

**Evaluación preliminar a escala laboratorio de la aplicación de compost para la
recuperación de suelos contaminados de residuos de minería**

Anyi Paola Acosta Salamanca y Lesly Marcela Sánchez Gómez

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Químico
Modalidad trabajo de investigación

Directora

Viviana Sánchez Torres

Ph.D. Ingeniera Química

Codirector

Pedro Luis Delvasto Angarita

Ph.D. Ingeniero de Materiales

Codirector

Edgar Ricardo Oviedo Ocaña

Ph.D. Ingeniero Sanitario

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2024

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Estado del arte	14
3. Descripción metodológica.....	17
3.1 Etapa I. Efecto de la adición de compost y enmiendas inorgánicas alcalinizantes en la tendencia a lixiviar de los relaves	17
3.1.1 Determinación de la cantidad de agua de alimentación para las columnas de lixiviación..	20
3.2 Etapa II. Determinación de la viabilidad de la microbiota y la tendencia a germinar	21
3.2.1 Conteo microbiológico de células bacterianas en los lixiviados de las columnas	21
3.2.2 Determinación de fitotoxicidad mediante bioensayos de germinación.....	22
3.3 Etapa III. Evaluación de los cambios fisicoquímicos registrados en los sólidos de las columnas de lixiviación	22
3.3.1 Determinación del fósforo soluble presente en las muestras líquidas mediante el Método SM 4500-PE.....	23
3.3.2 Fluorescencia de rayos X (Na-U) de las muestras sólidas de relave.....	23
3.3.3 Determinación de la cristalinidad y fases de las películas por medio de la difracción de rayos X de las muestras sólidas de relave.....	23
4. Resultados y discusión	25
4.1 Caracterización de los componentes de las columnas.....	25
4.1.1 Caracterización del relave usado en las columnas de lixiviación.....	25
4.1.2 Caracterización del compost usado como componente en las columnas de lixiviación	26
4.2 Análisis químico de metales en el lixiviado por medio de absorción atómica.....	26
4.3 Cambios de pH, conductividad eléctrica y crecimiento de comunidad microbiana en los lixiviados de las columnas	28
4.4 Determinación de la fitotoxicidad en las muestras sólidas de las columnas	35
4.5 Determinación de fósforo soluble mediante el método SM 4500-PE	37
4.6 Análisis químico mediante fluorescencia de rayos X.....	38
4.7 Análisis mineralógico de los sólidos de las columnas antes y después de la irrigación por difracción de rayos X.....	39

5. Conclusiones..... 44
Referencias bibliográficas..... 46
Apéndices..... 50

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Configuración de cada mezcla que compone la columna de lixiviación</i>	18
Tabla 2. <i>Análisis químico por fluorescencia de rayos x del relave minero aurífero</i>	25
Tabla 3. <i>Caracterización del compost</i>	26
Tabla 4. <i>Composición mineralógica del relave inicial</i>	42
Tabla 5. <i>Composición mineralógica de la muestra de tratamiento 1 final después de 10 semanas de irrigación</i>	42
Tabla 6. <i>Composición mineralógica del tratamiento 2 inicial</i>	42
Tabla 7. <i>Composición mineralógica del tratamiento 2 final</i>	43
Tabla C1. <i>Índice de germinación de las muestras sólidas</i>	51
Tabla C2. <i>Análisis estadístico del índice de germinación</i>	51
Tabla D1. <i>Composición química de una muestra de tratamiento 1 final</i>	51
Tabla D2. <i>Composición química de una muestra del tratamiento 2 inicial</i>	52
Tabla D3. <i>Composición química de una muestra del tratamiento 2 final</i>	53

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Descripción metodológica experimental del proyecto</i>	17
Figura 2. <i>Materiales usados para la composición de las columnas de lixiviación</i>	19
Figura 3. <i>Montaje experimental de las columnas de lixiviación con la respectiva agua de alimentación en cada columna</i>	20
Figura 4. <i>Concentración de plomo presente en el lixiviado de las columnas</i>	28
Figura 5. <i>Concentración de mercurio presente en el lixiviado de las columnas</i>	28
Figura 6. <i>Cambios del pH en el lixiviado de las columnas</i>	30
Figura 7. <i>Relación entre pH y la disponibilidad de nutrientes. Modificado de Weil y Brady (2014)</i>	31
Figura 8. <i>Cambios de la conductividad eléctrica en el lixiviado de las columnas</i>	32
Figura 9. <i>Concentración de microorganismos en el lixiviado de las columnas</i>	34
Figura 10. <i>Diagrama de cajas del índice de germinación</i>	36
Figura 11. <i>Diagrama de Tukey para índice de germinación</i>	37
Figura 12. <i>Contenido de fósforo soluble biodisponible en cada tratamiento</i>	38
Figura 13. <i>Difractograma del relave inicial y el tratamiento 2 inicial</i>	41
Figura 14. <i>Difractograma de la muestra del tratamiento 2 inicial y final</i>	41
Figura 15. <i>Relave + Compost</i>	54
Figura 16. <i>Relave + Compost+ Residuo siderúrgico</i>	54
Figura 17. <i>Relave + Compost + Piedra caliza</i>	54
Figura 18. <i>pH de cada uno de los tratamientos iniciales</i>	55
Figura 19. <i>Equipo usado para la medición del pH y la conductividad eléctrica - Medidor portátil HI9814</i>	55
Figura 20. <i>Lixiviados de los tratamientos</i>	56
Figura 21. <i>Siembra de semillas de rábano en cajas Petri</i>	56
Figura 22. <i>Resultado de germinación de las semillas de rábano en cada uno de los tratamientos</i>	57
Figura 23. <i>Largo de la radícula de una semilla de rábano</i>	57
Figura 24. <i>Almacenamiento de semillas</i>	57
Figura 25. <i>Preparación de muestras de fosfato</i>	58
Figura 26. <i>Muestras finales de fosfato</i>	58
Figura 27. <i>Estudio del fosfato biodisponible</i>	59

Figura 28. *Muestras sólidas en la semana 10 del tratamiento* 62

Figura 29. *Submuestras enviadas al laboratorio de rayos X UIS*..... 62

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Caracterización química de la mezcla inicial compostada	50
Apéndice B. Caracterización química del residuo siderúrgico	50
Apéndice C. Análisis estadístico del Índice de germinación	51
Apéndice D. Fluorescencia de rayos x de las muestras sólidas de las columnas.....	51
Apéndice E. Realización de mezclas para los tratamientos	54
Apéndice F. pH de cada uno de los tratamientos iniciales.....	55
Apéndice G. Muestras recolectadas del lixiviado de los tratamientos.....	56
Apéndice H. Sección del muestreo realizado para el índice de germinación	56
Apéndice I. Sección de fosfato biodisponible.....	58
Apéndice J. Sección Fluorescencia y Difracción de rayos X	62

Resumen

Título: Evaluación preliminar a escala laboratorio de la aplicación de compost para la recuperación de suelos contaminados de residuos de minería *

Autor: Anyi Paola Acosta Salamanca y Lesly Marcela Sánchez Gómez**

Palabras Clave: Enmiendas alcalinas, enmiendas inorgánicas, absorción, germinación.

Descripción: El relave aurífero es un subproducto de la extracción de oro en la minería que genera problemas ambientales por los compuestos tóxicos que liberan. La aplicación de enmiendas orgánicas como el compost al relave aumenta la retención de agua y nutrientes disponibles, promoviendo el desarrollo de la comunidad microbiana; mientras que enmiendas inorgánicas como el residuo siderúrgico y la piedra caliza ayudan en la movilidad de contaminantes y reducción de toxicidad.

Esta investigación se basa en evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas-inorgánicas en la estabilización de relaves realizando el montaje de cinco columnas por duplicado, conformadas de la siguiente manera: tratamiento 1 (arena + relave), tratamiento 2 (arena + relave + compost), tratamiento 3 (arena + relave + compost + residuo siderúrgico), tratamiento 4 (arena + relave + compost + piedra caliza) y tratamiento 5 (arena). Durante diez semanas las columnas se alimentaron con 15 L de agua destilada. El tratamiento 2 presentó los mejores resultados para pH, conductividad eléctrica y microorganismos, teniendo valores de 7,0, 0,01 mS y 25000 [cel/ml], respectivamente. Por medio de absorción atómica se determinó al lixiviado la concentración de metales como: plomo con un valor de [0,01 mg/L], para hierro y mercurio no se evidenció concentración final. Para la medición del índice de germinación se tomaron muestras sólidas de cada una de las columnas, se observó que todos los tratamientos ayudan al crecimiento de la vegetación, excepto el tratamiento 1 donde el índice de germinación fue inferior al 80%. Para los análisis mineralógicos por difracción de rayos X se tomaron muestras al inicio y al final del tratamiento 1 y 2, encontrando fases minerales como: cuarzo, pirita, blenda, cianita y sulfato de potasio y zinc.

El tratamiento 3 reflejó un aumento de fosfatos solubles biodisponibles pasando de un valor de PO_4^{-3} de [0,27 mg/L] a [0,53 mg/L]. El experimento realizado entrega resultados positivos sobre la aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas a relaves auríferos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Viviana Sánchez Torres. Ph.D. Ingeniera Química. Codirectores: Pedro Luis Delvasto Angarita. Ph.D. Ingeniero de Materiales y Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ph.D. Ingeniero Sanitario.

Abstract

Title: Preliminary evaluation at laboratory scale of the application of compost for the recovery of contaminated mining waste soils*

Author (s): Anyi Paola Acosta Salamanca and Lesly Marcela Sánchez Gómez**

Keywords: Alkaline amendments, inorganic amendments, absorption, germination.

Description: Gold tailings are a by-product of gold extraction in mining that generates environmental problems due to the toxic compounds they release. The application of organic amendments such as compost to tailings increases the retention of water and available nutrients, promoting the development of the microbial community, while inorganic amendments such as steel residue and limestone help in the mobility of contaminants and reduction of toxicity.

This research is based on evaluating the effect of the application of organic-inorganic amendments in the stabilization of tailings by assembling five columns in duplicate, formed as follows: treatment 1 (sand + tailings), treatment 2 (sand + tailings + compost), treatment 3 (sand + tailings + compost + steel residue), treatment 4 (sand + tailings + compost + limestone) and treatment 5 (sand). The columns were fed with 15 L of distilled water for ten weeks. Treatment 2 presented the best results for pH, electrical conductivity and microorganisms, with values of 7,0, 0,01 mS and 25000 [cell/ml], respectively. By means of atomic absorption, the concentration of metals such as lead was determined in the leachate with a value of [0,01 mg/L]; for iron and mercury there was no final concentration. For the measurement of the germination index, solid samples were taken from each of the columns. It was observed that all the treatments helped the growth of the vegetation, except for treatment 1, where the germination index was less than 80%. For the mineralogical analysis by X-ray diffraction, samples were taken at the beginning and end of treatment 1 and 2, finding mineral phases such as: quartz, pyrite, blende, cyanite and potassium and zinc sulfate.

Treatment 3 reflected an increase in bioavailable soluble phosphates from a PO_4^{3-} value of [0,27 mg/L] to [0,53 mg/L]. The experiment conducted provides positive results on the application of organic and inorganic amendments to auriferous tailings.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. Chemical Engineering School. Director: Viviana Sánchez Torres. Ph.D. Chemical Engineer. Co-Directors: Pedro Luis Delvasto Angarita. Ph.D. Materials Engineer and Edgar Ricardo Oviedo Ocaña. Ph.D. Sanitary Engineer.

Introducción

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes en el planeta ya que tarda miles de años en formarse, desempeñando un papel importante para la supervivencia y desarrollo (Charles, 2001). La humanidad lo utiliza en la producción alimentaria, extracción de materiales o soporte de construcciones. Las explotaciones mineras pueden ser causa y origen de fuertes impactos sobre el suelo, debido principalmente a los grandes volúmenes de materiales que se desplazan, creando huecos y escombreras (relaves) que cambian la fisiografía de la zona y alteran las características productivas del terreno, dando lugar a problemas ambientales, ecológicos y paisajísticos en la zona donde se ubica la operación minera y en muchas ocasiones trascendiendo a los alrededores (Paradelo, 2013).

Las actividades mineras son una de las principales vías de ingreso directo de metales pesados al ambiente, particularmente las de explotación de oro, plata y mercurio. En estos sitios, el suelo puede presentar altos niveles de contaminación, como se evidencia en la región del río Amazonas, la Guayana Francesa y el distrito minero de Almadén (España), entre otros (Reyes et al, 2016).

Uno de los componentes que se encuentran presentes en los relaves es el plomo, el cual tiende a concentrarse en vegetales con raíz como la cebolla y es absorbido en mayor cantidad en dietas deficientes en calcio, hierro o zinc (Huaranga Moreno et al., 2022). La exposición a plomo puede desarrollar problemas de salud como convulsiones, fallo renal y hasta la muerte dependiendo de la dosis (Ferrer, A. 2003). Se ha demostrado que mujeres embarazadas que tienen plomo almacenado en sus huesos muestran un movimiento acelerado de éste al torrente sanguíneo y a la leche materna lo cual está asociado a nacimientos de bebés con bajo peso y decrecimiento en la razón de crecimiento y del desarrollo mental (Campos, 1987).

Otro metal pesado considerado de gran importancia en cuanto a la contaminación ambiental es el mercurio, ya que debido a su toxicidad ha ocasionado muchos episodios de intoxicaciones en las personas (Berdonces, J. L. 1996). Además, contamina el suelo y el agua tanto superficial como subterránea. Cuando el contenido de metales pesados en el suelo alcanza niveles que rebasan los límites máximos permitidos causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, y un disturbio funcional en otros componentes del ambiente, así como, la disminución de las poblaciones microbianas del suelo (Martín, 2000).

Algunas enmiendas, pueden ser útiles para restaurar suelos contaminados con residuos de minería (Díaz y Guevara, 2021). Una de estas es el compost que se obtiene a partir de residuos de jardinería y alimentos. La aplicación de compost en suelos tiene varios beneficios, entre ellos: ayuda a retener agua, promueve el crecimiento de microorganismos, aumenta el pH del suelo, reduce la presencia de metales pesados y mejora las propiedades hidrofísicas del suelo (Díaz, Laguna, Gutiérrez, Melo y Vega, 2020).

Los microorganismos se adaptan rápidamente a las condiciones ambientales. Los cambios o alteraciones en las actividades microbianas se pueden utilizar como indicador para evaluar tanto la mejora, como la degradación o el cambio de la salud del suelo (Osorio-Vega, N. W. 2009).

Teniendo en cuenta los aspectos antes planteados, en el presente trabajo se evaluó el efecto de la adición de compost y enmiendas inorgánicas alcalinizantes (residuo siderúrgico alcalino y piedra caliza) sobre una muestra de relave colombiano de minería aurífera, empleando el método de meteorización acelerada en columnas de lixiviación. En dichos ensayos, se determinó la lixiviación de metales pesados (mercurio, plomo y hierro), así como la viabilidad microbiana y la germinación de semillas de rábano en los materiales extraídos de las columnas. Los resultados

obtenidos permiten evaluar de manera preliminar la posibilidad de emplear este tipo de tratamientos para prevenir la contaminación causada por los relaves mineros.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar a escala laboratorio el efecto de la aplicación de compost y enmiendas alcalinas sobre la estabilización de un residuo de la minería aurífera colombiana.

1.2 Objetivos específicos

- Analizar mediante ensayos de columnas cuál tratamiento aplicado a la muestra de relave disminuye la tendencia del residuo a lixiviar.
- Establecer en cuál de los tratamientos se presenta una mayor viabilidad de la microbiota y la tendencia del sistema a permitir la germinación de plantas superiores.
- Evaluar los cambios morfológicos registrados en los sólidos de las columnas al finalizar el tiempo de ensayo.

2. Estado del arte

En los últimos años, se ha llevado a cabo una serie de estudios para evaluar la capacidad de las enmiendas orgánicas e inorgánicas en la reducción de la contaminación del suelo, en particular suelos contaminados con relaves mineros. A continuación, se presentan algunos estudios relevantes sobre este tema:

Díaz, Laguna, Gutiérrez, Melo y Vega. (2020) tomaron una muestra de suelo perturbado por actividad de minería de carbón a cielo abierto para evaluar la eficiencia del cocompostaje de residuos sólidos urbanos, caprinaza y biochar, en el tratamiento de suelos contaminados con minería. A la muestra de suelo se le realizó un análisis fisicoquímico inicial y final, además microbiológico. Entre los análisis fisicoquímicos y microbiológicos están: pH (Norma Técnica Colombiana-NTC 5264), conductividad eléctrica (NTC 5596), humedad (NTC 5167), densidad (NTC 5167), fósforo disponible (método Bray II), materia orgánica (Método Walkey Black), capacidad de intercambio catiónico-CIC (NTC 5268), almacenamiento en búfer, identificación y conteo de esporas de micorrizas, y actividad enzimática. Esta técnica demostró tener un efecto positivo en las propiedades del suelo. Se observaron diferencias significativas en el pH y la conductividad eléctrica entre los tratamientos y el grupo de tratamiento 1. Los tratamientos mostraron un pH más neutro y una menor conductividad eléctrica, lo cual indica una mejora en las condiciones del suelo. Además, se evidenció un mayor aporte de nutrientes en los tratamientos en comparación con el suelo minero, que presenta un déficit de estos nutrientes. Estos resultados afirman que el co-compostaje es una alternativa efectiva para remediar suelos perturbados por la minería de carbón a cielo abierto. Además, esta técnica contribuye a la sostenibilidad ambiental de la zona de impacto, lo que la convierte en una estrategia beneficiosa.

Sarria et al. (2015) evidencia como los suelos afectados por el accidente de la mina de Aznalcóllar, Sevilla (España) en 1998 fueron remediados para disminuir la contaminación generada principalmente por As, Cu, Pb y Zn. El muestreo de suelos se llevó a cabo en la margen derecha del río Guadiamar en tres perfiles: suelo contaminado (SC), suelo remediado (SR) y suelo no contaminado (SNC), se hizo por triplicado en secciones paralelas, según la distribución de profundidades. En todos los casos se tomaron entre 50 g y 100 g de muestra, aplicando enmiendas orgánicas e inorgánicas con el fin de realizar los siguientes análisis: textura (pipeta de Robinson), pH del suelo (1:2.5), capacidad de intercambio catiónico (acetato de amonio 1N, pH 7), mineralogía de arcillas, espuma azucarera (CaCO_3), carbono orgánico (CO), formas de Fe y de Mn, las concentraciones de As, Cu, Pb y Zn totales, solubles y biodisponibles (extracción con EDTA) y cuantificación en un ICP-MS. Las formas solubles y biodisponibles permiten evaluar el movimiento de los contaminantes tanto en el suelo como en el ecosistema y su posible absorción por los organismos animales y vegetales.

Según Sarria et al. (2015) la aplicación de enmiendas orgánicas (CO) ayudó a la disminución de las concentraciones de Cu, Zn, As, totales, Pb soluble, así como de las formas biodisponibles de Zn y Pb. Por otro lado, las enmiendas inorgánicas (Fe y Mn) y el CaCO_3 también redujeron las concentraciones de Cu, Zn, As, tanto en sus formas totales como solubles, y las formas biodisponibles de Cu, Zn y As. Sin embargo, se observó que Fe y CaCO_3 no lograron reducir las concentraciones de Cu y Zn solubles a niveles inferiores a aquellos considerados críticos de toxicidad.

Hwang, Neculita y Han. (2012), implementaron pruebas de columnas de lixiviación mediante tres reactores de (30 cm de altura y 5 cm de diámetro), los cuales fueron fabricados con Plexiglás. El reactor de tratamiento 1 se llenó con 200 g de relaves, mientras que dos reactores

contenían una mezcla de relaves (200 g), compost del mercado coreano (50 g) y zeolita (12,5 g). Este estudio evaluó la eficacia de enmiendas orgánicas e inorgánicas sobre la inmovilización de metales en relaves severamente degradados e intentos de evaluar los procesos químicos y biológicos. Los relaves enmendados con compost orgánico y aditivos resultaron beneficiosos para estabilizar el pH, oxígeno disuelto (OD), potencial de reducción de oxidación (ORP), carbono orgánico disuelto (DOC), sulfato y metales (Al, As, Cd, Cu, Mn, Ni, Fe, Pb y Zn). La aplicación de mezclas de enmiendas orgánicas (compost a base de desechos de alimentos) e inorgánicas (zeolitas) a los relaves mostraron resultados prometedores para la neutralización de la acidez, el desarrollo de condiciones reductoras y una alta eficiencia de remoción de metales. Los análisis mineralógicos y microbiológicos confirmaron que los procesos de remoción de metales y sulfatos en el sistema fueron contribuidos por la reducción biológica de los sulfatos y produjeron formas de sulfuro que reaccionaron químicamente con los metales disueltos.

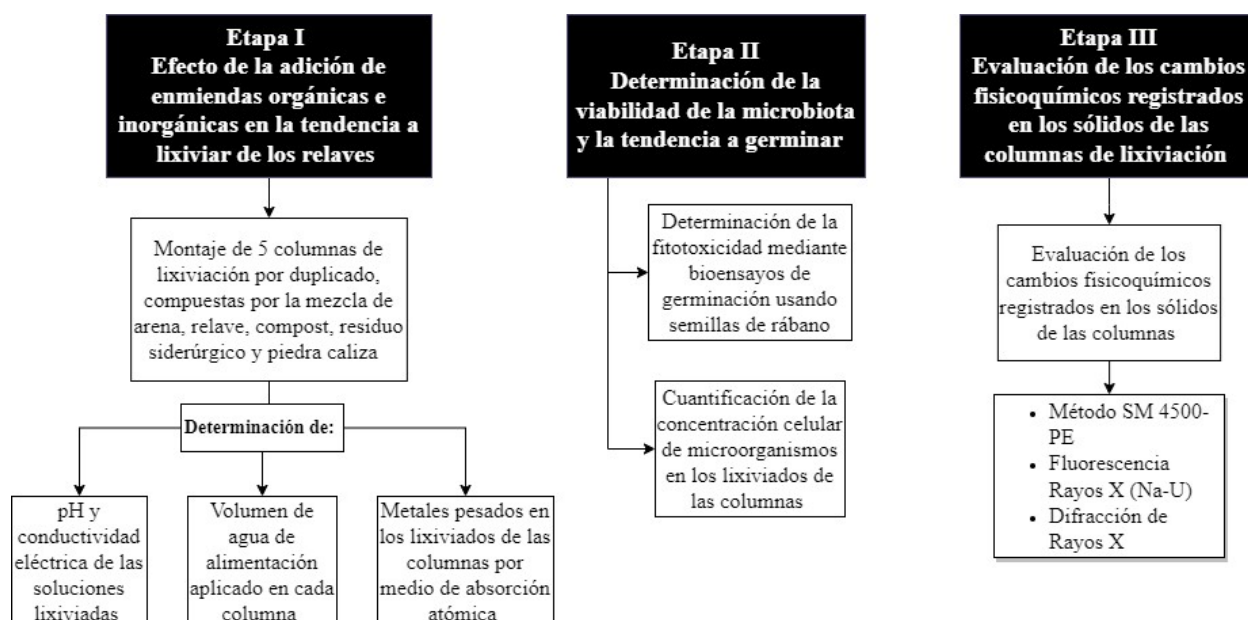
En las referencias bibliográficas anteriores se puede evidenciar la eficiencia de la implementación de enmiendas orgánicas e inorgánicas para la recuperación de suelos contaminados. En el presente trabajo, se propone utilizar enmiendas orgánicas aplicándolas a una muestra de relave de minería para determinar su eficiencia. Estas enmiendas se aplicarán en las proporciones recomendadas por (Hwang, Neculita y Han, 2012).

3. Descripción metodológica

A continuación, se presenta la metodología experimental usada para el desarrollo del trabajo de grado. Se buscó implementar el uso de enmiendas orgánicas como el compost, e inorgánicas; como el residuo siderúrgico y la piedra caliza, con el objetivo de evaluar su eficacia en la inmovilización de metales en relaves mineros. Además, se indagaron los procesos químicos y microbiológicos involucrados en este proceso. La investigación se dividió en tres etapas (Figura 1).

Figura 1.

Descripción metodológica experimental del proyecto



3.1 Etapa I. Efecto de la adición de compost y enmiendas inorgánicas alcalinizantes en la tendencia a lixiviar de los relaves

Se emplearon 10 columnas de lixiviación fabricadas con botellas PET de 28 cm de altura y 6,5 cm de diámetro. Los materiales que se implementaron fueron los siguientes: relave, proporcionado por el grupo de investigación GIMBA-UIS y proveniente de una mina de oro colombiana; compost, obtenido a través del co-compostaje de residuos de jardinería y alimentos,

proporcionado por el grupo de investigación GPH (Apéndice A); residuo siderúrgico, proporcionado por el grupo de investigación GIMBA-UIS (Apéndice B); piedra caliza, proporcionada por el grupo de investigación SIPAM-UIS; y arena, adquirida para su uso en el tratamiento. Estos materiales se pueden observar en la

Figura 2. El tratamiento 1 se compone de relave, el tratamiento 2, 3 y 4 contienen mezclas de relave + compost, relave + compost + residuo siderúrgico y relave + compost + piedra caliza, respectivamente, cada una de estas columnas tienen una base inferior y superior de arena, esto con el fin de que el volumen sea el mismo para todas. Finalmente, el tratamiento 5 está compuesto solo por arena y será tomado como referencia (blanco).

Las mezclas se realizaron por duplicado según las condiciones experimentales especificadas en la Tabla 1.

La adición de arena a cada uno de los tratamientos busca mejorar la porosidad y permeabilidad ya que esta cantidad adicionada de relave puede impedir la retención y movimiento de aire y agua dentro de la columna (Intagri, 2017).

Tabla 1.

Configuración de cada mezcla que compone la columna de lixiviación

Tratamiento	Tipo de tratamiento	Arena	Relave	Compost	Siderúrgico alcalino	Piedra caliza
Tratamiento 1	Relave + arena	15 g	300 g			
Tratamiento 2	Relave + compost + arena	19,69 g	300 g	93,75 g		
Tratamiento 3	Relave + compost + residuo siderúrgico alcalino + arena	19,69 g	300 g	75 g	18,75 g	

Tratamiento 4	Relave + compost + piedra caliza + arena	19,69 g	300 g	75 g	18,75 g
------------------	---	---------	-------	------	---------

Tratamiento 5	Blanco (arena)	259,6 g			
------------------	----------------	---------	--	--	--

Figura 2.

Materiales usados para la composición de las columnas de lixiviación

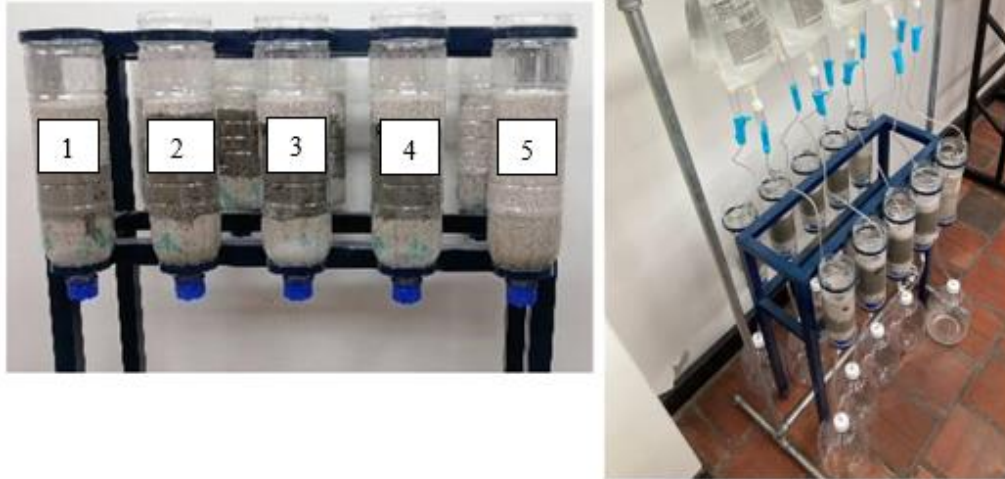


Nota. (a) Relave, (b) Compost, (c) Piedra caliza, (d) Residuo siderúrgico, (e) Arena.

La imagen del montaje experimental y del sistema de riego de cada columna se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Montaje experimental de las columnas de lixiviación con la respectiva agua de alimentación en cada columna



Nota.1 (Tratamiento 1), 2 (Tratamiento 2), 3 (Tratamiento 3), 4 (Tratamiento 4) y 5 (Tratamiento 5).

3.1.1 Determinación de la cantidad de agua de alimentación para las columnas de lixiviación

Para calcular el volumen de riego aplicado a cada una de las columnas, se tuvo en cuenta la capacidad propia de la columna para evacuar el agua mediante una prueba preliminar, encontrándose que el valor óptimo para un día era de 500 ml, aplicados a lo largo de toda una mañana. Considerando que este tipo de ensayos de lixiviación en columnas constituyen una prueba de meteorización acelerada, se consideró que las precipitaciones promedio en la zona de Vetás (Santander) era de 906 L/m² por año, y como el área transversal medida de la columna fue de 0,003318 m², entonces, cada riego de 500 ml equivaldría al volumen de lluvias de dos meses en la zona. Por tanto, a lo largo de todo este trabajo se realizaron 24 riegos en 2,5 meses. La

meteorización que recibió la columna, en términos de volumen de agua, equivaldría aproximadamente a 4 años.

Las columnas fueron alimentadas con 500 ml de agua destilada tres veces a la semana durante 2,5 meses. Los lixiviados se recolectaron en tubos Falcon después de cada riego. Se midió la lixiviación de tres metales pesados: plomo, hierro y mercurio, utilizando espectroscopia de absorción atómica (AAS). Para las muestras analizadas se mezclaron los lixiviados obtenidos durante la semana 1, semana 5 y semana 10 del proceso. Las pruebas se realizaron en el equipo Agilent 240FS AA del Laboratorio del grupo GIMBA-UIS, con técnicas de flama para el hierro y plomo, y la técnica de vapor para medir el mercurio.

Para la medición del pH y conductividad eléctrica se tomó una parte de la lixiviación obtenida de cada columna antes del siguiente riego empleando un medidor portátil de pH/EC/TDS/Temperatura Línea GroLine HI981, el cual fue previamente calibrado con soluciones patrón a pH de 7,0 y 4,0, y conductividad eléctrica de 1314 μS .

3.2 Etapa II. Determinación de la viabilidad de la microbiota y la tendencia a germinar

Se cuantificó la concentración celular de microorganismos en las columnas, a través del conteo celular en el lixiviado. También, se realizó la determinación de fitotoxicidad mediante bioensayos de germinación sobre los relaves tratados usando semillas de rábano (Hernández et al. 2020).

3.2.1 *Conteo microbiológico de células bacterianas en los lixiviados de las columnas*

Para el conteo de microorganismos contenidos en las muestras del lixiviado se aplicó la técnica de recuento cámara de contaje Thoma. La concentración celular se calculó con la Ecuación 1:

$$\frac{cel}{ml} = N * 10^4 \quad (1)$$

Donde;

N = Numero de células promedio de cada muestra en cada cuadrado de la cámara Thoma.

3.2.2 Determinación de fitotoxicidad mediante bioensayos de germinación

Para determinar la fitotoxicidad de los sólidos en cada una de las columnas antes y después de la irrigación, se pesó 1 g al inicio y final de todo el proceso para un total de 20 muestras. Por cada gramo de muestra se añadió 10 ml de agua destilada y se agitó hasta lograr una suspensión estable. Posteriormente, en las cajas Petri se colocó papel filtro en el fondo y 10 semillas de rábano por cada caja (este proceso se triplicó para cada una de las muestras). Seguido a esto, se tomó, con ayuda de un gotero la suspensión estable realizada anteriormente y se añadió a las cajas preparadas con las semillas. Finalmente, se taparon las cajas Petri, se envolvieron en papel aluminio para evitar el paso de luz y se guardaron herméticamente durante 72 horas. Pasado el tiempo de incubación se midió el largo de la raíz y a los resultados se les realizó un análisis de varianza (Oviedo-Ocaña et al., 2015)

3.3 Etapa III. Evaluación de los cambios fisicoquímicos registrados en los sólidos de las columnas de lixiviación

Se evaluaron los cambios que se obtuvieron después de implementar al relave los tratamientos 2, 3 y 4, se realizó una medición de la cantidad de metales pesados plomo, hierro y mercurio antes y después del proceso, mediante el análisis elemental cuantitativo por fluorescencia de rayos X (Na-U). La determinación de fósforo se realizó por medio del método SM 4500-PE (fósforo por ácido ascórbico). Así mismo, se llevó a cabo la técnica de difracción de rayos X para evaluar los cambios de mineralogía.

3.3.1 Determinación del fósforo soluble presente en las muestras líquidas mediante el

Método SM 4500-PE

El fósforo disuelto en las muestras líquidas puede encontrarse de forma orgánica e inorgánica, siendo la última la que constituye la fracción disponible para procesos biológicos, este elemento puede estar combinado con materia orgánica, por esto, se debe implementar un método de digestión que sea capaz de extraer el fósforo disuelto (Garrido Piñeres, 2023).

La concentración de fosfatos presentes en las muestras se midió por medio del método espectrofotométrico SM 4500-PE fósforo por ácido ascórbico (APHA). Las diez muestras tratadas con bicarbonato de sodio fueron analizadas por el laboratorio químico de Consultas Industriales UIS como servicio técnico.

3.3.2 Fluorescencia de rayos X (Na-U) de las muestras sólidas de relave

La fluorescencia de rayos X se usa principalmente para realizar análisis químicos de elementos, el objetivo principal es determinar la composición elemental de las muestras. Las submuestras representativas elegidas fueron las del tratamiento 1 (inicial y final) y las del tratamiento 2 (inicial y final). Se pesó 10 g de cada submuestra y se usó como servicio técnico el laboratorio de rayos X UIS, donde se molieron en un molino de anillos hasta 100% pasante malla Tyler 200. Este material se secó y se llevó a un equipo Thermo ARL Optim'X WDXRF. A las muestras se les realizó un análisis semicuantitativo, utilizando el software Optiquant, el cual permite una lectura de elementos desde el flúor hasta el uranio (María & Valentinuzzi, 2008) .

3.3.3 Determinación de la cristalinidad y fases de las películas por medio de la difracción de rayos X de las muestras sólidas de relave

El análisis de difracción de rayos X es una técnica usada para identificar la cristalinidad de las muestras a estudiar, dicho análisis revela los picos que corresponden a las fases de las películas

(Barbara & Christine, n.d.). Las submuestras representativas (inicial y final) que se analizaron para este método, fueron las del tratamiento 1 y del tratamiento 2. Se pesó 1 g de cada submuestra y se usó como servicio técnico el laboratorio de rayos X UIS. En este análisis se realizó la identificación y cuantificación de fases de minerales cristalinas por difracción de rayos X. Para ello, se utilizó un difractómetro de polvos marca Bruker, modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci. La radiación impartida fue de tipo $\text{CuK}\alpha$.

4. Resultados y discusión

En este estudio se llevaron a cabo mezclas de las dos columnas de cada tratamiento para obtener los resultados de la lixiviación de metales pesados: plomo, hierro y mercurio. Valores de fosfato biodisponible y los resultados de fluorescencia y difracción de rayos X.

Para los resultados de pH, conductividad eléctrica e índice de germinación se calculó un promedio de las dos columnas por cada tratamiento.

4.1 Caracterización de los componentes de las columnas

4.1.1 Caracterización del relave usado en las columnas de lixiviación

Para la cuantificación de elementos de la muestra de relave se aplicó el método de fluorescencia. El análisis elemental de la muestra inicial de relave se observa en la Tabla 2. Se identificaron 20 elementos, de los cuales 5 son elementos minoritarios ($\%p/p < 0,01$), se observa que el relave está compuesto principalmente por silicio ($\%p/p = 26,52$) y que contiene metales pesados y tóxicos como: zinc ($\%p/p = 1,28$), plomo ($\%p/p = 0,74$), arsénico ($\%p/p = 0,41$), cromo ($\%p/p = 0,01$) y mercurio ($\%p/p = 0,0077$).

Tabla 2.

Análisis químico por fluorescencia de rayos x del relave minero aurífero

Elemento	%p/p
Si	26,52
Fe	8,60
S	7,01
Al	3,71
Zn	1,28
K	0,92
Pb	0,74
Ca	0,70
As	0,41
Mg	0,40
Cu	0,29

Ti	0,12
Mn	0,10
P	0,01
Cr	0,01
Elementos minoritarios	
Elemento	%p/p
Hg	0,0077
Ni	0,0074
Zr	0,0048
Rb	0,0029
Mo	0,0022

4.1.2 Caracterización del compost usado como componente en las columnas de lixiviación

La caracterización del compost que se implementó en este experimento fue realizada en un estudio previo del grupo GPH como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Caracterización del compost

pH	CE	COT	NT	C: N	IR	IG	IF
	[dS/m]	%db	%db		gCO ₂ kgVS ⁻¹ d ⁻¹	%	
8,32 ± 0,1	1,80 ± 0,3	24,80 ± 2,7	1,32 ± 0,2	18,8 ± 2,1	2,9 ± 0,2	98,85 ± 2,9	4,3

Nota. CE (Conductividad eléctrica), COT (Carbono orgánico total), NT (Nitrógeno total), IR (Índice de respirometría, IG (Índice de germinación) y IF (Índice de fertilización)

4.2 Análisis químico de metales en el lixiviado por medio de absorción atómica

Las muestras analizadas mediante el método de absorción atómica arrojaron resultados satisfactorios, ya que, no se detectaron concentraciones altas de plomo, hierro y mercurio.

El plomo (Pb), se encontró en todos los tratamientos excepto en el tratamiento 5, como se muestra en la Figura 4. Los valores de concentración fueron bajos en la primera semana en relación

con la concentración máxima permisible del lixiviado en el agua de plomo en Colombia 0,5 [mg/L] (Sostenible, S. A. 2015). El tratamiento 3 presentó la mayor cantidad de plomo, esto podría deberse a la concentración de este elemento en la muestra del residuo siderúrgico como se evidencia en el Apéndice B. En la quinta semana, la concentración de plomo del tratamiento 1 disminuyó de 0,14 [mg/L] a 0,11 [mg/L] y luego no se detectó en la semana 10. Al finalizar el proceso, se observa que solo el tratamiento 2 muestra una concentración de 0,01 [mg/L]. Esto puede deberse a que las condiciones de tratamiento no favorecieron la lixiviación del plomo. Una de las posibles razones es el uso de agua destilada, ya que el plomo es más susceptible a lixiviar en medios ácidos (Muñoz-Hernández et al., 2022). Por lo tanto, es probable que se necesitara un ambiente ácido para facilitar la lixiviación de este metal. Para la concentración de hierro (Fe), no se registraron valores diferentes de 0 en los lixiviados a lo largo de las diez semanas evaluadas.

Por otra parte, el mercurio (Hg), en la semana 1 solo se observa presente en el tratamiento 1, con un valor de 1,82 [µg/L] (Figura 5). Dicho valor es inferior a 0,2 [mg/L], el cual es el máximo permisible en el lixiviado de mercurio en Colombia (Sostenible, S. A. 2015). Por otro lado, en el tratamiento 5, se muestra un valor de 0,57 [µg/L] en la semana 5, lo cual puede deberse a la composición de la arena utilizada. No se disponen de datos concretos sobre la composición del tratamiento 5, ya que la arena fue adquirida sin realizar una caracterización previa. Finalmente, se observa que en la semana 10 no se presenta ningún valor en la concentración de mercurio. Otro factor que se debe resaltar fue el tiempo en el cual se implementaron los riegos, puede que fuese demasiado corto y las muestras requieran más tiempo para que se dé una mayor desestabilización de los metales.

Figura 4.
Concentración de plomo presente en el lixiviado de las columnas

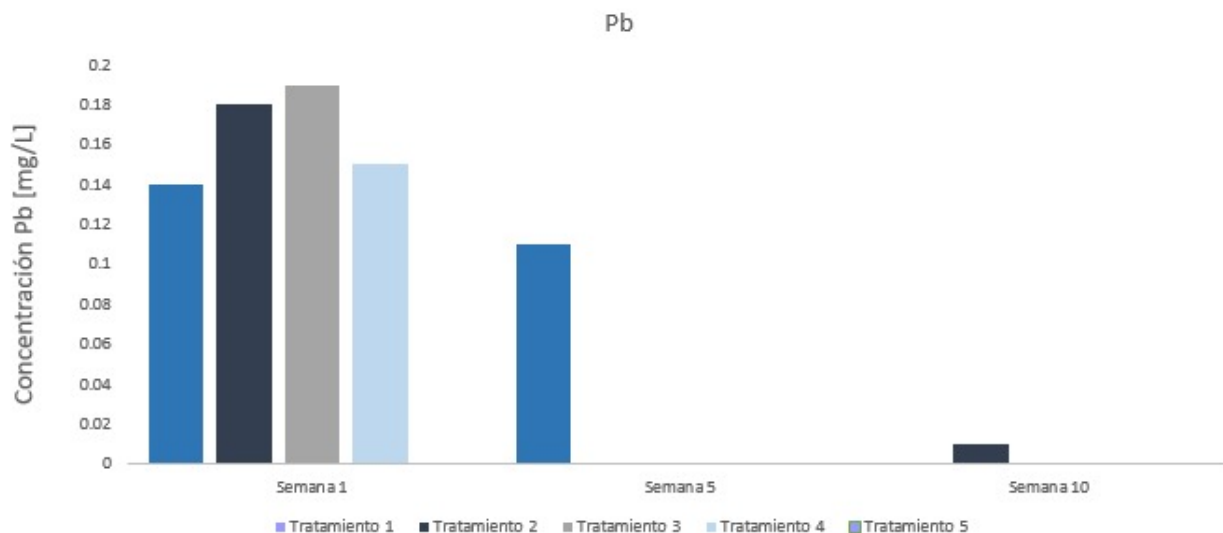
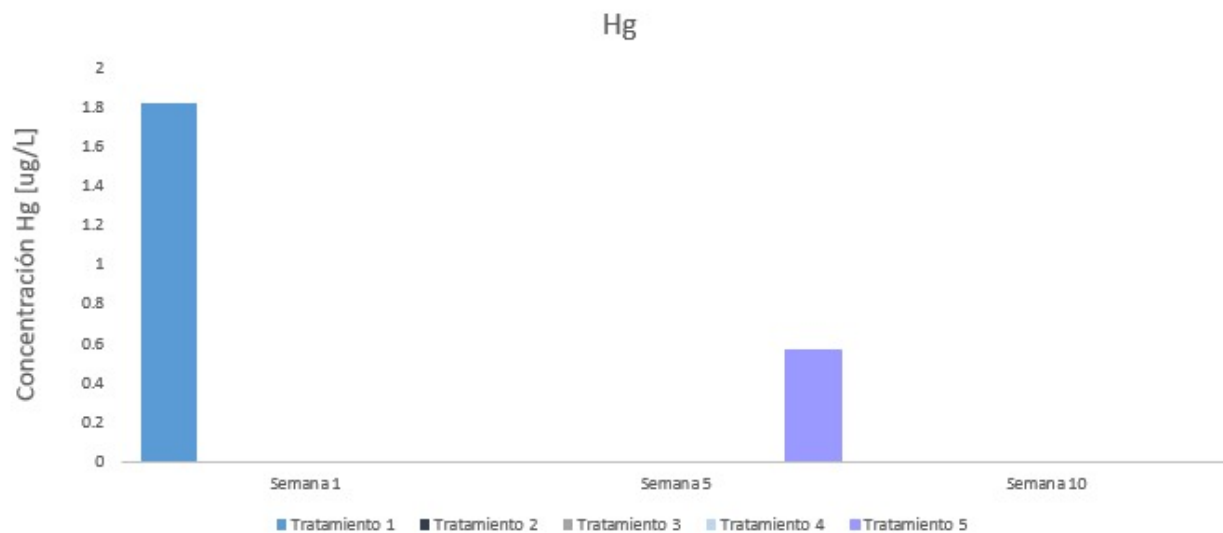


Figura 5.
Concentración de mercurio presente en el lixiviado de las columnas

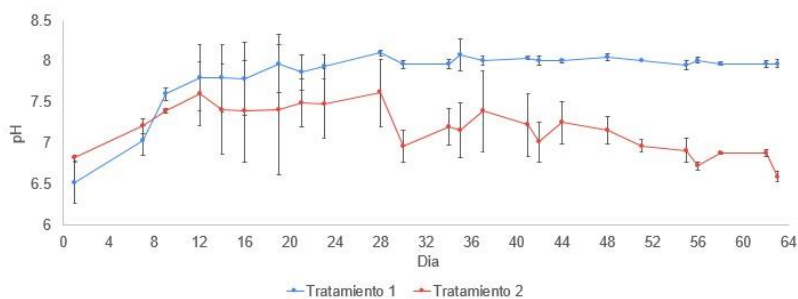


4.3 Cambios de pH, conductividad eléctrica y crecimiento de comunidad microbiana en los lixiviados de las columnas

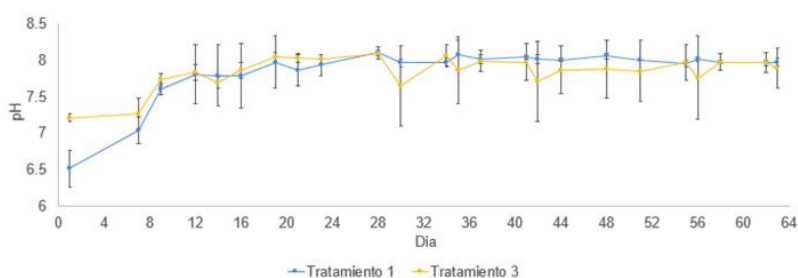
En la Figura 6 se observa que el pH en cada muestra está entre 6,5 y 7,0. A partir del día 8 este valor empieza a aumentar para los tratamientos 3 y 4 alcanzando un pH cercano a 8,0. Por el contrario para el tratamiento 2 dicho valor presenta una disminución estando alrededor de 6,5 y el

tratamiento 5 mantuvo el pH estable. Se ha especificado que el pH óptimo para el crecimiento y vida de las plantas del suelo es neutral, es decir, que su valor se encuentra entre 6,5 y 7,0 (Intagri, 2018), los nutrientes del suelo se ven afectados por el valor del pH ya que la disponibilidad no es la misma en todo su rango (Cremona & Enriquez, 2023). En la Figura 7 se observa los nutrientes que se encuentran en el suelo dependiendo del valor de pH.

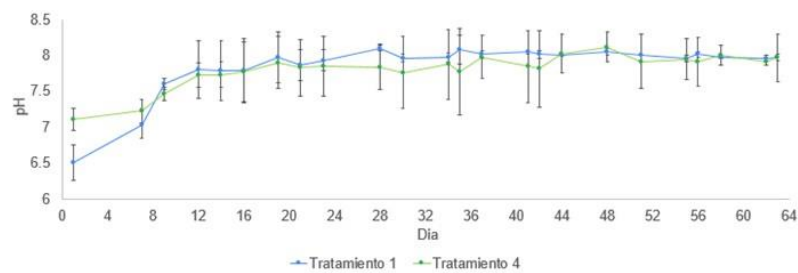
Figura 6.
Cambios del pH en el lixiviado de las columnas



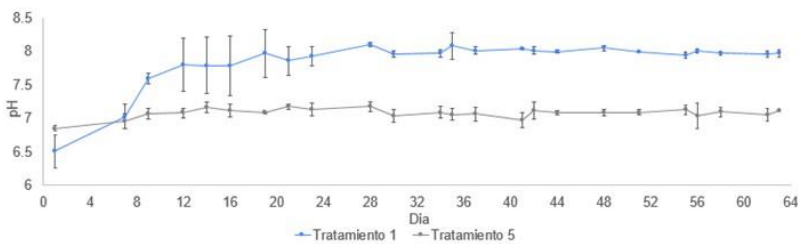
(a)



(b)



(c)

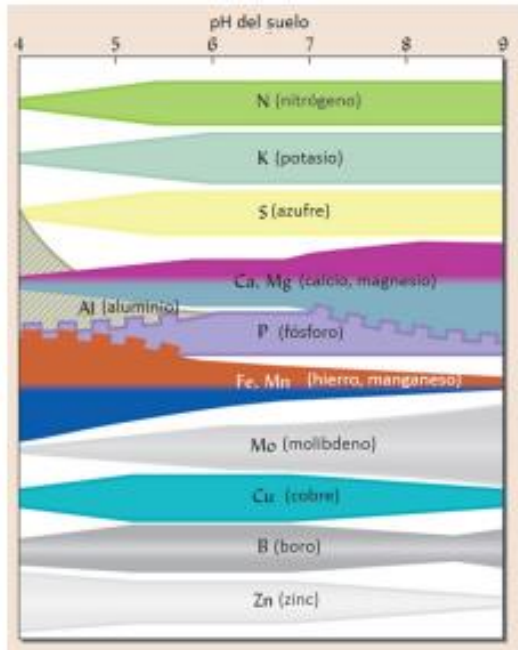


(d)

Nota. (a) Resultados pH para tratamiento 1 y 2, (b) Resultados pH para el tratamiento 1 y 3, (c) Resultados pH para tratamiento 1 y 4, (d) Resultados pH para tratamiento 1 y 5.

Figura 7.

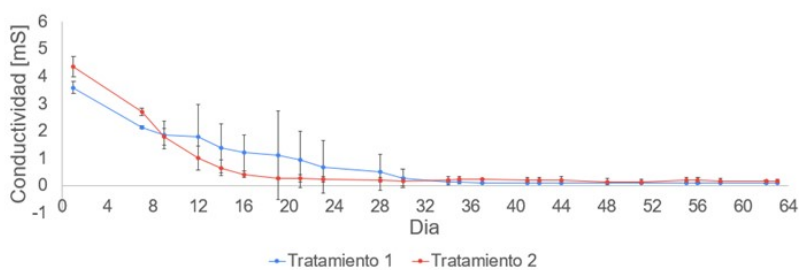
Relación entre pH y la disponibilidad de nutrientes. Modificado de Weil y Brady (2014)



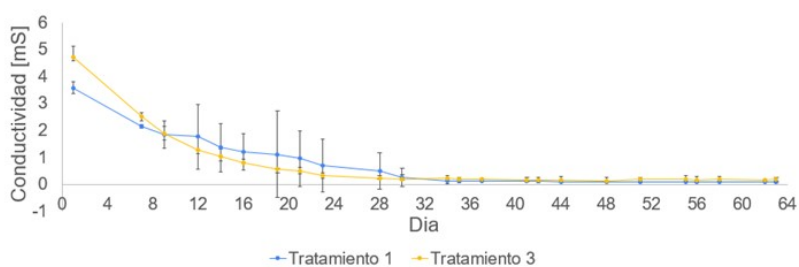
La conductividad eléctrica se considera como una medida de la concentración de sales presentes. Las sales son beneficiosas para el crecimiento de los microorganismos. Sin embargo, una cantidad excesiva de sales en el suelo puede frenar el crecimiento de plantas como de microorganismos (Intagri, 2016).

De acuerdo con la Figura 8 se puede determinar que todos los tratamientos ayudan a que con el tiempo las sales del suelo disminuyan y luego la conductividad eléctrica se mantenga en un valor constante.

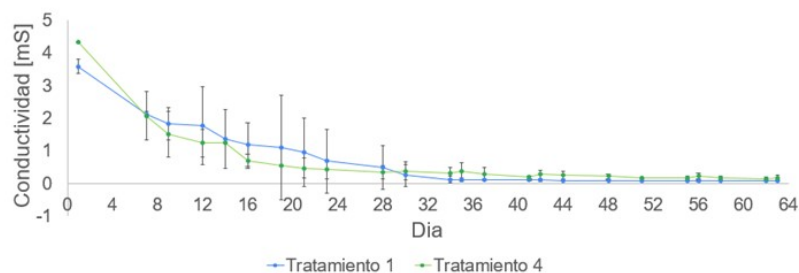
Figura 8.
Cambios de la conductividad eléctrica en el lixiviado de las columnas



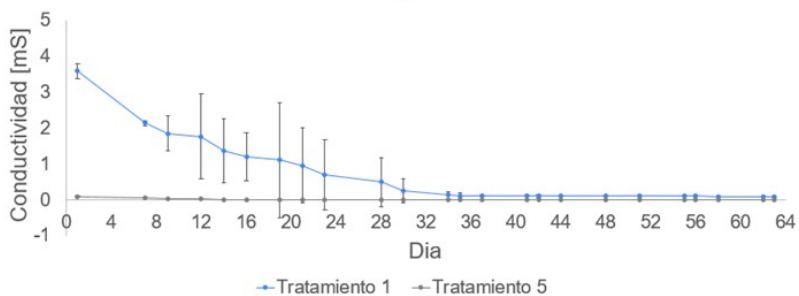
(a)



(b)



(c)



(d)

Nota. (a) Resultados conductividad eléctrica para tratamiento 1 y 2, (b) Resultados conductividad eléctrica para el tratamiento 1 y 3, (c) Resultados conductividad eléctrica para el tratamiento 1 y 4, (d) Resultados conductividad eléctrica para el tratamiento 1 y 5.

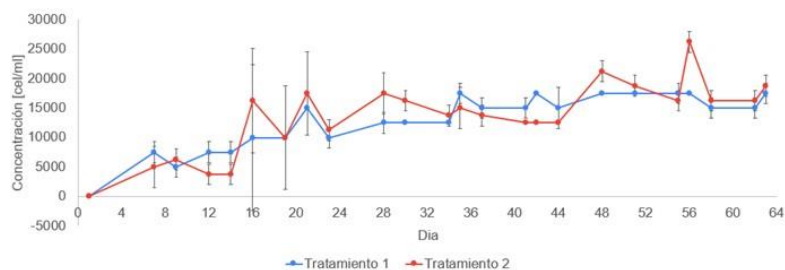
En cuanto a la toxicidad del suelo en los tratamientos, al inicio se presentaron condiciones desfavorables para el crecimiento de las comunidades microbianas. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo, se observa un aumento en la concentración de microorganismos.

Se realizó una comparación entre la columna de tratamiento 1 (control) y las columnas con tratamientos 2,3 y 4. La Figura 9 muestra que la concentración de microorganismos aumentó en todos los tratamientos, pero se observó una concentración mayor en los tratamientos enmendados (2,3 y 4). Se sabe que los microorganismos ayudan a mejorar la disponibilidad de sustratos y pueden reducir o eliminar los riesgos medioambientales asociados con la acumulación de compuestos químicos tóxicos y otros residuos peligrosos presentes en las muestras (Moreno, C. M et al. 2004).

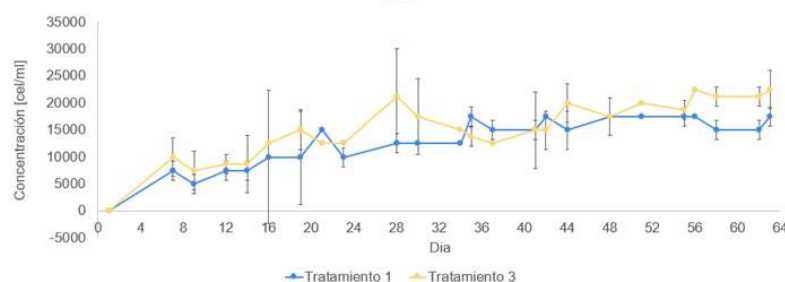
En relación con los resultados obtenidos de las pruebas de pH, conductividad eléctrica y microorganismos, se puede observar que el tratamiento que mostró mayor efectividad considerando estos parámetros fue el tratamiento 2, Por lo tanto, las muestras que se enviaron al laboratorio de difracción de rayos X fueron las del tratamiento 1 (relave), inicial y final, así como las del tratamiento 2 (relave + compost), inicial y final.

Figura 9.

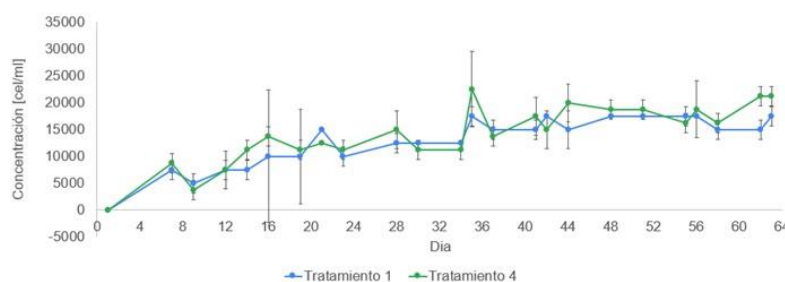
Concentración de microorganismos en el lixiviado de las columnas



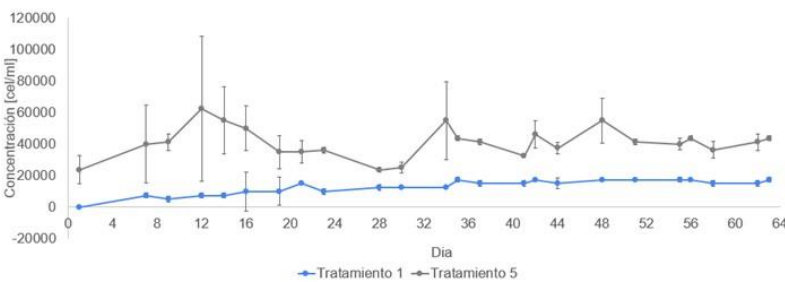
(a)



(b)



(c)



(d)

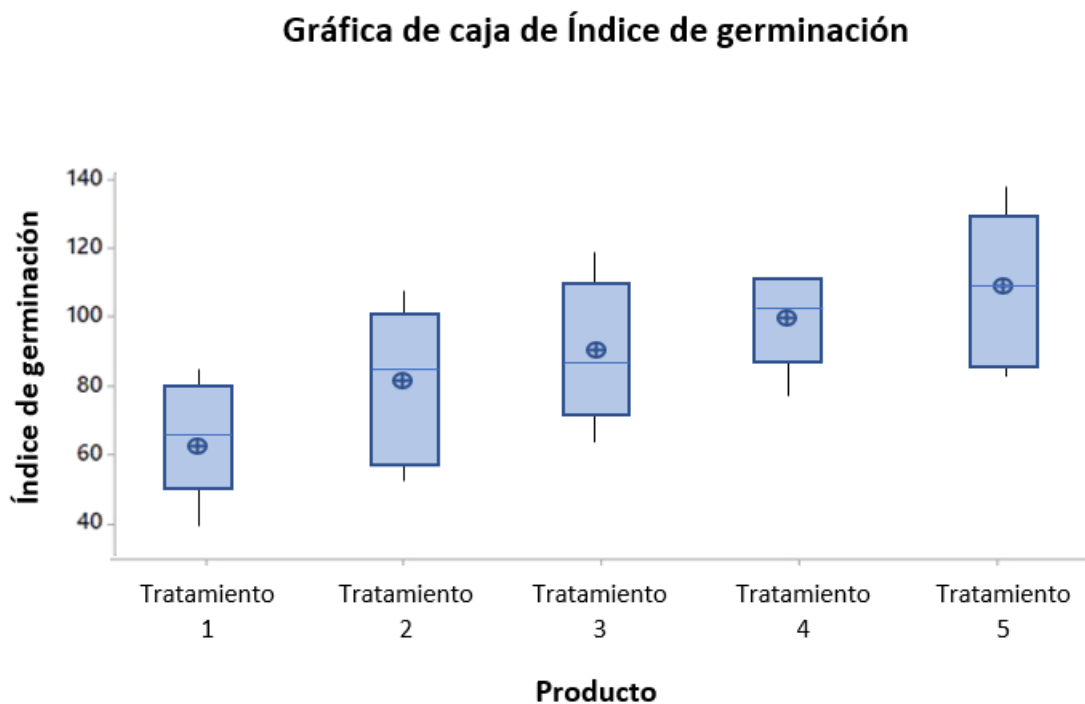
Nota. (a) Cantidad de microorganismos para tratamiento 1 y 2, (b) Cantidad de microorganismos para tratamiento 1 y 3, (c) Cantidad de microorganismos para tratamiento 1 y 4, (d) Cantidad de microorganismos para tratamiento 1 y 5.

4.4 Determinación de la fitotoxicidad en las muestras sólidas de las columnas

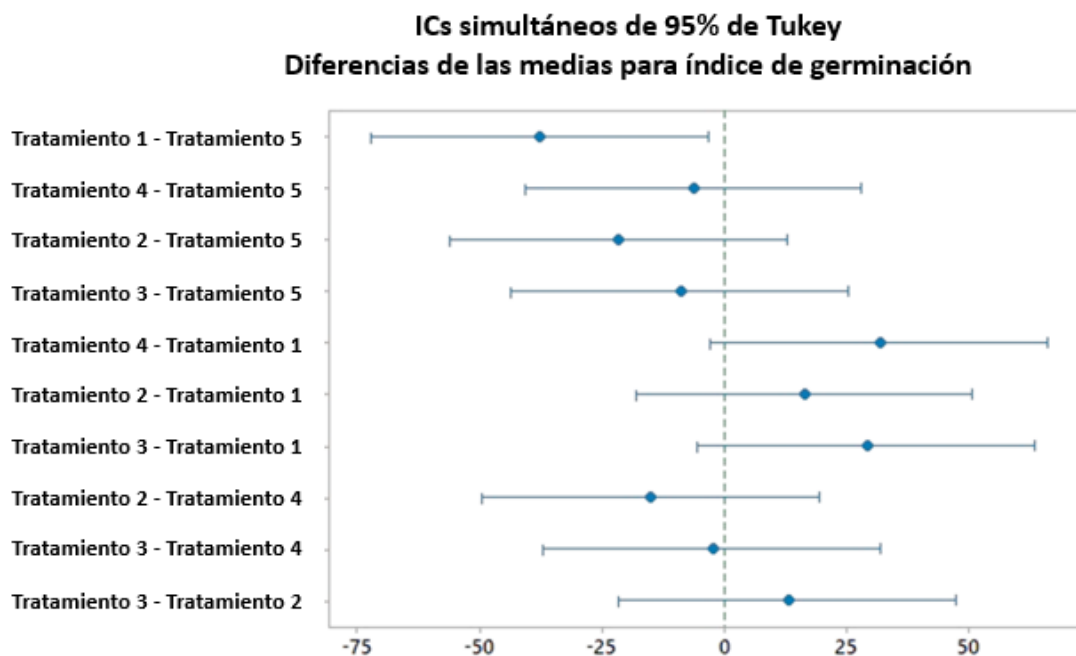
Se usaron semillas de rábano para el proceso ya que tienen la capacidad de germinar rápidamente (entre 4 a 6 días), adicional la longitud de la radícula es considerado un indicador importante en la evaluación del crecimiento de las plantas, el análisis de la elongación de la radícula permite detectar posibles efectos tóxicos de compuestos presentes en la solución, puesto que, pueden detener el crecimiento de la radícula, las semillas de rábano son sensibles a una amplia serie de contaminantes, lo que las hace útiles para la evaluación de la toxicidad del suelo en estudio, un bajo índice de germinación indica la presencia de contaminantes (Callupe Vargas, 2020). El índice de germinación se realizó al final del proceso a las cinco muestras (por triplicado) de la mezcla de cada tratamiento.

En la Figura 10 se puede apreciar la distribución del índice de germinación de cada uno de los tratamientos, junto con la mediana y la dispersión de los datos, la mediana es una medida de tendencia central que proporciona información de cómo están agrupados los datos en torno al valor central. Se resalta que no se identifican puntos atípicos.

Se observa que el índice de germinación más bajo se registró en la muestra de tratamiento 1, mientras que para las muestras de los demás tratamientos se exhiben índices de germinación similares.

Figura 10.*Diagrama de cajas del índice de germinación*

De la Figura 11 se observa que todos los tratamientos son viables para la germinación de las semillas de rábano exceptuando la muestra de tratamiento 1 (control), ya que, se evidencia una diferencia estadística hacia el lado negativo con respecto a los demás, es decir, la muestra de tratamiento 1 inhibe la germinación de las semillas. Por otra parte, los tratamientos que se ubican en el lado positivo de la gráfica muestran mejoras en la germinación de las semillas.

Figura 11.*Diagrama de Tukey para índice de germinación*

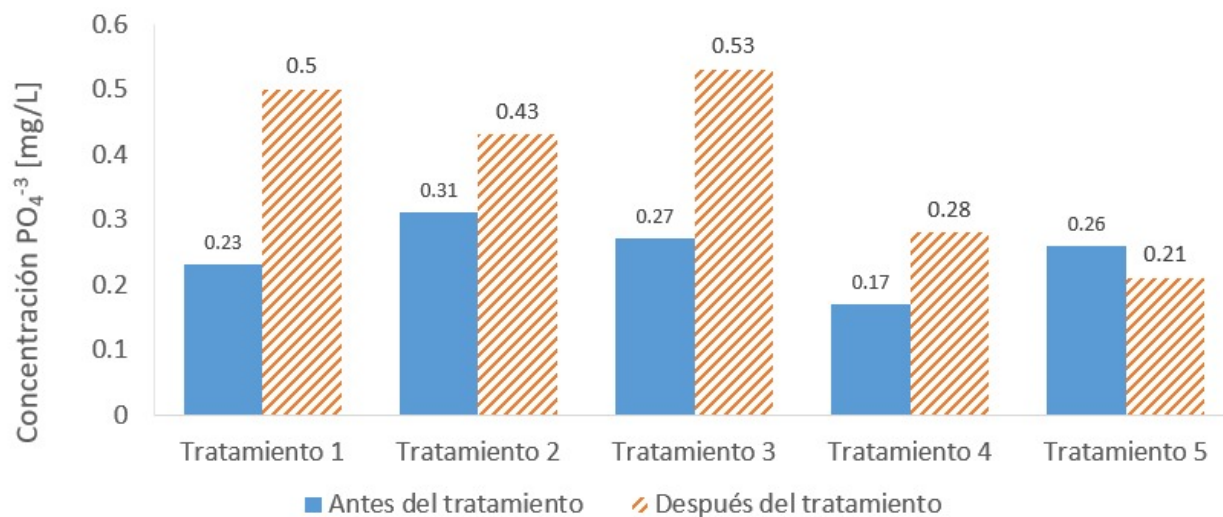
4.5 Determinación de fósforo soluble mediante el método SM 4500-PE

La importancia de la disponibilidad de fosfatos solubles en el suelo radica en su capacidad de ser absorbidos por las plantas, ya que, representan una fuente de nutrientes esenciales para su crecimiento (Sanzano Agustín., n.d.) .

Con la medición de fosfatos solubles en el suelo antes y después del proceso se observa en la Figura 12, que la cantidad final de fosfatos solubles en la décima semana de riegos ha aumentado en todos los tratamientos, la enmienda que más genera este aumento es la del tratamiento 3, pasando de un valor de 0,27 [mg/L] a 0,53 [mg/L], esto quiere decir que los fosfatos se han liberado, por otra parte, en el tratamiento 5 se tiene un valor final de 0,21 [mg/L] con respecto al inicial de 0,26 [mg/L]. Entre mayor sea la disponibilidad de fosfatos solubles, mayor será el beneficio para el crecimiento de las plantas.

Figura 12.

Contenido de fósforo soluble biodisponible en cada tratamiento



4.6 Análisis químico mediante fluorescencia de rayos X

Los resultados de fluorescencia de rayos X se presentan en 4 tablas del Apéndice D, que corresponden al tratamiento 1 inicial y final, así como al tratamiento 2 inicial y final.

En la Tabla 2, que muestra la composición base del relave inicial, se identificaron 20 elementos, como silicio, hierro, aluminio, potasio, calcio, magnesio, titanio, manganeso y molibdeno, que son propios de la muestra y se consideran no contaminantes. Sin embargo, el análisis también revela la presencia de metales pesados nocivos para la salud y contaminantes, como azufre, zinc, plomo, arsénico, cobre, fósforo, cromo, circonio, mercurio, níquel y rubidio.

En la muestra de tratamiento 1 final, se observa una disminución en los porcentajes de la mayoría de los elementos. Los elementos que aumentaron fueron silicio, potasio, magnesio, titanio, fósforo y circonio, mientras que el molibdeno desaparece.

En cuanto al tratamiento 2 inicial, se identificaron 22 elementos como se evidencia en el Apéndice D, incluyendo los mismos que en el relave inicial, además de cloro, cobalto, estroncio y cobre. Al igual que en el relave inicial, se encontraron metales pesados nocivos y contaminantes.

En la muestra del tratamiento 2 final, se observa un aumento en la concentración de hierro, azufre, aluminio, zinc, potasio, plomo, arsénico, cobre, cromo, circonio, níquel, mercurio y rubidio en comparación con la muestra inicial. Por otro lado, el cloro y el cobalto desaparecen, y aparece un nuevo elemento, el molibdeno.

En resumen, al comparar el relave inicial con el tratamiento 2 final, se puede evidenciar que los elementos que experimentaron un aumento en su concentración fueron el silicio, aluminio, zinc, potasio, plomo, magnesio, titanio, fósforo, circonio, rubidio y molibdeno. Por otro lado, se observa que el estroncio aparece en el tratamiento 2 final, mientras que no está en la concentración de relave inicial, esto puede deberse a un componente presente en la composición del compost.

4.7 Análisis mineralógico de los sólidos de las columnas antes y después de la irrigación por difracción de rayos X

Los resultados de los patrones de difracción de rayos X de las muestras analizadas muestran una mayor presencia de cuarzo (SiO_2), como se puede observar en las Tablas 4,5,6 y 7, ya que, en las cuatro muestras, el elemento con mayor concentración es el silicio (Si), debido a la composición del relave, como se detalla en la Tabla 2.

Luego de tener los resultados de fluorescencia de rayos X, se puede observar que los componentes de las muestras son similares, aunque varían en los porcentajes de concentración en cada una de ellas. Las fases minerales encontradas fueron: cuarzo (SiO_2), pirita (FeS_2), blenda (ZnS), cianita ($\text{Al}_2\text{O}_5\text{Si}$) y sulfato de potasio y zinc ($\text{K}_2\text{O}_8\text{S}_2\text{Zn}$).

En la Figura 13, al comparar las muestras de relave inicial y tratamiento 2 inicial, se observa que los patrones son similares. La principal diferencia se presenta en el tratamiento 2 inicial en el ángulo de difracción $2\theta=27,99^\circ$, lo cual puede deberse a las fases que están presentes en la muestra,

pero no coinciden con ninguna entrada de la base de datos del software utilizado para la caracterización de los datos mineralógicos, podrían ser componentes solubles atribuidos al compost. Además, con respecto a la concentración de estos componentes, como se muestra en la Tabla 5 y Tabla 6, en el tratamiento 2 inicial, se observa una mayor cantidad de cuarzo en comparación con la muestra de relave inicial. Por otro lado, la pirita, blenda y cianita son más abundantes en la muestra de relave inicial. Esto se debe a que la concentración de silicio es mayor en la muestra de tratamiento 2 inicial, mientras que la concentración de hierro, azufre y zinc es mayor en la muestra de relave inicial. En cuanto a la cianita, se puede notar que la concentración de aluminio y silicio es mayor en el tratamiento 2 inicial, pero su concentración es mayor en la muestra de relave inicial. Esto podría ser resultado de la presencia de algún componente en el compost que aumenta su concentración. Además, las proporciones de las otras fases minerales pueden variar, lo que también podría influir en este cambio.

En el caso de las muestras de tratamiento 2 inicial y final, también comparadas como se observa en la Figura 14, se destaca que la fase encontrada en el pico $2\theta=27,99^\circ$ desaparece y en $2\theta=23,65^\circ$ aparece un nuevo pico que contiene cianita y sulfato de potasio y zinc. Esto puede deberse a que la fase presente se disuelve y se transforma en una fase distinta.

Figura 13.

Difractograma del relave inicial y el tratamiento 2 inicial

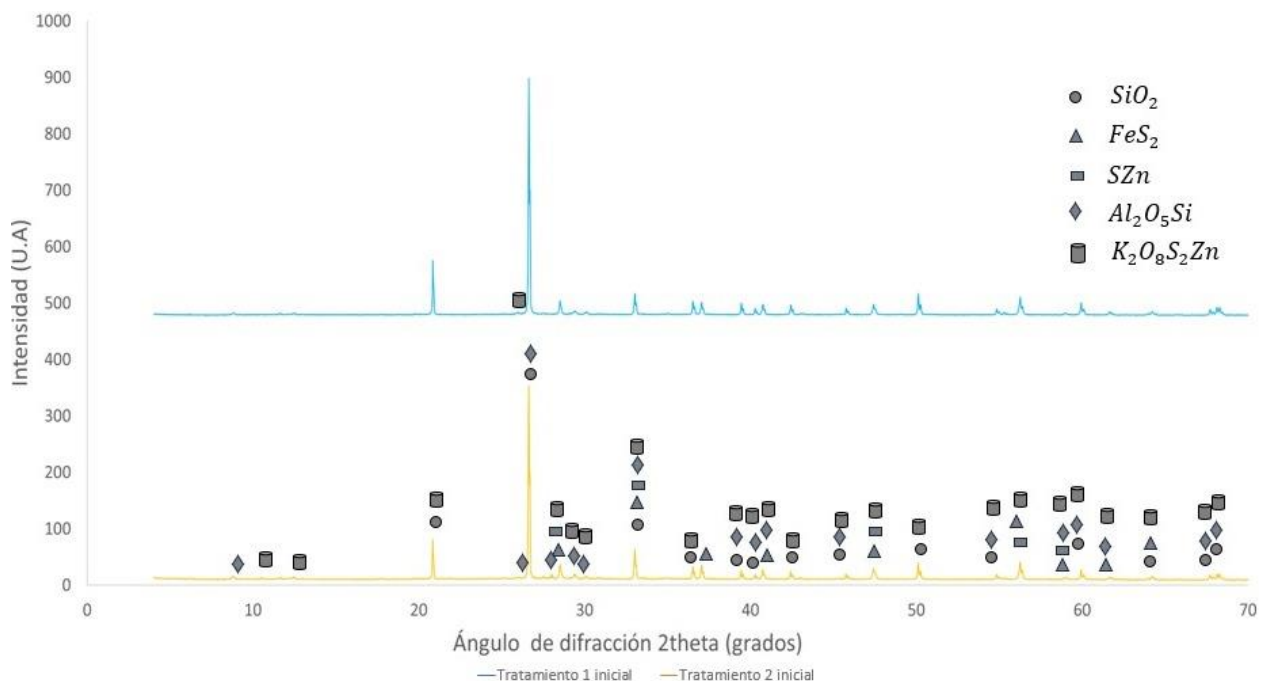
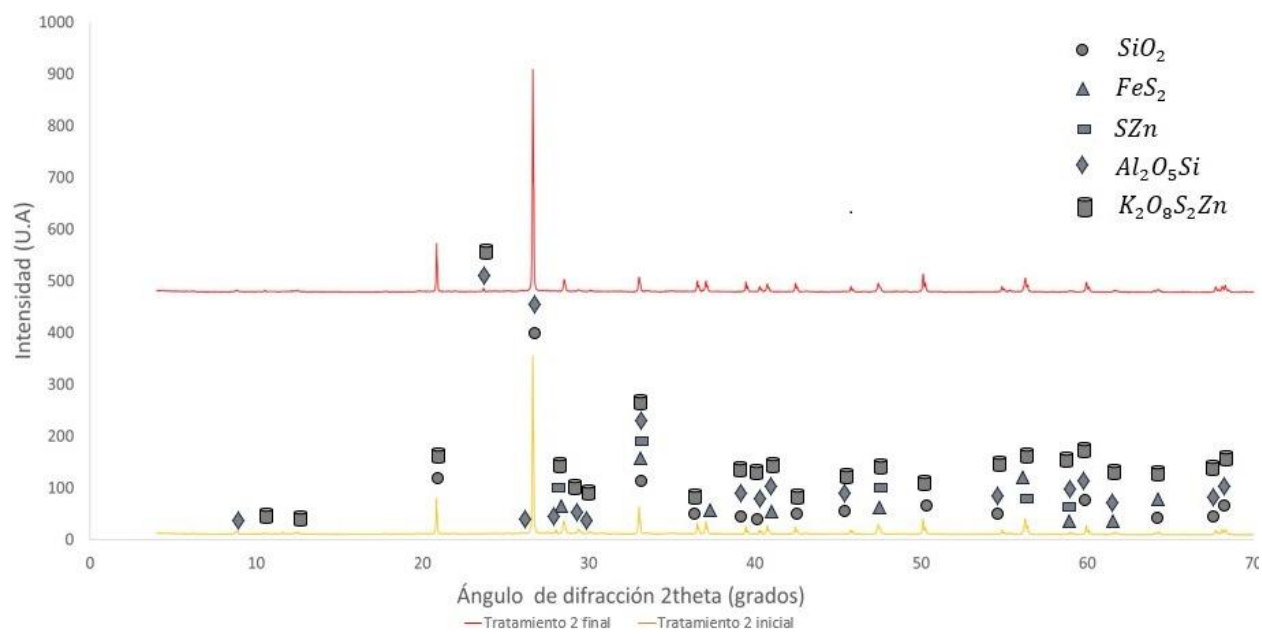


Figura 14.

Difractograma de la muestra del tratamiento 2 inicial y final



Los datos de las concentraciones de las fases minerales presentes en las muestras fueron obtenidos mediante el método de análisis semicuantitativo incorporado en el software Match.

Tabla 4.*Composición mineralógica del relave inicial*

Relave inicial			
Fórmula	Geometría del cristal	Fase emparejada	Cuantificación calculada (%)
ZnS	Cúbica	Blenda	0,9
SiO ₂	Trigonal-Hexagonal	Cuarzo	65,3
Al ₂ O ₅ Si	Triclínica	Cianita	24,9
FeS ₂	Cúbica	Pirita	7,4
K ₂ O ₈ S ₂ Zn	Monoclínica	Sulfato de potasio y zinc	1,5

Tabla 5.*Composición mineralógica de la muestra de tratamiento 1 final después de 10 semanas de irrigación*

Muestra de tratamiento 1 final			
Fórmula	Geometría del cristal	Fase emparejada	Cuantificación calculada (%)
ZnS	Cúbica	Blenda	0,7
SiO ₂	Trigonal-Hexagonal	Cuarzo	70,1
Al ₂ O ₅ Si	Triclínica	Cianita	23,3
FeS ₂	Cúbica	Pirita	3,0
K ₂ O ₈ S ₂ Zn	Monoclínico	Sulfato de potasio y zinc	2,9

Tabla 6.*Composición mineralógica del tratamiento 2 inicial*

Tratamiento 2 inicial			
Fórmula	Geometría del cristal	Fase emparejada	Cuantificación calculada (%)
ZnS	Cúbica	Blenda	0,2
SiO ₂	Trigonal-Hexagonal	Cuarzo	71,4
Al ₂ O ₅ Si	Triclínica	Cianita	19,6
FeS ₂	Cúbica	Pirita	7,3
K ₂ O ₈ S ₂ Zn	Monoclínica	Sulfato de potasio y zinc	1,5

Tabla 7.*Composición mineralógica del tratamiento 2 final*

Tratamiento 2 final			
Fórmula	Geometría del cristal	Fase emparejada	Cuantificación calculada (%)
ZnS	Cúbica	Blenda	0,7
K ₂ O ₈ S ₂ Zn	Monoclínica	Sulfato de potasio y zinc	2,5
SiO ₂	Trigonal- Hexagonal	Cuarzo	81,4
FeS ₂	Cúbica	Pirita	4,3
Al ₂ O ₅ Si	Triclínica	Cianita	11,0

5. Conclusiones

- El tiempo de implementación de los tratamientos aplicados al relave, y las condiciones a las que se operó no evidencian una mayor eficiencia en la cantidad de lixiviación del plomo, hierro y mercurio presentes en la muestra, por lo que no se detectaron valores que sean perjudiciales para el medio ambiente. Es posible decir que, los resultados de los tratamientos redujeron la cantidad de plomo hierro y mercurio de las muestras.
- La aplicación de enmiendas orgánicas e inorgánicas mostraron resultados favorecedores en cuanto a pH, conductividad eléctrica, cantidad de microorganismos e índice de germinación. Aunque todos los tratamientos presentaron valores satisfactorios, el más eficiente con respecto a pH, conductividad y microorganismos fue el tratamiento 2 que contenía enmienda orgánica (compost). Por otra parte, el índice de germinación mostró que en todas las columnas los tratamientos mejoran el crecimiento de las semillas de rábano, pero el tratamiento 1 (control) inhibe la germinación ya que su valor se encuentra por debajo del límite (80%).
- Después de los riegos realizados durante las 10 semanas el fósforo disponible para procesos biológicos presente en la mezcla que compone cada columna se libera, estas son condiciones positivas para el material. En todos los tratamientos el fósforo biodisponible aumenta, pero el valor más alto se obtiene en el tratamiento 3 (relave + compost + residuo siderúrgico), para el tratamiento 5 (arena), la cantidad de fósforo disminuye asumiendo que este fue arrastrado a lo largo del proceso.
- El mineral predominante en las muestras analizadas es el cuarzo, (SiO_2), con unas concentraciones que varían desde 65,3% para el relave inicial, 70,1% para el tratamiento 1

final, 71,4% para el tratamiento 2 inicial (relave + compost) y 81,4% para el tratamiento 2 final (relave + compost).

Referencias bibliográficas

- Charles (2001). Economía ambiental. México, Oxford University Press, 458p.
- Paradelo, R. (2013). Utilización de Materiales Compostados en la Rehabilitación Potencial de Espacios Afectados por Residuos Mineros y Suelos de Mina. Boletín Geológico y Minero.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jimenez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D, 16(2), 66-77.
- Luís Díaz, Hotman Laguna, Yenireth Gutiérrez, Aslenis Melo, Ana Vega 2020. Tratamiento de suelos mineros mediante co-compostaje con Biochar, estiércol ovino y residuos orgánicos domiciliarios.
- Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., Quilcat León, V., Bernui Paredes, F., Costilla Sánchez, N., Huaranga Arévalo, F., Huaranga Moreno, F., Méndez García, E., Quilcat León, V., Bernui Paredes, F., Costilla Sánchez, N., & Huaranga Arévalo, F. (2022). Cuantificación de Cu, Pb, As y Cd absorbidos por el “girasol” *Helianthus annuus* L. (Asteraceae) presentes en suelos agrícolas contaminados por relaves mineros. *Arnaldoa*, 29(1), 119-136. <https://doi.org/10.22497/ARNALDOA.291.29107>
- Ferrer, A. (2003). Intoxicación por metales. In Anales del sistema sanitario de Navarra (Vol. 26, pp. 141-153). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.
- Campos, H. 1987. Metales pesados, su contaminación y sus efectos tóxicos. Revista Contaminación Ambiental: 9 (17): 63 - 70.
- Berdonces, J. L. (1996). Toxicidad de metales y oligoelementos y de aditivos alimentarios. *Natura Medicatrix: Revista médica para el estudio y difusión de las medicinas alternativas*, (45), 20-25.
- Martin, C.W. 2000. Heavy Metals Trends in Floodplain Sediments and Valley Fill. *Catena* 39, 53-68.

- Hormaza, Anali Cyntia. Influencia del compost de estiércol animal en la biorremediación de metales pesados en suelos contaminados con relaves mineros, Huari – La Oroya, 2019. Huancayo: Facultad de ingeniería Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental 2020.
- Hernández Angélica, Calderón Arley, Medina Camilo, Sánchez Viviana, Oviedo Edgar (2020). Implementación de estrategias para optimizar el co-compostaje de residuos verdes y residuos alimentarios en países en vías de desarrollo. Un estudio de caso: Colombia.
- Londoño Olivera, I. P. (2020). Biorremediación como estrategia para la recuperación de suelos mineros contaminados con mercurio, cadmio y plomo (Hg, Cd, Pb).
- Diaz Orihuela, A. S., & Guevara Delgado, A. C. (2021). Revisión sistemática de tecnologías aplicadas para la remediación de suelos contaminados con metales pesados por lixiviados en suelos agrícolas y mineros.
- Díaz, L., Laguna, H., Gutiérrez, Y., Melo, A., & Vega, A. (2020). Tratamiento de suelos mineros mediante co-compostaje con Biochar, estiércol ovino y residuos orgánicos domiciliarios. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(2), 11-18.
- Higa, T., & Parr, J. F. (2013). Microorganismos Benéficos y efectivos para una agricultura y medio ambiente sostenibles. Maryland (USA): Centro internacional de Investigación de Agricultura Natural, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 13(2), 128-135.
- Osorio-Vega, N. W. (2009). Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. *Cenicafé*.
- Sarria, M.M., Cortés, L.E. y Peinado, J.M. (2015). Evaluación de la recuperación de suelos contaminados por el vertido de Aznalcóllar. *Acta Agronómica*, 64(2), 156-164.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169933767007>

Taewoon Hwang, Carmen Mihaela Neculita y Jong-In Han (2012) - Precipitación de biosulfuros en relaves degradados modificados con compost a base de residuos de alimentos y zeolita.

Intagri. (2017). *Propiedades Físicas del Suelo y el Crecimiento de las Plantas* | Intagri S.C.
<https://www.intagri.com/articulos/suelos/propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas>

Hernández-Gómez, A., Calderón, A., Medina, C., Sanchez-Torres, V., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2021). Implementation of strategies to optimize the co-composting of green waste and food waste in developing countries. A case study: Colombia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 24321-24327.

Oviedo-Ocaña, E. R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L. F., Hoyos, L. V., Gonzales, S., Barrena, R., Komilis, D., & Sanchez, A. (2015). Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management*, 44, 63–71. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.07.034>

Sostenible, S. A. (2015). Decreto 1076 de 2015.

Garrido Piñeres, A. D. (2023). *Validación de un método analítico para la determinación de fósforo total en aguas naturales y residuales por el método del ácido ascórbico*.
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/7553>

María, P., & Valentinuzzi, C. (2008). *Análisis por XRF: Implementación de Guías de Haces en TXRF*
Análisis por fluorescencia de rayos X: Implementación de guías de haces en reflexión total.

Barbara, L., & Christine, M. (n.d.). *Difracción de rayos X en polvo (DRX)*. Retrieved September 20, 2023, from https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html.

- Oviedo-Ocana, E. R., Soto-Paz, J., Torres, V. S., Castellanos-Suarez, L. J., & Komilis, D. (2022). Effect of the addition of the *Bacillus* sp., *Paenibacillus* sp. bacterial strains on the co-composting of green and food waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107816.
- Muñoz-Hernandez, E. J., Teja-Ruíz, A. M., Reyes-Pérez, M., Reyes-Domínguez, I. A., Urbano-Reyes, G., & Juárez-Tapia, J. C. (2022). Lixiviación de Pb y Zn empleando el sistema Tiourea-EDTA. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial7), 60-65.
- Intagri, S. C. (2018). *Disponibilidad de Nutrientos y el pH del Suelo*. Serie Nutrición Vegetal, (113). <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientos-y-el-ph-del-suelo>
- Cremona, M. V., & Enriquez, A. S. (2023). *Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/209253>
- Intagri. (2016). *La Salinidad de los Suelos, un Problema que Amenaza su Fertilidad*. | Intagri S.C. <https://www.intagri.com/articulos/suelos/salinidad-de-suelos-problema-de-fertilidad>
- Moreno, C. M., González, A., & Blanco, M. J. (2004). Tratamientos biológicos de suelos contaminados: contaminación por hidrocarburos. Aplicaciones de hongos en tratamientos de biorrecuperación. *Rev Iberoam Micol*, 21(1), 103-120.
- Callupe Vargas, N. J. (2020). Viabilidad de un método toxicológico a partir de la germinación del rábano (*Raphanus sativus* L.) para determinar toxicidad de suelos contaminados por hidrocarburo en laboratorio. *Universidad Nacional Agraria de La Selva*. <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/1833>
- Sanzano Agustín. (n.d.). *El fósforo del suelo*.

Apéndices

Apéndice A. Caracterización química de la mezcla inicial compostada

Compuesto	%Concentración
GW	50,0
UFW	32,5
SW	13,0
PFW	2,5
PR	2,0

Nota. GW: Residuos verdes, UFW: Residuos de alimentos no procesados, PFW: Residuos de alimentos procesados, SW: Aserrín, PR: Roca fosfórica.

Apéndice B. Caracterización química del residuo siderúrgico

Óxido	%p/p	Óxido	%p/p
Fe ₂ O ₃	51,47	CuO	0,155
ZnO	11,87	Cl	0,153
CaO	10,95	BaO	0,0886
SiO ₂	9,28	NiO	0,0412
MgO	4,92	SrO	0,0356
Al ₂ O ₃	4,08	SnO ₂	0,0319
MnO	2,78	V ₂ O ₅	0,0296
SO ₃	1,88	ZrO ₂	0,0108
Cr ₂ O ₃	0,601	Nb ₂ O ₅	0,0096
Na ₂ O	0,561	MoO ₃	0,0093
TiO ₂	0,292	WO ₃	0,0081
K ₂ O	0,282	Cs ₂ O	0,0079
P ₂ O ₅	0,254	Br	0,0015
PbO	0,202		

Apéndice C. Análisis estadístico del Índice de germinación

Tabla C1.

Índice de germinación de las muestras sólidas

Índice de germinación						
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4	Tratamiento 5	Blanco
Muestra 1	36,5	94,2	98,0	104,1	121,3	103,4
Muestra 2	80,5	79,9	93,1	100,6	135,0	93,1
Muestra 3	61,9	98,1	68,0	90,5	79,4	103,4
Muestra 4	78,7	58,7	128,9	109,0	110,2	
Muestra 5	55,5	111,3	72,5	110,8	88,1	
Muestra 6	86,1	53,5	111,3	73,0	93,2	

Tabla C2.

Análisis estadístico del índice de germinación

Análisis estadístico						
	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Tratamiento 3	Tratamiento 4	Tratamiento 5	Blanco
Índice de germinación promedio	66,5	82,6	95,3	98,0	104,5	100,0
Desviación estándar	18,8	22,9	23,1	14,2	21,3	6,0
Mediana	70,3	87,1	95,5	102,3	101,7	103,4
Valor máx.	86,1	111,3	128,9	110,8	135,0	103,4
Valor mín.	36,5	53,5	68,0	73,0	79,4	93,1

Apéndice D. Fluorescencia de rayos x de las muestras sólidas de las columnas

Tabla D1.

Composición química de una muestra de tratamiento 1 final

Muestra de tratamiento 1 final			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Si	29,53%	SiO ₂	63,17%
Fe	7,26%	Fe ₂ O ₃	10,39%

S	5,53%	SO ₃	13,82%
Al	3,63%	Al ₂ O ₃	6,85%
Zn	1,11%	ZnO	1,38%
K	0,95%	K ₂ O	1,15%
Pb	0,61%	PbO	0,66%
Ca	0,51%	CaO	0,71%
Mg	0,44%	MgO	0,73%
As	0,33%	As ₂ O ₃	0,44%
Cu	0,24%	CuO	0,31%
Ti	0,15%	TiO ₂	0,25%
Mn	0,04%	MnO	0,05%
P	0,02%	P ₂ O ₅	0,04%

Elementos minoritarios

Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Cr	77 PPM	Cr ₂ O ₃	0,01%
Zr	72 PPM	ZrO ₂	97 PPM
Hg	56 PPM	Hg	56 PPM
Ni	54 PPM	NiO	69 PPM
Rb	32 PPM	Rb ₂ O	35 PPM

Tabla D2.

Composición química de una muestra del tratamiento 2 inicial

Tratamiento 2 inicial			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Si	28,57%	SiO ₂	61,13%
Fe	7,39%	Fe ₂ O ₃	10,56%
S	5,35%	SO ₃	13,37%
Al	4,43%	Al ₂ O ₃	8,36%
Ca	1,14%	CaO	1,59%
Zn	1,03%	ZnO	1,28%
K	0,83%	K ₂ O	1,00%
Pb	0,51%	PbO	0,55%
Mg	0,51%	MgO	0,84%
As	0,29%	As ₂ O ₃	0,39%
Cu	0,23%	CuO	0,28%
Ti	0,20%	TiO ₂	0,34%
P	0,06%	P ₂ O ₅	0,13%
Mn	0,04%	MnO	0,05%

Cl	0,03%	Cl	0,03%
Elementos minoritarios			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Cr	63 PPM	Cr ₂ O ₃	93 PPM
Zr	63 PPM	ZrO ₂	85 PPM
Ni	56 PPM	NiO	71 PPM
Hg	55 PPM	Hg	55 PPM
Sr	38 PPM	SrO	44 PPM
Rb	23 PPM	Rb ₂ O	25 PPM
Co	8 PPM	CoO	10 PPM

Tabla D3.

Composición química de una muestra del tratamiento 2 final

Tratamiento 2 final			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Si	26,69%	SiO ₂	57,11%
Fe	8,41%	Fe ₂ O ₃	12,03%
S	5,76%	SO ₃	14,38%
Al	5,14%	Al ₂ O ₃	9,71%
Zn	1,30%	ZnO	1,62%
K	1,01%	K ₂ O	1,22%
Pb	0,78%	PbO	0,84%
Ca	0,66%	CaO	0,93%
Mg	0,46%	MgO	0,77%
As	0,39%	As ₂ O ₃	0,52%
Cu	0,29%	CuO	0,36%
Ti	0,18%	TiO ₂	0,29%
P	0,05%	P ₂ O ₅	0,12%
Mn	0,04%	MnO	0,05%
Cr	0,01%	Cr ₂ O ₃	0,02%
Elementos minoritarios			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Ni	70 PPM	NiO	89 PPM
Zr	68 PPM	ZrO ₂	92 PPM
Hg	67 PPM	Hg	67 PPM
Rb	34 PPM	Rb ₂ O	37 PPM
Mo	25 PPM	MoO ₃	37 PPM
Sr	21 PPM	SrO	25 PPM

Apéndice E. Realización de mezclas para los tratamientos**Figura 15.***Relave + Compost***Figura 16.***Relave + Compost + Residuo siderúrgico***Figura 17.***Relave + Compost + Piedra caliza*

Apéndice F. pH de cada uno de los tratamientos iniciales**Figura 18.**

pH de cada uno de los tratamientos iniciales

**Figura 19.**

Equipo usado para la medición del pH y la conductividad eléctrica - Medidor portátil HI9814



Apéndice G. Muestras recolectadas del lixiviado de los tratamientos**Figura 20.**

Lixiviados de los tratamientos

**Apéndice H. Sección del muestreo realizado para el índice de germinación****Figura 21.**

Siembra de semillas de rábano en cajas Petri

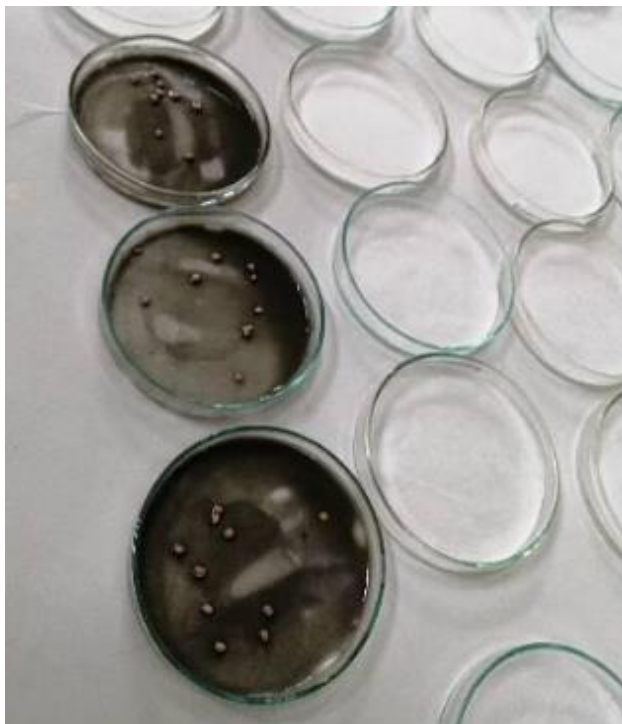


Figura 22.

Resultado de germinación de las semillas de rábano en cada uno de los tratamientos

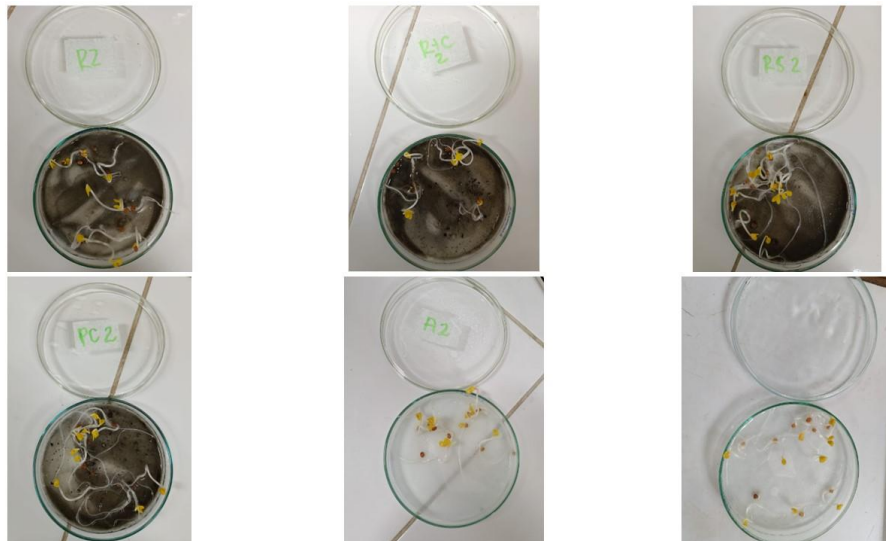


Figura 23.

Largo de la radícula de una semilla de rábano



Figura 24.

Almacenamiento de semillas



Apéndice I. Sección de fosfato biodisponible

Figura 25.

Preparación de muestras de fosfato





Figura 26.

Muestras finales de fosfato



Figura 27.
Estudio del fosfato biodisponible

	LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES POST-ANALITICO	Código: F-PA-02	
	INFORME DE RESULTADOS	Versión: 12	
	Fecha: 2022/1/21 Página 1 de 3		



-Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 0400 de 2019, en los parámetros: Acidez total, Cloruro, DBO₅, DQO, Detergentes, Fosfatos, Ruido sónico total, Hierro Total, metales pesados en la matriz agua (Cd, Cr, Cu, Co, Mn, Ni, Pb, Zn, Hg y Ag); Nitrosos, Nitritos, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, tipo de muestras: compuesta, simple o parcial; parámetros medidos en campo: pH, temperatura, sólidos sedimentables y oxígeno, en la matriz: suelos pH y Metales Pesados (Cd y Pb); TCPL en Residuos peligrosos Metales (Cd, Ag, Pb, Zn, Ba, Cr y Al)



Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano*





Certificación ICA sobre el control de calidad de fertilizantes de uso agrícola, mediante Resolución N. 72127 del 27 de julio de 2020; en los parámetros de: Azufre, Boro, Selenio Soluble, Calcio, Cobre, Cromo, Mercurio, Magnesio, Molibdeno, Níquel, Plomo, Sodio y Zinc por Absorción Atómica; CIC, Capacidad de Retención por agua, Carbonatos por volumetría, Carbono Orgánico Oxidable total, Cevitas, conductividad, Contenido de nitrógeno, pH, P, K, N, Al, Hg, Humedad

Informe de resultados No.	I-23-006	Fecha de emisión:	Enero 19 de 2023
Cliente:	PEDRO DEL VASTO		
Dirección del cliente:	Escuela de Ingeniería Química - UIS		
Solicitud de servicio No.	23-011	No. de muestras:	10
Fecha de recepción de las muestras:	Enero 18 de 2023		
Muestras recibidas por:	Natalia Gallo Corzo		
Fecha de análisis:	Enero 18 de 2023		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	23-011-01...23-011-010	Tipo de muestra:	Compuesta
Identificación de la muestra:	Ver tabla adjunta		
Matriz de la muestra:	SOLUCIONES - LIXIVIADOS		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS – Escuela de Ingeniería Química		
Fecha del muestreo:	N.A.		

CODIFICACIÓN DE LA MUESTRA	PARAMETRO	RESULTADO	MÉTODO*
23-011-01	Fosfatos (mg PO ₄ ⁻³ /L)	0,27	Espectrofotométrico- SM 4500- PO ₄ ⁻³ -E
23-011-02		0,17	
23-011-03		0,26	

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALÍTICO	Versión: 11	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2022/11/21 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. 1-23-006Solicitud de servicio No. 23-011

CODIFICACIÓN DE LA MUESTRA	PARAMETRO	RESULTADO	MÉTODO*
23-011-04	Fosfatos (mg PO ₄ ³⁻ /L)	0,23	Espectrofotométrico- SM 4500- PO ₄ ³⁻ -E
23-011-05		0,31	
23-011-06		0,53	
23-011-07		0,28	
23-011-08		0,21	
23-011-09		0,50	
23-011-10		0,43	

*Los métodos utilizados en la ejecución de los ensayos para los análisis realizados en el laboratorio, han sido tomados de las normas, métodos estándar o procedimientos internos, de acuerdo a la matriz y los parámetros analizados.

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado Cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA EN EL LABORATORIO, LA CUAL FUE SUMINISTRADA POR EL CLIENTE BAJO SUS CONDICIONES DE MUESTREO.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 232

Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Celular 3182061814

E-mail: labquimco@gmail.com, labquimico@uis.edu.co

Bucaramanga - Colombia

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 11	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2022/11/21 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-23-006

Solicitud de servicio No. 23-011

<p>Elaboró</p> <p><i>Natalia Gallo Corto</i></p> <p>Natalia Gallo Ingeniera Industrial Profesional de Calidad</p>	<p>Revisó</p> <p><i>Bibiana Herrera</i></p> <p>Bibiana Herrera Química. Esp. Coordinadora de Calidad</p>	<p>Aprobó</p> <p><i>Yolanda Vargas</i></p> <p>Yolanda Vargas Química. M.Sc. Directora del Laboratorio</p>
---	--	---

----- Fin del informe de resultados -----

LOS DATOS REPORTADOS EN ESTE INFORME DE ANÁLISIS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LA MUESTRA RECIBIDA EN EL LABORATORIO, LA CUAL FUE SUMINISTRADA POR EL CLIENTE BAJO SUS CONDICIONES DE MUESTREO.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Celular 3182061814
 E-mail: labquimco@gmail.com, labquimico@uis.edu.co
 Bucaramanga - Colombia

Apéndice J. Sección Fluorescencia y Difracción de rayos X**Figura 28.**

Muestras sólidas en la semana 10 del tratamiento

**Figura 29.**

Submuestras enviadas al laboratorio de rayos X UIS

