingreso ducto de ventilación.

### Salida ducto de ventilación:

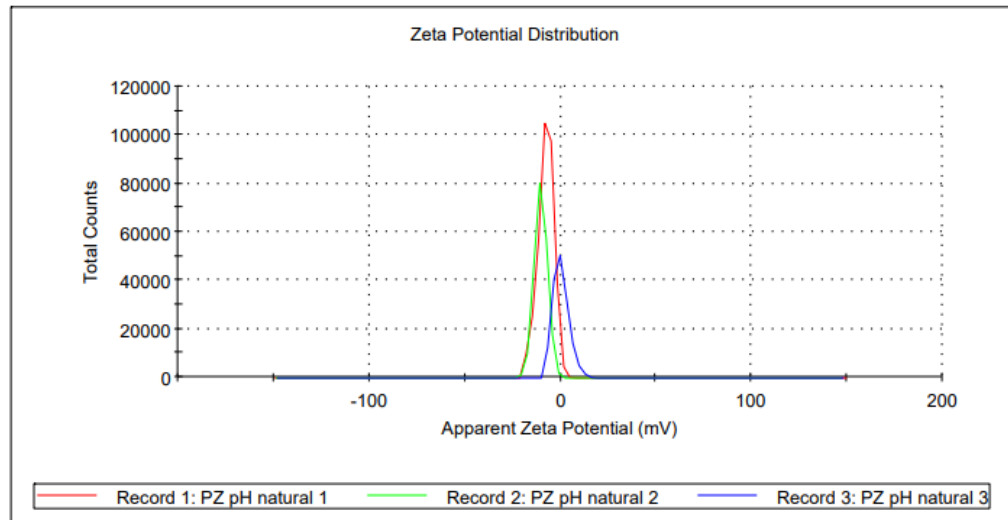


Figura 25. Grafica potencial Z - muestra salida ducto de ventilación.

En las figuras 24 y 25 se identifica una dificultad en la estabilización de la carga, como lo muestran los picos, esto se debe a la presencia de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) que cristalizó en diferentes formas alotrópicas y por eso su comportamiento en este análisis, la presencia del compuesto y sus formas la corroboró el DRX.

## USOS Y APLICACIONES

En relación con el estado del arte se pudo concluir que los lodos caracterizados tienen usos y aplicaciones para ser implementados en la generación de productos que se relacionan con áreas de la ingeniería civil, en el marco de una visión de economía circular, bajo el reusó o el reciclaje. A través del aporte a la reducción de la huella ambiental y a la demanda de materias primas (Lessard et al., 2014). Se relacionan diversas formas de aprovechamiento potencializando la visión de insumo en la fabricación de materiales de construcción como cerámicas, ladrillos, concreto y pavimentos. Ya que la riqueza en sílice los convierte en opciones adecuadas, donde se reconoce la importancia de determinar de manera objetiva la composición en los diseños de mezcla hablando de una sustitución parcial para no afectar las propiedades y características requeridas en normativa (Hakkou et al., 2016). Por su parte (Idrissi et al., 2021) relaciona que la riqueza de los lodos generados en las actividades mineras de fosfato en compuestos como la sílice permite analizar en usos como capas de pavimentos en estructuras ligeras, así como en agregados de concreto, resaltando la importancia de la caracterización física y química para conocer el rendimiento en la aplicación industrial.

En concordancia con lo anterior se establece que los lodos tienen compuestos principalmente de silicatos y fosfatos que pueden ser utilizados como agregados en pavimento y concretos o en la producción de elementos cerámicos y ladrillos buscando resaltar la resistencia mecánicas y durabilidad de los elementos, teniendo en cuenta la transformación de recursos y la optimización de materiales (Safhi et al., 2022b), La reutilización de estos lodos no solo optimiza el uso de recursos, sino reduce la dependencia de materiales como arcillas brindando una opción efectiva en la producción de materiales duraderos y de bajo impacto. A continuación, se presenta una descripción de cada opción de uso o aprovechamiento:

### **Pavimentos en la construcción de carreteras:**

Es indispensable reconocer que en la construcción de vías existe una gran demanda de geo materiales, por tanto, si se emplean subproductos industriales se promueve el desarrollo y la aplicación de la economía circular. Los lodos por tener una composición elevada en sílice se convierten en elementos adecuados para utilizar como agregado en la subbase del pavimento. Teniendo presente el análisis de propiedades como densidad específica, índice de plasticidad y desgaste en la máquina de los ángeles que dan indicios de ser un material con las características geotécnicas adecuadas para emplearlo (Amrani et al., 2019). A su vez ha sido estudiada la posibilidad de reciclar los lodos de desechos del fosfato como aglutinante asfáltico demostrando efectos de mejoría en el comportamiento de la viscosidad (Amrani et al., 2020). Contribuye a la propuesta de materiales de construcción sostenibles alineados con las políticas ecológicas, se concluye que el concreto tendría aplicación en infraestructura con alta resistencia al desgaste como el de los pavimentos (El Machi et al., 2021).

### **Agregado alternativo para el concreto:**

Es importante reconocer que el concreto es el material de construcción más empleado en el mundo, por tanto, la producción de los agregados es de los factores más importantes ya que tienen gran ocupación en cualquier diseño de mezcla. Debido a la demanda de estos elementos se reconoce que la producción tiene una gran tendencia al crecimiento y por tanto la presión sobre los recursos, se habilita entonces una oportunidad para explorar agregados alternos que mitiguen la demanda de los agregados primarios (Xing et al., 2022). De igual forma, se evaluó el comportamiento de los desechos de fosfato como agregado grueso, ejecutando un análisis de las propiedades físico-mecánicas comparándolas con los resultados de las de los agregados naturales, convirtiendo la propuesta en una alternativa adecuada para la producción de concreto (Taha et al., 2021). La aplicación de los subproductos de las minas de fosfatos se convierte en una opción con aplicación en materiales cementantes que contribuyen a la reducción de emisiones como CO<sub>2</sub> que

se generan en la industrialización del cemento. El análisis de algunas propiedades como la resistencia a agentes químicos y la trabajabilidad permite tener un material que promueve la sostenibilidad al generar valor a los residuos industriales (Bahhou et al., 2020).

### **Agregado liviano:**

La sílice como componente fundamental en los materiales de construcción presenta propiedades similares para emplearlo como agregado ligero en la producción de concreto. Se contemplan propiedades como alta porosidad, baja densidad y buena absorción acústica, por lo que mejoran el aislamiento acústico y térmico de la estructura, es de resaltar que la resistencia a la compresión es relativamente baja razón por la que se habla de agregado ligero que reduzca el peso pero que aproveche la ventaja de aislante acústico. Otras investigaciones han demostrado que algunos diseños de mezcla brindan las resistencias adecuadas en la construcción de elementos no estructurales (Agrawal et al., 2021). Por otra parte, se analiza el comportamiento de las arenas producto de la trituración de elementos como la sílice, resaltando que poseen propiedades mecánicas que cumplen con los estándares de aplicación vial en las capas de base y subbase granular. Resaltando que emplear agregados ligeros reciclados promueve la sostenibilidad al reducir la dependencia de los materiales tradicionales (Cisse et al., 1999).

### **Producción de cerámica:**

Se analiza el reciclaje de lodos de fosfato en la fabricación de cerámicas, resaltando la composición de los lodos para remplazar materias primas de este proceso de industrialización, resaltando la composición de compuestos como la sílice que son base fundamental de la producción. Los productos evaluados relacionan propiedades como durabilidad, buena resistencia mecánica y baja porosidad que los convierten en una opción adecuada para emplearse en baldosas o revestimientos (Harech et al., 2024). Por su parte se emplean los residuos industriales para la síntesis de pigmentos cerámicos, generando esmaltes y

recubrimientos para baldosas, centrando la atención en las propiedades como estabilidad térmica, resistencia química y color (Carneiro et al., 2018).

### **Ladrillos:**

Investiga la utilización de subproductos arcillosos provenientes de la extracción de fosfato como recurso esencial para la producción de ladrillos cocidos. En la rama de los ladrillos, esta aplicación aprovecha las características químicas y físicas de estas arcillas para producir ladrillos con propiedades mecánicas y térmicas óptimas, cumpliendo con los estándares de construcción (Loutou et al., 2019). El uso de lodos de lavado de fosfato como insumo en la producción de ladrillos rojos ecológicos es una innovación que facilita la elaboración de materiales de construcción sostenibles al incluir residuos industriales, disminuyendo la necesidad de arcillas naturales y minimizando el efecto ambiental de su aplicación. Los ladrillos hechos con estos lodos exhiben excelentes características mecánicas, como resistencia a la compresión, además de ventajas térmicas que los convierten en ideales para usos en edificaciones ecológicas (Harech et al., 2023). La utilización del lodo producido al procesar fosfato como recurso usado en la producción de ladrillos cocidos, posibilita el uso de un subproducto abundante, reduciendo la extracción de arcillas naturales. Las investigaciones efectuadas evidencian que los ladrillos elaborados con este lodo muestran características mecánicas apropiadas, tales como elevada resistencia a la compresión, además de excelentes propiedades térmicas y durabilidad, cumpliendo con los criterios de calidad para materiales de construcción (Ettoumi et al., 2021).

## METODOLOGÍA DE APROVECHAMIENTO

Proponer una metodología para el aprovechamiento de un residuo (figura 26) implica un análisis técnico, estructural y sistémico bajo la visión de reducción de desechos y la optimización de recursos con enfoque sostenible. Es importante recordar que la caracterización se realizó a los lodos residuales formados en el proceso industrial del producto de 85% de acidulación, por tanto, la propuesta metodológica se realiza y aplica para el aprovechamiento de este elemento con algunas sugerencias para los demás productos. A continuación, se relaciona la hoja de ruta que va a permitir usar y aprovechar los lodos generados en la industria de la roca fosfórica en Boyacá bajo la sustitución parcial de agregados ligeros en la subbase granular del pavimento flexible, posteriormente se muestra la aplicación de la metodología:

### 1. Caracterización de lodo

Debido a que existen 5 productos base para generar la línea de productos comerciales es importante caracterizar los lodos formados en el proceso de industrialización de los 4 productos restantes.

- **Clasificación del residuo:** determinar las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas del producto mediante las técnicas de potencial Z, FRX, DRX y SEM con EDS.
- **Análisis de viabilidad:** establecer si el lodo contiene componentes con potencial de reutilización.
- **Valoración de riesgos:** identificar la presencia de agentes contaminantes o tóxicos que deban tratarse antes de reciclaje del producto.

### 2. Definición del potencial de utilización

- **Determinación de los usos:** identificar las aplicaciones en las que los lodos pueden integrarse como materia prima o insumo.
- **Análisis de beneficios:** establecer la viabilidad de aprovechar los lodos desde el ámbito social, económico y ambiental.

- **Selección del uso:** determinar a partir de las opciones cual es el mejor uso, teniendo en cuenta el análisis de beneficios.

### 3. Diseño del proceso de transformación

- **Toma de material:** establecer la forma correcta de recolectar los lodos.
- **Preparación del residuo:** retirar la humedad de los lodos, en caso de presentar aglomerados triturar para obtener una granulometría uniforme con el fin de acondicionarlos para integrarlos al ciclo productivo.

### 4. Desarrollo de prueba de mezcla agregado ligero

- **Combinación de materiales:** mezcla del lodo con materiales convencionales como arenas para cumplir los índices de compactación requeridos (proporción: 30% lodo – 70% arena). Es importante recordar que “Los materiales utilizados para la subbase deben ser compactos y resistentes, además de contar con un componente de arena u otro material mineral finamente triturado que actúe como relleno” (EMP, 2020).

### 5. Diseño de mezcla de subbase granular

- **Proporción sugerida:** en relación con la granulometría se sugiere usar un 90% de material granular convencional y un 10% de mezcla de agregado ligero. Estudios recomiendan que la sustitución parcial no debe superar el 10% (Razak et al., 2023) el porcentaje brinda un equilibrio adecuado para mantener características de trabajabilidad y resistencia (MacEachern et al., 2021).

### 6. Monitoreo y mejora continua

- **Seguimiento ambiental:** analizar los indicadores de sostenibilidad, ahorro económico y reducción de huella de carbono.
- **Mejoras del proceso:** identificar oportunidades de mejora en el aprovechamiento de los residuos incorporando nuevas aplicaciones.

### 7. Componente social:

- **Divulgación:** comunicar los beneficios del proceso en aplicación al modelo de economía circular.

- **Sensibilización y participación:** socializar con los actores las oportunidades de apertura a nuevos comercios.



Figura 26. Metodología de aprovechamiento de los lodos.

El reciclaje de residuos con aplicación en la subbase granular de los pavimentos flexibles ha demostrado que los agregados cumplen con las características de compactación, resistencia y durabilidad necesarias (BERWAL et al., 2014). Es por esto por lo que se seleccionó esta capa y un agregado ligero para aprovechar los lodos cumpliendo con un principio de economía circular. El agregado ligero producido por los lodos de fosfato presenta densidad baja y una buena porosidad lo que permite un buen desempeño, a su vez el componente principal de los agregados es el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) lo que lo convierte en un agregado ligero (Fakhfakh et al., 2015).

El pavimento está compuesto por capas superpuestas que cumplen una función estructural que recibe los esfuerzos del tránsito vehicular y los disipa en la mayor

proporción antes de transmitirlo a la subrasante, está compuesto por tres capas. Primero, la capa de rodadura o asfalto que es la que está expuesta directamente al tráfico, esta debe ser impermeable y resistente a la intemperie se compone principalmente por mezclas asfálticas de agregados pétreos. Segundo, la base granular es la principal estructura por que soporta la transferencia de las cargas de la capa de rodadura se conforma por materiales granulares. Tercero, la subbase es una capa de material su función es apoyar el soporte y el drenaje del pavimento, se conforma por materiales granulares como arenas y gravas reciclados. El medio de soporte es la subrasante que es el terreno natural en la que se construye y soporta las cargas del pavimento (Mohamed & Al-Sherrawi, 2024). En la figura 27 se muestra la estructura del pavimento, a su vez se recuerda que el uso de los lodos de estudio se hace en la subbase granular.



*Figura 27. Estructura de pavimento flexible.*

El objetivo general de la investigación fue “evaluar el uso y el aprovechamiento de los lodos generados en la industria de la roca fosfórica en Boyacá” los resultados demuestran que es posible aplicarlo en los diseños de mezcla de las subbases granulares de los pavimentos flexibles. Lo que, valida su potencialidad de aplicación, ya que poseen propiedades físicas y mecánicas similares a las de los materiales tradicionales, sin embargo, es importante reconocer que se deben realizar pruebas de calidad y de comportamiento en la práctica. Esto no solo ofrece una alternativa viable, sino que también representa una solución sostenible que se articula con los principios de la economía circular.

## Aplicación de la metodología de aprovechamiento

Siguiendo la metodología propuesta bajo una ruta de acción a continuación se presenta el uso y aprovechamiento de los lodos resultado del proceso de acidulación 85%:

### 1. Caracterización del residuo:

- **Clasificación del residuo:** mediante las técnicas de análisis del potencial Z, FRX, DRX y SEM con EDS se establece que la composición de los lodos es sílice ( $\text{SiO}_2$ ).
- **Análisis de viabilidad:** la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto que tiene varias posibilidades de utilización dada características como dureza, porosidad y resistencia.
- **Valoración de riesgos:** se debe tener cuidado con la manipulación de los lodos debido a que provienen de un proceso de acidulación y el ácido que emplean (sulfúrico) es tóxico y corrosivo.

### 2. Definición del potencial de utilización

- **Determinación de los usos:** debido al alto componente de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) se presentan varias aplicaciones, principalmente en materiales de construcción como concreto, cerámica, ladrillos y agregado en subbase granular de pavimento flexible.
- **Análisis de beneficios:** se articula con la visión de sostenibilidad la economía circular, desde el ámbito ambiental aporta a la disminución de la explotación de materias primas, desde el ámbito social fomenta la conciencia ambiental sobre la incorporación de residuos a recursos, desde el ámbito económico se generan nuevas oportunidades de negocio al innovar con la creación de productos provenientes de residuos.
- **Selección del uso:** teniendo como referente la caracterización, el análisis del estado del arte y la determinación de beneficios se establece que el mejor uso es en agregados ligeros de pavimentos, específicamente en la subbase granular.

### 3. Diseño del proceso de transformación

- **Toma de material:** los lodos se deben tomar antes de ingresar al Venturi, usando elementos de protección personal y verificando que no se vaya a contaminar el material con algún componente externo.
- **Preparación del residuo:** el lodo se debe secar en horno – mufla a 100°C durante 24 o el tiempo necesario para eliminar la humedad, en caso de presentar aglomerados se debe triturar con el fin de obtener una granulometría uniforme.

### 4. Desarrollo de prueba de mezcla agregado ligero

- **Combinación de materiales:** mezcla del material seco con arenas para cumplir los índices de compactación requeridos (proporción: 30% material seco lodo – 70% arena).

### 5. Diseño de mezcla de subbase granular

- **Proporción sugerida:** en relación con la granulometría se sugiere usar un 90% de material granular convencional y un 10% de mezcla de agregado ligero, los materiales convencionales con los que se mezcla son: recebo, caliza, arenisca y material de río.

### 6. Monitoreo y mejora continua

- **Seguimiento ambiental:** la reutilización permite reemplazar parcialmente algunos materiales tradicionales disminuyendo su explotación y las emisiones propias del procesamiento del material.
- **Mejoras del proceso:** se podría explorar las aplicaciones en productos cerámicos, ladrillos y concreto partiendo de la viabilidad que se muestra en el estado del arte.

### 7. Componente social:

- **Divulgación:** socializar con la empresa la forma en la que el desarrollo de investigaciones les genera beneficios, puesto que se encuentran elementos que le dan un valor agregado y diferencial frente a otros productores.

- **Sensibilización y participación:** invitar a la empresa a participar en investigaciones ya que hay nuevas estrategias de biocomercio desde el plan de desarrollo que invita a las organizaciones a incorporarlas dentro de sus procesos productivos por lo que la empresa empezaría a mostrar una imagen como promotora de sostenibilidad.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados encontrados en cada una de las etapas propuestas en la metodología con el fin de cumplir con los objetivos de la investigación:

### **Caracterización**

Mediante el análisis de la roca fosfórica en la técnica DRX se pudo establecer que tiene presencia de tres especies mineralógicas que son calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y fluorapatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ). Esto está directamente relacionado con la presencia de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) ya que no se descompone en el proceso productivo y es el compuesto principal presente el área de “control ambiental” y los lodos que se identificaron en esta zona. A su vez el análisis de FRX permitió establecer que los elementos más importantes y con presencia en mayor proporción en la roca fosfórica son Silicio (Si), Fósforo (P) y Calcio (Ca) lo que infiere que no hay pérdidas de Ca y P en el proceso de control ambiental. Por su parte, mediante el EDS se determinó la presencia de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) tanto en la roca fosfórica como en los lodos y se pudo corroborar con las otras técnicas de análisis ejecutadas. Mientras que el potencial Z mostró que existen varias fases por presencia de diferentes minerales, sin embargo, como se dijo anteriormente solo hay presencia de sílice lo que permite sugerir que este compuesto cristalizó en diferentes formas alotrópicas y por eso su comportamiento en este análisis.

Por su parte, frente al análisis de las muestras de aguas con la técnica de espectrofotometría, reportaron valores bajos y debido a que no se ejecutan vertimientos no se puede contrastar con normativa. Sin embargo, se recomienda

hacer monitoreo periódico y los reportes correspondientes a la autoridad ambiental de acuerdo con la solicitud. A su vez es importante realizar el análisis de fósforo para conocer la acumulación del fósforo en la recirculación, prevenir eutrofización interna con el crecimiento de algas u organismos que podría llegar a afectar el sistema y la formación de incrustaciones en las estructuras.

Se puede concluir que los lodos caracterizados muestran una especie mineralógica que es la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), compuesto que tiene la oportunidad de convertirse en materia para la obtención de diferentes materiales de construcción.

### **Usos y aplicaciones**

Se determina que los lodos fosfatados poseen una composición química que abre la posibilidad de aplicación en áreas de la ingeniería civil cumpliendo los lineamientos de la economía circular. Emplearlos como materia prima o agregados en los materiales de construcción aporta significativamente a la optimización de los residuos industriales y minimiza la demanda de recursos naturales. Su aplicación en la construcción de pavimentos se convierte en un campo adecuado de uso, específicamente en los agregados de la subbase granular, mostrando buenos comportamientos en cuanto a las propiedades mecánicas y los requerimientos geotécnicos de resistencia y durabilidad. Dentro de las capas del pavimento se contempla un uso en el asfalto ya que producen una mejora en la viscosidad siendo una alternativa adecuada para producir pavimentos de alta resistencia.

En cuanto a los concretos los lodos se convierten en una opción viable para sustituir parcialmente los agregados, lo que aporta a la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  propias del proceso industrial del cemento, así como la presión a las materias primas y por ende a los recursos naturales. En cuanto a las propiedades físico – mecánicas se ha determinado que son adecuados, ya que presentan características similares a la de los materiales convencionales. En torno a los agregados livianos de concreto se resaltan las propiedades de baja densidad y alta porosidad que mejoran el aislamiento térmico y acústico de las estructuras.

Otra área con posibilidad de aplicación es en la producción de cerámica, debido al contenido de sílice que presenta mejora en la resistencia y durabilidad de los productos cerámicos. En cuanto a los ladrillos ecológicos son una buena opción por la resistencia a compresión y las propiedades térmicas, siendo opciones para la contribución de las políticas de construcción sostenible.

A partir del análisis de la literatura se pudo establecer que existe una variedad de aplicaciones de aprovechamiento de los lodos fosfatados en diferentes materiales de construcción. Sin embargo, muchos de ellos se relacionan con la implementación en pavimentos flexibles para la construcción de carreteras siendo viables en el uso de las diferentes capas, ya que se puede emplear en los asfaltos, como agregados de concreto y como agregado ligero en la subbase granular. Por tal razón se estableció que se emplea como **agregado ligero en la sub-base granular del pavimento flexible.**

## IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO

El desarrollo sostenible es un desafío actual, mediante la formulación de proyectos con esta visión se puede aportar al cumplimiento de esas metas globales. Es importante mencionar que la investigación se articula con los objetivos del Millennium Project específicamente con el 1 y el 14, por su parte el 1 hace referencia al desarrollo sostenible y la forma en la que se debe hacer frente al cambio climático. Puesto que con la investigación se habla de una gestión adecuada de los residuos y el aprovechamiento mediante una visión de economía circular, se relaciona directamente con la mitigación de impactos. En cuanto al objetivo 14 que habla sobre los avances científicos y tecnológicos para la mejora de la condición humana, ya que la investigación se enfoca en la generación de nuevo conocimiento. En el marco del desarrollo de procedimientos que permiten que la empresa mejore su capacidad y productividad siendo referente por el valor agregado que presenta y la solución en términos de innovación con aplicación en pavimentos en la construcción de vías. Respecto a los objetivos de desarrollo sostenible, se determina que favorece el 12 "consumo y producción responsable" al emplear los lodos de fosfato como agregado en las subbases granulares de los pavimentos flexibles.

Este enfoque contribuye no solo a cumplimiento del ODS 12 sino que también al desempeño de la "Estrategia Nacional de Economía Circular<sup>1</sup>", evitando que los residuos se conviertan en desechos, transformar estos residuos en productos útiles, aporta a mitigar la contaminación. Promueve la sostenibilidad en la producción y se genera cadenas de valor que brindan una ventaja competitiva a la organización. Por su parte en el plan nacional de desarrollo "Colombia, potencia mundial de la vida 2022 - 2026" se identifica que uno de los objetivos es cambiar la conducta de la población frente a el ambiente. La transformación en la forma de producir bienes y una visión de cuidado y preservación de la naturaleza, entorno a la aplicación en el proyecto resalta la transformación del sector productivo en camino a establecer

---

<sup>1</sup> <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>

economías limpias apoyadas en el eje “transformación productiva, internacionalización y acción climática<sup>2</sup>” que busca fomentar cadenas de producción con capacidad pero que sean amigables con el ambiente. Así mismo, se relacionan con los principios de biocomercio<sup>3</sup> que priorizan las alternativas que aportan a la conservación de la biodiversidad y el uso sostenible del ecosistema, ya que el aprovechamiento reduce la carga sobre las canteras al minimizar la extracción de materiales, la aplicación en la construcción implica un uso eficiente de recursos.

Para la entidad genera varios beneficios en los que se resalta la nueva oportunidad de negocio, la diversificación de los bienes ofrecidos, mediante la innovación y el desarrollo de productos con fines económicos generando una alternativa para nuevos ingresos, a su vez abre paso a nuevos mercados donde fortalece su imagen corporativa.

Entorno al análisis aplicativo del proyecto se puede determinar que socialmente se aporta a la creación de nuevos puestos de trabajo con la revalorización de materiales. A su vez se contribuye a la formación de conciencia y educación ambiental al comprender las aplicaciones de la reconversión de residuos a recursos. Económicamente se abre paso a oportunidades de negocio en nuevos mercados con la posibilidad de ampliar su área de comercialización de productos, ambientalmente, se aporta a la conservación de los ecosistemas ya que se reduce la presión sobre los recursos naturales. Siendo así, se puede concluir que la investigación permite comprender que el uso y aprovechamiento de residuos es una estrategia clave para el cumplimiento de los objetivos, planes o estrategias internacionales y nacionales en un área que día por día cobra más importancia.

---

<sup>2</sup><https://www.minambiente.gov.co/planeacion-y-seguimiento/plan-nacional-de-desarrollo-componente-ambiental/>

<sup>3</sup> <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/negocios-verdes-y-sostenibles/herramientas-para-la-competitividad-y-promocion-de-los-negocios-verdes/biocomercio>

## CONCLUSIONES

- El insumo que emplean para acidular la roca fosfórica y mejorar su solubilidad, es el ácido sulfúrico que presenta características altas de corrosión y toxicidad, razón por la que las estructuras están presentando desgaste y puede acarrear gastos a largo plazo por mantenimiento o remplazo de la infraestructura debido al deterioro.
- Se cumplió el objetivo general de evaluar la posibilidad de aprovechar los lodos generados en la industria de la roca fosfórica de Boyacá, dando como resultados varias aplicaciones en la rama de la ingeniería civil, específicamente en la sustitución parcial de componentes de materiales de construcción.
- Se evidenció que el uso de lodos como insumos en la aplicación de agregado en la subbase granular del pavimento flexible es una táctica eficaz y sustentable. Los análisis demuestran que convertir residuos en recursos valiosos no solo contribuye a disminuir la recarga en los ecosistemas, sino que también genera ventajas económicas. Estas acciones ayudan a forjar una cultura de sostenibilidad, reforzando tanto el compromiso social como el empresarial bajo los fundamentos de la economía circular.
- Se propone una metodología práctica y sostenible para la utilización de lodos residuales producidos en la industria de la roca fosfórica en Boyacá, a partir de un estudio técnico, estructural y sistémico, se elaboró una estrategia enfocada en minimizar residuos y maximizar recursos, en concordancia con los principios de sostenibilidad.
- La metodología no solo propone una ruta para el uso del lodo resultado del proceso de acidulación 85%, sino que también brinda una perspectiva flexible para tratar los otros residuos industriales, favoreciendo de esta manera la economía circular y el fomento de prácticas responsables en la industria.

## RECOMENDACIONES

- Debido a que solo se caracterizaron los lodos generados en el proceso productivo del 85% de acidulación es importante caracterizar los lodos de los 4 productos restantes mediante el análisis de las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y morfológicas empleando las técnicas de potencial Z, FRX, DRX y SEM con EDS.
- Monitorear las aguas que se generan en los puntos de recirculación Venturi, cono torre separadora y chimenea, en análisis a parámetros fisicoquímicos.
- Evaluar las propiedades del material modificado siguiendo las indicaciones del Art 320 de las especificaciones generales de construcción de carreteras – INVIAS específicamente el análisis de calidad de agregados indicados en la Tabla 320-2.
- Validar a escala piloto (tramo experimental de vía) el diseño de mezcla de pavimento propuesto para evaluar su desempeño en la práctica identificando comportamiento bajo carga (transito) y compactación en construcción.
- Ejecutar un estudio de mercado que incluya, análisis técnico, de factibilidad y de viabilidad para evaluar la posibilidad de invertir en infraestructura que permita el escalamiento industrial para la producción en masa.
- Buscar alianzas estratégicas con otras industrias para el intercambio o comercialización del agregado ligero para subbase granular del pavimento flexible propuesto.
- Diseñar programas de responsabilidad social corporativa para visibilizar la aplicación y beneficios sostenibles de la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., & Siddique, S. (2021). A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction. In *Construction Materials* (Vol. 1, Issue 1, pp. 39–62). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/constrmater1010003>
- Alegre JC, & Chumbimune R. (1991). *Investigaciones y usos de la roca fosfórica en el Perú*.
- Al-Othman, A. O., & Sweileh, J. A. (2000). Phosphate rock treatment with citric acid for the rapid potentiometric determination of fluoride with ion-selective electrode. *Talanta*, 51(5), 993–999. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(99\)00361-6](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(99)00361-6)
- Alvarez, C., & Pallo, J. (2024). *C.Alvarez\_J.Pallo\_Tesis\_Titulo\_Profesional\_2024*.
- Amrani, M., El Haloui, Y., Hajikarimi, P., Sehaqui, H., Hakkou, R., Barbachi, M., & Taha, Y. (2020). Feasibility of using phosphate wastes for enhancing high-temperature rheological characteristics of asphalt binder. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(5), 1407–1417. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01026-1>
- Amrani, M., Taha, Y., Kchikach, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2019). Valorization of phosphate mine waste rocks as materials for road construction. *Minerals*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/min9040237>
- ANFFE. (2008). *LA IMPORTANCIA DE LOS FERTILIZANTES*.
- Bahhou, A., Taha, Y., El Khessaimi, Y., Idrissi, H., Hakkou, R., Amalik, J., & Benzaazoua, M. (2020). Use of phosphate mine by-products as supplementary cementitious materials. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3781–3788. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.619>

- Bellmann, M. (1992). *Plant for removing dust from and for scrubbing gas*.
- Benbrik, B., Elabed, A., El Modafar, C., Douira, A., Amir, S., Filali-Maltouf, A., El Abed, S., El Gachtouli, N., Mohammed, I., & Koraichi, S. I. (2020). Reusing phosphate sludge enriched by phosphate solubilizing bacteria as biofertilizer: Growth promotion of Zea Mays. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *30*, 101825. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2020.101825>
- BERWAL, P., AGGARWAL, DR. P., & GOEL, DR. R. (2014). Use of Recycled Aggregates in Granular Sub Base. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, *03*(10), 16973–16980. <https://doi.org/10.15680/ijirset.2014.0310078>
- Bouwman, L., Goldewijk, K. K., Van Der Hoek, K. W., Beusen, A. H. W., Van Vuuren, D. P., Willems, J., Rufino, M. C., & Stehfest, E. (2013). Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(52), 20882–20887. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012878108>
- Bustamante-Rúa, M. O., Daza-Aragón, A. J., Bustamante-Baena, P., & Osorio-Botero, J. D. (2019). Recovery evaluation of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> through three models of froth flotation of phosphoric rock. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, *45*, 41–46. <https://doi.org/10.15446/rbct.n45.72354>
- Carneiro, J., Tobaldi, D. M., Capela, M. N., Novais, R. M., Seabra, M. P., & Labrincha, J. A. (2018). Synthesis of ceramic pigments from industrial wastes: Red mud and electroplating sludge. *Waste Management*, *80*, 371–378. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2018.09.032>
- Chen, B., Jin, C., Qu, G., Yang, J., Liu, Y., Qin, J., Kuang, L., Li, H., He, M., & Dan, Y. (2023). Waste Treatment and Resource Utilization: Removal and recovery of soluble impurities from nitric acid leaching residue of phosphate rock by

electrokinetic. *Electrochimica Acta*, 449, 142231.  
<https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2023.142231>

Chien, N., Prochnow, L., & Mikkelsen, R. (2009). *Informaciones Agronómicas-No. 1 USO AGRONÓMICO DE LA ROCA FOSFÓRICA PARA APLICACIÓN DIRECTA.*

Cisse, L. K., Laquerbe, M., Gayd, A., & Diene, M. (1999). Caractérisation des b6tons de sable routiers compact6s: application au cas du S6n6gal (Characterisation of compacted road sandcretes: Study applied to Senegal). In *Dakar (S&dgal) Article refu : 9juillet* (Vol. 32).

Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. (2009). The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), 292–305.  
<https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2008.10.009>

David, S. A. L., & Caro, B. (2021). *OPTIMIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LA EMPRESA DE FOSFATOS DE BOYACÁ S.A.*

El Machi, A., Mabroum, S., Taha, Y., Tagnit-Hamou, A., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2021). Use of flint from phosphate mine waste rocks as an alternative aggregates for concrete. *Construction and Building Materials*, 271, 121886.  
<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121886>

El Zrelli, R., Rabaoui, L., Daghbouj, N., Abda, H., Castet, S., Josse, C., van Beek, P., Souhaut, M., Michel, S., Bejaoui, N., & Courjault-Radé, P. (2018). Characterization of phosphate rock and phosphogypsum from Gabes phosphate fertilizer factories (SE Tunisia): high mining potential and implications for environmental protection. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14690–14702. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1648-4>

Elser, J., & Bennett, E. (2011). Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle. In *Nature* (Vol. 478, Issue 7367, pp. 29–31). <https://doi.org/10.1038/478029a>

EMP. (2020). *NORMA DE CONSTRUCCIÓN SUB-BASE Y BASE PARA PAVIMENTO*.

Espinel Pérez, N. M., Pazos, M. C., Parra, E., & Martínez, D. (2022). CALCINATION OF PHOSPHORIC ROCK BY TORCH PLASMA, TO OBTAIN THERMOPHOSPHATES FERTILIZERS. *Revista Colombiana de Materiales*, 18, 54–68. <https://doi.org/10.17533/rcm/udea.rcm.n18a05>

Ettoumi, M., Jouini, M., Neculita, C. M., Bouhlel, S., Coudert, L., Taha, Y., & Benzaazoua, M. (2021). Characterization of phosphate processing sludge from Tunisian mining basin and its potential valorization in fired bricks making. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124750. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124750>

EuroChem Group. (2024). *DAP 18-46 (Fosfato Diamónico)*. <https://www.eurochemiberia.com/product/dap-18-46/>

Fakhfakh, E., Khiari, I., Hajjaji, W., Medhioub, M., Rocha, F., López-Galindo, A., & Jamoussi, F. (2015). Production of lightweight aggregates from phosphate washing plant sludge. In *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation* (pp. 59–63). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-09048-1_11)

FAO. (2019). *World fertilizer trends and outlook to 2022*.

FAO & IFA. (2002). *Los fertilizantes y su uso*. <http://www.fertilizer.org>,

Feijoo, P., Bustamante, E., & Guillén, C. (2021). Curvas granulométricas como alternativa para la caracterización del material rocoso en minería. *Athenea*, 2(3), 28–39. <https://doi.org/10.47460/athenea.v2i3.14>

Fernández, F. J., Martínez, A., & Alvarez-Vázquez, L. J. (2019). *An optimization problem related to water artificial recirculation for controlling eutrophication*. <http://arxiv.org/abs/1902.00283>

- Francisco Anticoi Sudzuki Directors, H., & Pura Alfonso Abella Josep Oliva Moncunill, D. (2019). *Strategic Minerals Milling Modelling of High Pressure Grinding Rolls and Process Parameters Dependency*.
- Garrido, A. (2023). *VALIDACIÓN DE UN MÉTODO ANALÍTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE FÓSFORO TOTAL EN AGUAS NATURALES Y RESIDUALES POR EL MÉTODO DEL ÁCIDO ASCÓRBICO*.
- Guevara, C. S. (2024). *Datos, análisis e investigaciones sobre el sistema agroalimentario y otros factores de poder mundial*. <https://alimentosypoder.com/2024/03/11/la-produccion-de-roca-fosforica-en-el-mundo-2023/>
- Hakkou, R., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2016). Valorization of Phosphate Waste Rocks and Sludge from the Moroccan Phosphate Mines: Challenges and Perspectives. *Procedia Engineering*, 138, 110–118. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.02.068>
- Harech, M. A., Anasser, I., Labbilta, T., Abouliatim, Y., El Hafiane, Y., Nibou, L., Smith, A., & Mesnaoui, M. (2024). Sustainable valorization of mining waste: Phosphate sludge repurposing for advanced ceramic production. *Open Ceramics*, 19, 100640. <https://doi.org/10.1016/J.OCERAM.2024.100640>
- Harech, M. A., Labbilta, T., Anasser, I., El hafiane, Y., Abouliatim, Y., Nibou, L., Smith, A., & Mesnaoui, M. (2023). From by-product to sustainable building material: Reusing phosphate washing sludge for eco-friendly red brick production. *Journal of Building Engineering*, 78, 107575. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107575>
- Heffer, P., & Prud'homme, M. (2010). *International Fertilizer Industry Association (IFA) International Fertilizer Industry Association (IFA)-28, rue Marbeuf-75008*.
- Herrera Herbert, J. (2020). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I: Características generales. In *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. I:*

*Características generales*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.  
<https://doi.org/10.20868/upm.book.62723>

Idrissi, H., Taha, Y., Elghali, A., El Khessaimi, Y., Aboulayt, A., Amalik, J., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2021). Sustainable use of phosphate waste rocks: From characterization to potential applications. *Materials Chemistry and Physics*, 260, 124119. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2020.124119>

Inabi, O., Khalil, A., Zouine, A., Hakkou, R., Benzaazoua, M., & Taha, Y. (2024). Investigation of the Innovative Combined Reuse of Phosphate Mine Waste Rock and Phosphate Washing Sludge to Produce Eco-Friendly Bricks. *Buildings*, 14(9), 2600. <https://doi.org/10.3390/buildings14092600>

Izydorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., & Chojnacka, K. (2022). Granulation as the method of rational fertilizer application. *Smart Agrochemicals for Sustainable Agriculture*, 163–184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817036-6.00003-0>

Jones, G., Scullion, J., Dalesman, S., Robson, P., & Gwynn-Jones, D. (2023). Acidification increases efficiency of Lemna minor N and P recovery from diluted cattle slurry. *Cleaner Waste Systems*, 6, 100122. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2023.100122>

Khalil, M., Ruggieri, S., & Uva, G. (2022). Assessment of Structural Behavior, Vulnerability, and Risk of Industrial Silos: State-of-the-Art and Recent Research Trends. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app12063006>

Lessard, J., De Bakker, J., & McHugh, L. (2014). Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. *Minerals Engineering*, 65, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.019>

- Loutou, M., Taha, Y., Benzaazoua, M., Daafi, Y., & Hakkou, R. (2019). Valorization of clay by-product from moroccan phosphate mines for the production of fired bricks. *Journal of Cleaner Production*, 229, 169–179. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.003>
- MacEachern, M., Sanchez, X., & Oh, W. T. (2021). Mechanical Properties of Aggregates for Roadbase Partially Replaced with Reclaimed Asphalt Shingles. *International Journal of Civil Engineering*, 19(3), 233–243. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00566-9>
- Market Research Intellect. (2024). *El mercado de roca fosfórica crece a medida que aumentan las demandas agrícolas mundiales.*
- Mohamed, S. K., & Al-Sherrawi, M. H. (2024). Influence of Base Layer Thickness and Property on Flexible Pavement Behavior. *Journal of Engineering*, 30(06), 188–201. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2024.06.12>
- Nils, P., & Mannkhajm, T. (2020). *Mixture for processing urea containing fertilizers.*
- Ouarga, A., Zirari, T., Fashu, S., Lahcini, M., Ben Youcef, H., & Trabadelo, V. (2023). Corrosion of iron and nickel based alloys in sulphuric acid: Challenges and prevention strategies. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 5105–5125. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2023.08.198>
- Palencia Angelica, & Granados German. (2019). *ANALISIS DE METODOS Y TIEMPOS EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE ROCA FOSFORICA EN LA EMPRESA FOSFONORTE S.A., CÚCUTA.*
- Quiñones, M. (2019). *SÍNTESIS DE FERTILIZANTES EN UN REACTOR A ESCALA LABORATORIO USANDO COMO INGREDIENTES ACTIVOS FOSFITO DE MANGANESO Y CALCIO.*
- R. Andrade, B., A. Rivera, M., & Lora Guzmán, H. (2018). El empaque como oportunidad para el desarrollo del producto y el consumidor responsable; una mirada desde la industria en Norteamérica y Suramérica. *Saber, Ciencia y*

*Libertad*, 13(1), 164–179. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2018v13n1.2558>

Razak, S. M., Yahya, N., Zahid, M. Z., Bulkini, A. K., Adiyanto, M. I., Harith, N. S. H., Rizalman, A. N. F., & Mohamad, M. E. (2023). Improving sustainability of road construction by partial replacement of natural aggregates in subbase layer with crushed brick and reclaimed asphalt pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1135(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1135/1/012050>

Safhi, A. el M., Amar, H., El Berdai, Y., El Ghorfi, M., Taha, Y., Hakkou, R., Al-Dahhan, M., & Benzaazoua, M. (2022a). Characterizations and potential recovery pathways of phosphate mines waste rocks. *Journal of Cleaner Production*, 374, 134034. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134034>

Safhi, A. el M., Amar, H., El Berdai, Y., El Ghorfi, M., Taha, Y., Hakkou, R., Al-Dahhan, M., & Benzaazoua, M. (2022b). Characterizations and potential recovery pathways of phosphate mines waste rocks. *Journal of Cleaner Production*, 374, 134034. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.134034>

Schindler, D. W., Carpenter, S. R., Chapra, S. C., Hecky, R. E., & Orihel, D. M. (2016). Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science and Technology*, 50(17), 8923–8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>

Scholz, R. W., Amit, ., Roy, H., Brand, F. S., Hellums, D. T., & Ulrich, A. E. (2014). *Sustainable Phosphorus Management*.

Scholz, R. W., Roy, A. H., & Hellums, D. T. (2014). Sustainable phosphorus management: A transdisciplinary challenge. In *Sustainable Phosphorus Management: A Global Transdisciplinary Roadmap* (pp. 1–128). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7250-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7250-2_1)

- Skut, J., Hoffmann, K., & Hoffmann, J. (2012). Temperature and moisture influence on the curing process of PAPER-type fertilizer products. *Polish Journal of Chemical Technology*, 14(3), 77–82. <https://doi.org/10.2478/v10026-012-0088-z>
- Soto, A. (2000). *UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA*.
- Souza Piao, R., de Vincenzi, T. B., da Silva, A. L. F., de Oliveira, M. C. C., Vazquez-Brust, D., & Monteiro Carvalho, M. (2023). How is the circular economy embracing social inclusion? *Journal of Cleaner Production*, 411, 137340. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137340>
- Taha, Y., Elghali, A., Hakkou, R., & Benzaazoua, M. (2021). Towards zero solid waste in the sedimentary phosphate industry: Challenges and opportunities. *Minerals*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/min11111250>
- Tamayo Orbegoza, U., Molinaa, M. A. V., & Olaizolab, J. I. (2012). La gestión de residuos en la empresa: motivaciones para su implantación y mejoras asociadas. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de La Empresa*, 18(3), 216–227. <https://doi.org/10.1016/J.IEDEE.2012.05.001>
- Torres Tamayo, E. (2003). *Análisis de la influencia del régimen de temperatura en el secado del mineral laterítico*. <https://www.researchgate.net/publication/277233069>
- UBCO. (2023). *Desarrollan un nuevo método para recuperar fósforo de los lodos de aguas residuales*.
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2005). *REPUBLICA DE COLOMBIA MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA TERMINOS DE REFERENCIA (Borrador) CONCURSO No. 011 de 2005 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA PRODUCTIVA Y MERCADOS DE LA ROCA FOSFÓRICA*. <http://www.upme.gov.co>

- Valdés López, A., Julio López Bastida, E., & Alonso Aguilera, A. (2019). *INDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT AND SUSTAINABILITY. NECESSITY OF AN ECOLOGICAL ECONOMICS APPROACH. 4*. <https://orcid.org/0000-0002-8503-3025>
- Van Vuuren, D. P., Bouwman, A. F., & Beusen, A. H. W. (2010). Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. *Global Environmental Change*, *20*(3), 428–439. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2010.04.004>
- Withers, P. J. A., Sylvester-Bradley, R., Jones, D. L., Healey, J. R., & Talboys, P. J. (2014). Feed the crop not the soil: Rethinking phosphorus management in the food chain. *Environmental Science and Technology*, *48*(12), 6523–6530. <https://doi.org/10.1021/es501670j>
- Xing, W., Tam, V. W., Le, K. N., Hao, J. L., & Wang, J. (2022). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. *Construction and Building Materials*, *317*, 125950. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125950>
- Xuejiang, W. (2016). *Fertilizer granular drying device with waste heat comprehensive utilization function*.
- Zholud, A. S., Derbyshev, A. S., & Dulepov, Y. N. (2012). USE OF CORROSION-RESISTANT STEELS AND ALLOYS IN SULFURIC ACID MEDIA MATERIALS SCIENCE AND CORROSION PROTECTION. In *Chemical and Petroleum Engineering* (Vol. 47).
- Zschimmer & Schwarz. (2021). *Fertilizantes agrícolas\_ tipos de fertilizantes, usos y beneficios - ZS España*.

## ANEXOS

Anexo 1. Certificado de participación - 4to. Congreso Internacional de Ingeniería de Minerales.



UNIDAD ACADÉMICA  
MULTIDISCIPLINARIA  
REGIÓN ALTIPLANO



La Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad Industrial de Santander, a través de la Unidad Académica Multidisciplinaria Región Altiplano otorga el presente:

# RECONOCIMIENTO

**A:** M. C. Elisa María Avellaneda Díaz, Profa. Sandra Consuelo Díaz Bello


Por su valiosa participación como PONENTE del tema titulado: Aprovechamiento de los lodos generados en la industria de la explotación y transformación de la roca fosfórica en Boyacá en el 4to. Congreso Internacional de Ingeniería de Minerales en honor al Dr. Ignacio González Martínez, 28 y 29 de agosto 2024 y en conmemoración del 70 aniversario del programa en Ingeniería Metalúrgica de la UIS. Con duración de (31 horas)

Matehuala, S.L.P., a 29 de agosto de 2024

“SIEMPRE AUTONÓMA, POR MI PATRIA EDUCARÉ

  
**Dr. Isaac Compeán Martínez**  
Director de la Unidad Académica  
Multidisciplinaria Región Altiplano de la  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
México



  
**Dr. Ángel Manuel Meléndez Reyes**  
Director de Escuela de Ingeniería  
Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de  
la Universidad Industrial de Santander,  
Colombia



La versión electrónica del presente documento, su integridad y autoría se podrá comprobar a través de la página <https://validacion-coara.uaslp.mx/ValidaReconocimiento.aspx>. De igual manera verificar el documento electrónico por medio del código QR.

FOLIO: 804047



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

**La Universidad de Sonora**  
a través del  
**Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales**



OTORGA LA PRESENTE CONSTANCIA A:

**Elisa María Avellaneda Díaz**

Por su valiosa participación en el programa de ponencias virtuales, con el tema:  
**"APROVECHAMIENTO DE LOS LODOS GENERADOS EN LA INDUSTRIA DE LA EXPLOTACIÓN Y  
TRANSFORMACIÓN DE LA ROCA FOSFÓRICA EN BOYACÁ"** siendo coautor de este trabajo

Sandra Consuelo Díaz Bello

en el

**TERCER CONGRESO INTERNACIONAL**

*Objetivos de Desarrollo Sostenible:*

*Avances, metas y perspectivas a mitad del camino*

Evento efectuado de forma híbrida del 16 al 18 de octubre de 2024, Hermosillo, Sonora, México

Dra. Teresa del Castillo Castro

Jefa del Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales  
Universidad de Sonora

Dra. Juana Alvarado Ibarra  
Presidente del Comité Organizador

