



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

**Valorización de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas
residuales para su uso óptimo como sustrato de enmiendas orgánicas en la
recuperación de suelos degradados.**

Tesis presentada por:

Mendoza Saniz, Carolina Lucero

ORCID: 0009-0003-9326-1583

Quispe Ccallo, Nancy Elizabeth

ORCID: 0009-0006-8137-1373

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesora:

Mg. Benegas Llanos, Rosario Carolina

ORCID: 0000-0002-1728-4949

Arequipa – Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 26 de Mayo del 2026

Dictamen: 012161-C-EPIA-2026

Visto el borrador del expediente 012161, presentado por:

2019246262 - QUISPE CCALLO NANCY ELIZABETH

2019244812 - MENDOZA SANIZ CAROLINA LUCERO

Titulado:

**VALORIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES PARA SU USO ÓPTIMO COMO SUSTRATO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN LA
RECUPERACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**29727348 - LAZARTE ARREDONDO SONIA
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**29519918 - BEJARANO MEZA MARIA ELIZABETH
DICTAMINADOR**



VALORIZACIÓN DE BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDU. SU USO ÓPTIMO COMO SUSTRATO DE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN LA RECUPERACIÓN DE SUEL DEGRADADOS.

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

11%

TRABAJOS DEL ESTUD

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

Excluir citas

Excluir bibliografía

Apagado

Apagado

Excluir coincidencias

< 1%

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía y darme la confianza para seguir adelante en cada desafío presentado.

A mis padres, Bernardino y Nalda, por su amor, apoyo incondicional, esfuerzo y constante motivación durante todo el proceso. Gracias por ser mi mayor fortaleza y por acompañarme en cada paso con su ejemplo y confianza.

A mis hermanos, por su compañía, comprensión y apoyo constante, así como por brindarme ánimo en los momentos más difíciles.

A mi compañera de tesis, Nancy, por acompañarme en este desafío, y compartir este camino de aprendizaje y crecimiento.

Carolina L. Mendoza Saniz

El presente trabajo de tesis está dedicado a mi amada madre Sonia, por su ejemplo de vida, su esfuerzo, el apoyo incondicional en cada etapa de mi formación y, sobre todo, por creer en mis capacidades.

A mis hermanos, con todo el cariño, esperando que este logro pueda representar en ustedes una razón más para creer en sus propias capacidades.

A Dios, por ser mi guía y brindarme fortaleza en toda la etapa universitaria.

Nancy E. Quispe Ccallo

Agradecimientos

A mi familia, por ser el pilar fundamental en mi vida, apoyo y confianza desde el inicio de mi formación académica hasta alcanzar este importante logro profesional.

A mi compañera de tesis, Nancy, por acompañarme en esta importante etapa de nuestra vida profesional. De manera especial, agradezco al Ing. Antonio Salas y a la Dra. Elizabeth Bejarano por su orientación y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos, por su apoyo constante, motivación y confianza, fueron fundamentales para seguir adelante y alcanzar esta meta tan importante.

Carolina L. Mendoza Saniz

Quiero empezar agradeciendo a Dios por darme fortaleza, por estar en cada etapa de mi formación y durante el desarrollo de esta tesis.

A mí casa de estudios, por todos los conocimientos impartidos, las oportunidades brindadas, entre ellas el financiamiento obtenido mediante un concurso que hizo posible esta investigación. De manera conjunta, agradezco a mi compañera de tesis, Carolina, por su apoyo, compromiso y esfuerzo compartido y al Ing. Antonio Salas, por su orientación y valiosos aportes durante el desarrollo de la tesis y hacer posible este proceso.

Finalmente, expreso mi más profundo agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional, sacrificio y sobre todo la confianza depositada en mí. Gracias por acompañarme en cada paso que doy y que hicieron posible poder alcanzar esta meta profesional.

Nancy E. Quispe Ccallo

RESUMEN

La generación de biosólidos (BS) como subproducto de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) representa una problemática ambiental debido a las limitaciones asociadas a su disposición final. En este contexto, los suelos degradados del Parque Industrial Río Seco (PIRS), en Arequipa, requieren alternativas sostenibles para su recuperación. Por ello, la investigación tuvo como objetivo valorizar los BS generados en la PTAR mediante la elaboración de enmiendas orgánicas destinadas a la rehabilitación de suelos degradados.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental. Los BS fueron caracterizados y sometidos a un proceso de compostaje durante 90 días, evaluándose tratamientos con 10 %, 15 % y 20 % de BS. La calidad de las enmiendas se determinó mediante análisis, considerando la relación C/N como indicador de madurez. Posteriormente, las enmiendas fueron aplicadas en un suelo degradado del PIRS para evaluar la germinación de *Helianthus annuus* y la reducción de la concentración de Cr. Los datos obtenidos fueron analizados mediante ANOVA y las pruebas de Tukey y LSD de Fisher.

Los resultados mostraron que los BS iniciales presentaron una relación C/N de 4.26, lo que evidenció baja estabilidad para su aplicación directa. Luego del compostaje, las enmiendas cumplieron con la NTP 201.208:2021, registrando valores de pH entre 7.14 y 8.22 y relaciones C/N entre 11.64 y 13.70. El tratamiento con 20 % de BS alcanzó el mayor grado de madurez, mientras que el tratamiento con 10 % presentó el mayor porcentaje de germinación a los 15 días. Asimismo, se obtuvo una remoción máxima de Cr de 43.40 % y una remoción promedio de 28.45 %. Se concluye que las enmiendas obtenidas son una alternativa viable para la rehabilitación de suelos degradados, al mejorar sus propiedades y contribuir a la reducción de Cr en el suelo.

Palabras claves: Enmienda orgánica, Biosólidos, recuperación de suelos.

ABSTRACT

The generation of biosolids (BS) as a by-product of wastewater treatment plants (PTAR) represents an environmental challenge due to the limitations associated with their final disposal. In this context, the degraded soils of the Río Seco Industrial Park (PIRS) require sustainable alternatives for their rehabilitation. Therefore, this study aimed to valorize BS generated at the PTAR through the production of organic amendments intended for the restoration of degraded soils.

The research was conducted using an experimental approach. BS were characterized and subjected to a composting process for 90 days, evaluating treatments containing 10%, 15%, and 20% BS. The quality of the amendments was determined through laboratory analyses, considering the C/N ratio as an indicator of maturity. Subsequently, the amendments were applied to degraded soil from the PIRS to evaluate the germination of *Helianthus annuus* and the reduction Cr concentration. The obtained data were analyzed (ANOVA), Tukey's test, and Fisher's LSD test.

The results showed that the initial biosolids had a C/N of 4.26, indicating low stability for direct application. After composting, the amendments complied with NTP 201.208:2021, presenting pH values ranging from 7.14 to 8.22 and C/N ratios between 11.64 and 13.70. The treatment containing 20% BS achieved the highest degree of maturity, while the 10% treatment showed the highest germination percentage after 15 days. In addition, a maximum Cr removal of 43.40% and an average removal of 28.45% were achieved. It is concluded that the obtained amendments constitute a viable alternative for the rehabilitation of degraded soils, improving their properties, and contributing to the reduction of Cr concentration in the soil.

Key words: Organic amendment, biosolids, soil recovery.

ÍNDICE

Dedicatoria

Agradecimientos

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I..... 4

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 5

1.1. Planteamiento del problema y su relevancia 5

1.2. Justificación de la investigación..... 6

1.3. Hipótesis..... 8

1.4. Objetivo de la Investigación 9

1.5. Variables e Indicadores 9

CAPÍTULO II 11

2. FUNDAMENTO TEÓRICO..... 12

2.1. Antecedentes de la Investigación 12

2.2. Marco Teórico 16

2.3. Marco legal 27

CAPÍTULO III..... 30

3. METODOLOGÍA..... 31

3.1. Tipo y Nivel de Investigación 31

3.2.	Localización geográfica y características del área de estudio.....	32
3.3.	Métodos de investigación.....	33
CAPÍTULO IV		47
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	48
4.1.	Caracterización Físicoquímica y Microbiológicos de los Biosólidos	48
4.2.	Evaluación de la Enmienda obtenida del proceso de Compostaje	53
4.3.	Evaluación del Biosólido Compostado en suelos degradados del PIRS.....	63
CAPÍTULO V.....		83
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
5.1.	CONCLUSIONES.....	84
5.2.	RECOMENDACIONES	85
CAPÍTULO VI.....		87
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores y Variables de la Investigación.	10
Tabla 2. Parámetros de seguimiento para el compostaje	18
Tabla 3. Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y B	21
Tabla 4. Parámetros de higienización de biosólidos.	21
Tabla 5. Tipo y nivel de Investigación.	31
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.	34
Tabla 7. Factores del diseño experimental.	36
Tabla 8. Cuadro de tratamientos de suelo para la germinación.	43
Tabla 9. Resultados fisicoquímicos y microbiológicos.	47
Tabla 10. Cuadro de comparación de parámetros	50
Tabla 11. Resultados de Parámetros según la NTP 201.207	52
Tabla 12. Relación de C/N según tratamiento.	54
Tabla 13. Análisis de Varianza de la relación C/N	56
Tabla 14. Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%	57
Tabla 15. Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher	58
Tabla 16. Tabla de comparación de suelo de la PIRS y tratamientos	62
Tabla 17. % de germinación plántulas germinadas por tratamiento en relación con el tiempo.	64
Tabla 18. Supervivencia de plántulas según tratamiento	68
Tabla 19. Análisis de Varianza en la germinación del girasol en 15 días.	71
Tabla 20. Agrupar información utilizando el método de Tukey.	71
Tabla 21. Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher .	72
Tabla 22. Análisis de Varianza en la germinación del girasol en 30 días.	74
Tabla 23. Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.	74

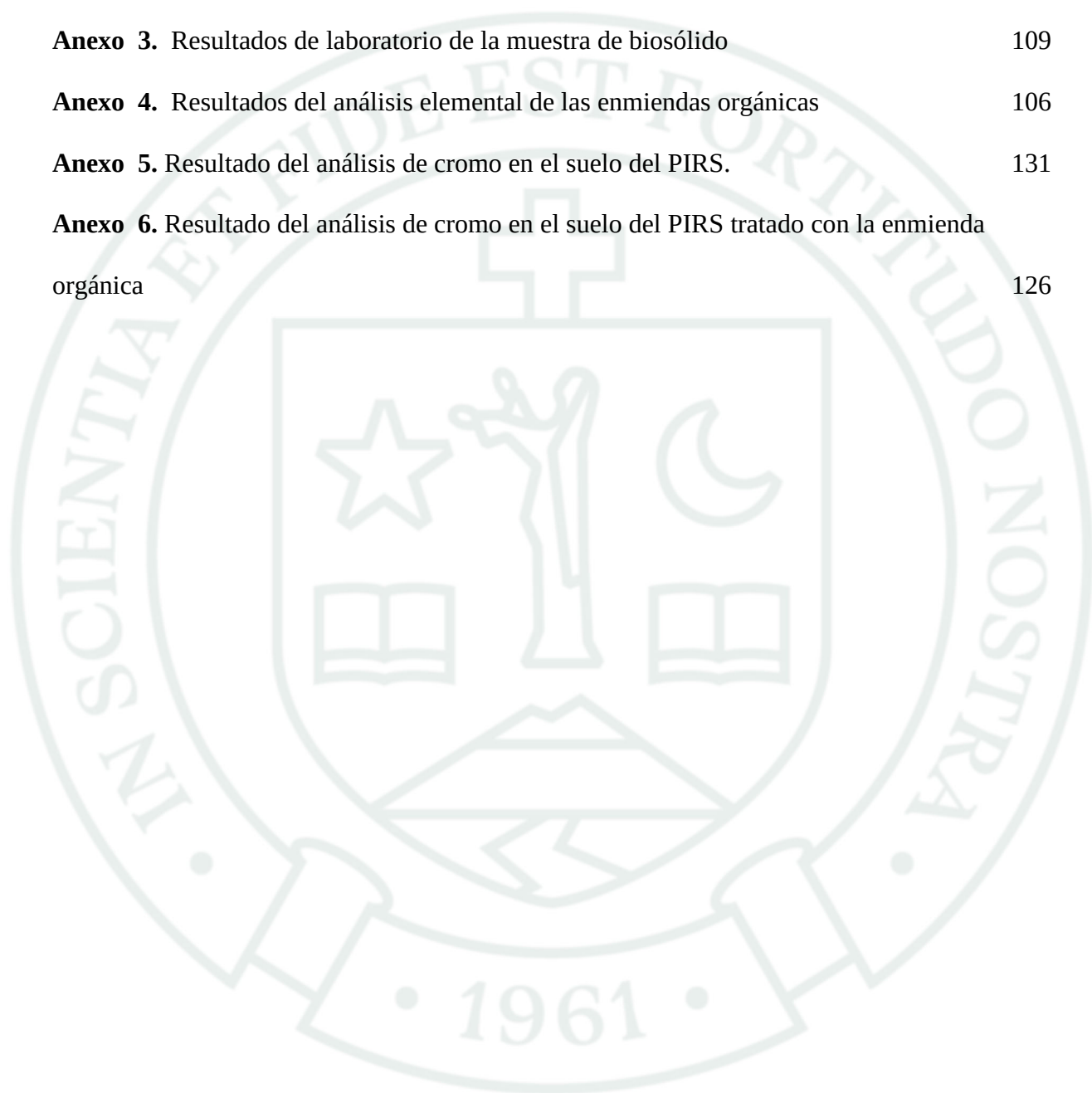


ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma de la PTAR "La Escalerilla"	23
Figura 2. Mapa de la PTAR “La Escalerilla” – Arequipa	32
Figura 3. Proceso de la técnica de cuarteo para la muestra de biosólidos	33
Figura 4. Procedimiento de armado del compost de biosólido.	35
Figura 5. Planilla de control de proceso.	38
Figura 6. Proceso de toma de muestra de los parámetros.	39
Figura 7. Puntos de toma de muestra del suelo del PIRS.	41
Figura 8. Procedimiento para la germinación de plántulas.	43
Figura 9. Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Tukey	57
Figura 10. Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Fisher a un 95% de confianza.	58
Figura 11. Efecto del porcentaje de biosólido en la relación C/N.	59
Figura 12. Curvas de Germinación en un periodo de 30 días	66
Figura 13. Gráfico del % de supervivencia en razón a los tratamientos del suelo y enmienda.	68
Figura 14. Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Tukey.	72
Figura 15. Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método. de Fisher.	73
Figura 16. Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Tukey a un 95% de confianza.	75
Figura 17. Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Fisher.	76
Figura 18. Efecto del porcentaje de biosólido en la relación al % Germinación en un periodo de 15 y 30 días.	77

ÍNDICES DE ANEXOS

Anexo 1. Acreditación de BHIOS LABORATORIO S.R.L.	106
Anexo 2 . Tabla de Control de Seguimiento	107
Anexo 3. Resultados de laboratorio de la muestra de biosólido	109
Anexo 4. Resultados del análisis elemental de las enmiendas orgánicas	106
Anexo 5. Resultado del análisis de cromo en el suelo del PIRS.	131
Anexo 6. Resultado del análisis de cromo en el suelo del PIRS tratado con la enmienda orgánica	126



INTRODUCCIÓN

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) tienen como subproducto los biosólidos. Se debe entender que la calidad y cantidad de dicho subproducto se relaciona estrechamente con los procesos a los que son sometidos, representando en promedio el 3% del agua tratada (Buta et al., 2021), sin embargo, su producción ha tenido aumentos constantes, lo que lleva a que las empresas prestadoras de este servicio tengan un problema en cuanto a la acumulación de biosólidos. A nivel mundial se proyecta que para el año 2030 la producción llegue a 36,9 millones de toneladas seca, considerando que sólo EE.UU. produce al año 3,76 millones (Xue et al., 2025). Por otro lado, es importante mencionar que la regulación de los biosólidos se basa en el reaprovechamiento de estos, considerando la economía circular, enfocado su aplicación como sustrato en los suelos ya sea en agricultura, minería y/o silvicultura (Reid et al., 2025).

La generación de biosólidos en la actualidad representa una problemática en cuestión de la gestión de estos subproductos. En la ciudad de Lima se producen aproximadamente 2500 Tn de lodos, lo que representa un desafío debido a la ausencia de espacio adecuado para su disposición final (Eche & Cruz, 2021). En el caso de la PTAR “La Escalerilla”, se genera en un promedio de 30 Tn al mes; aunque un porcentaje de estos biosólidos es distribuido a viveros, este volumen representa una parte mínima, debido a esto, se produce una acumulación progresiva (Apaza & Quirita, 2020).

El Parque Industrial Río Seco (PIRS) está ubicado en el distrito de Cerro Colorado de la provincia y departamento de Arequipa, con una extensión total de 200 Ha (García, 2016). Donde se desarrolla la parte industrial de la zona sur del Perú. El propósito de la creación de esta área fue solucionar el problema de las descargas de aguas residuales provenientes de curtiembres que se encuentran alrededor del Río Chili. En el PIRS se encuentran industrias de

curtiembre que representan el 53% del total de empresas ubicadas en dicha zona y esto conlleva impactos ambientales negativos producto de sus actividades productivas (Pineda, 2019).

La contaminación producida por las industrias presentes del PIRS, muestra que sus efluentes tienen una gran carga de metales pesados. Se estima que el 80% de contaminación proviene de la industria de curtiembre y el 20% a efluentes combinados (L. Chávez & Alpaca, 2014). Entre los diferentes contaminantes ecotóxicos se encuentra As, Cd, Pb y Cr; sin embargo, este último fue seleccionado como caso de estudio debido a su predominancia en efluentes de curtiembre y a los impactos negativos que genera tanto en el ecosistema como en la salud humana (Dueñas et al., 2014). La industria de curtiembre genera como uno de sus principales contaminantes al cromo trivalente (Cr III), el cual representa aproximadamente el 25% del vertido al alcantarillado en el proceso de curtido, cuando este compuesto entra en contacto con un agente oxidante llega a su máxima valencia, convirtiéndose en cromo hexavalente (Cr VI), una forma más tóxica para el medio ambiente (Solis, 2020).

Frente a la acumulación de biosólidos generados en las PTAR y la problemática de suelos contaminados en el PIRS, una de las alternativas de solución para la rehabilitación de suelos es mediante la aplicación de enmiendas orgánicas. Rodríguez-Berbel et al., (2025) señalaron que las enmiendas orgánicas y lodos de depuradora previamente estabilizadas mejoran el contenido de nutrientes y la comunidad microbiana en suelos degradados o contaminados en mediano plazo. Asimismo, diversos estudios reportaron que la aplicación de biosólidos previamente estabilizados pueden inmovilizar metales pesados, el cual favorece su retención en el suelo y mejora sus propiedades fisicoquímicas.

Sin embargo, en la región de Arequipa existe limitada información sobre el uso de biosólidos compostados que son provenientes de las PTARS para la recuperación de suelos contaminados con cromo en especial en zonas industriales como el PIRS. En tal sentido, la

presente investigación se centró en valorizar los biosólidos generados en PTAR mediante el compostaje y su aplicación como enmienda orgánica en la rehabilitación de suelos degradados y contaminados con cromo del PIRS.





1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema y su relevancia

La degradación del suelo se ha convertido en un problema global que amenaza gravemente al medio ambiente, en especial en las regiones áridas y semiáridas del mundo. La erosión del suelo elimina entre 25 a 40 000 millones de toneladas al año de capa arable, esto significa una reducción significativa de los rendimientos agrícolas y la capacidad de suelo para retener y reciclar nutrientes, agua y carbono FAO (2015).

Además, diversas industrias como la minería y la industria textil contribuyen a la degradación del suelo debido a una inadecuada gestión de sus residuos, generando erosión y contaminación. Hasta el año 2018 en el Perú se ha identificado un total de 22 248 200 hectáreas de áreas degradadas, lo que significa que un 17.5% de la superficie de todo el país se ve afectada por este problema. Siendo las principales causas la salinización, contaminación por relaves mineros, sobrepastoreo, erosión eólica e hidráulica (CEPES, 2015; MINAM, 2020).

En el PIRS, se realizan diferentes actividades industriales siendo la principal, la industria de curtido de cuero donde cada uno de sus procesos generan diferentes tipos de contaminantes como el cromo VI, que al ser introducido al medioambiente suele acumularse en los sedimentos y/o transformarse en subproductos, generando eutrofización de suelo y lixiviados de metales pesados con destino incierto hacia otros cuerpos ambientales (Medina Arias, 2023). Esto representa problemas e impactos negativos en el suelo y la población ya que estos metales son altamente tóxicos y cancerígenos (Roque R. et al., 2016).

En este sentido, entre los diferentes metales pesados asociados a las actividades industriales del PIRS, el cromo es uno de los principales contaminantes debido a la elevada presencia de empresas dedicadas al curtido de cuero, así como a su elevada toxicidad, persistencia y capacidad de acumulación en el suelo. El cromo representa un riesgo ambiental

y para la salud humana debido a su elevada movilidad y potencial carcinogénico, razón por la cual fue seleccionado como parámetro de evaluación (Roque R. et al., 2016).

Por otro lado, de acuerdo con el Informe Mundial Sobre el Desarrollo de Recursos Hídricos 2020 (WWDR por siglas en inglés) de las Naciones Unidas “Agua y Cambio Climático”, la inadecuada disposición de los lodos de la depuradora puede traer consecuencia para la atmósfera, debido a que dicho residuo contribuye a la formación de Metano (CH₄) y óxido Nitroso (N₂O) (UNESCO, 2020). Así mismo, J. Guo et al. (2012) identificaron que alrededor del 58% de dichas emisiones son provenientes de los vertederos exclusivos para los lodos de tratamiento de aguas residuales y según las emisiones diferentes al Dióxido de Carbono (CO₂) sigan incrementado en los próximos años.

No obstante, a pesar de las investigaciones a nivel internacional sobre el reaprovechamiento de los biosólidos en la recuperación de suelos contaminados o degradados, en Arequipa aún son escasos los estudios relacionados con el uso de biosólidos compostados como enmienda orgánica para la recuperación de suelos impactados por actividades del PIRS. Asimismo, no se han identificado estudios locales que evalúen la respuesta germinativa de *Helianthus annuus* en suelos tratados con la enmienda orgánica proveniente del biosólido. En este contexto, surge la necesidad de investigar el potencial de los biosólidos compostados como alternativa para la recuperación de suelos degradados con presencia de cromo y la mejora de sus propiedades edáficas.

1.2. Justificación de la investigación

1.2.1. Ambiental

Los biosólidos compostados son una alternativa que garantizan suficientes nutrientes que ayudan a mejorar la estructura del suelo, el secuestro del carbono y la capacidad de retención de agua (M. Kumar et al., 2022; Proto & Courtney, 2023). Además, es un proceso

rentable, aeróbico, termófilo y de bajo riesgo ambiental que estabiliza y mejora las propiedades de los biosólidos (R. Li et al., 2020). La investigación contribuye al cumplimiento del ODS 15 que tiene como finalidad restablecer ecosistemas terrestres degradados y contaminados (Naciones Unidas, 2018).

La investigación no se limita a caracterizar los biosólidos producidos a nivel local, sino que también busca valorizar dichos materiales mediante el proceso de compostaje y evaluar su potencial aplicación en la recuperación de suelos degradados. Asimismo, pretende reducir la dependencia de fertilizantes inorgánicos comerciales, promoviendo el secuestro de carbono en el suelo, lo que contribuye a mitigar el calentamiento global, al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 13, *Acción por el clima* (Le & Price, 2024; Naciones Unidas, 2018). Además, promueve el manejo de biosólidos que forma parte del objetivo del DS N°015-2017-VIVIENDA, “Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generado en las PTAR”.

1.2.2. Social

La degradación y contaminación de los suelos en el Perú continúa siendo un riesgo significativo para la salud pública, la productividad agrícola y la estabilidad de los ecosistemas, especialmente en zonas rurales vulnerables. El PIRS es un claro ejemplo de ello. Estudios ambientales previos han identificado la presencia de metales pesados como As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb y Zn provenientes principalmente de vertimientos industriales (Vilca, & Gordillo, 2016).

La presente investigación no solo busca contribuir con la restauración de los suelos contaminados de la zona industrial, sino que también pretende generar un beneficio directo a las poblaciones cercanas que se ven afectadas, promoviendo un entorno más saludable ya que la prolongada exposición a los suelos con altas concentraciones de metales pesados puede afectar a la salud humana mediante la ingestión, inhalación o contacto dérmico, generando

efectos como neurotoxicidad, estrés oxidativo y acumulación de metales pesados en el organismo (Qu et al., 2025).

1.2.3. Económica

El biosólido es un subproducto que contiene nutrientes que mejoran la composición del suelo, por lo que puede ser aprovechado como enmienda orgánica proporcionando un valor agregado, ahorrando recurso económico en la disposición final y reduciendo hasta un 60% de gastos operativos de la PTAR (Amorim Junior et al., 2021; Elgarahy et al., 2024). También contribuye a las buenas prácticas de reutilización segura de biosólidos, que se consideran los aspectos legales viables y los principios de la economía circular; donde el residuo producido en la PTAR se convierte en materia prima (Prieto et al., 2017). Cabe resaltar que la recuperación de los suelos degradados no sólo beneficia desde una perspectiva ambiental; sino que también puede aumentar la capacidad de los suelos para fines comerciales como es el sector agrícola, generando productividad y rentabilidad de las tierras cultivables (Lu et al., 2016).

1.2.4. Técnico/científica

El proceso de compostaje de biosólidos representa una tecnología limpia y de bajo costo. Además, diversas investigaciones respaldan su capacidad para reducir o neutralizar la toxicidad de los metales pesados en el suelo, lo que a su vez mitiga los riesgos ambientales (Van Herwijnen et al., 2006; Xiong et al., 2022). Esto contribuye a garantizar una gestión más responsable de los residuos y la conversión de estos recursos en valiosos activos de la comunidad.

1.3. Hipótesis

Dado que las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales presentan una elevada generación de biosólidos y estos cuentan con un alto contenido de nutrientes y materia

orgánica, es posible que con un proceso adicional de compostaje estos puedan aprovecharse como sustrato de enmiendas orgánicas en la recuperación de suelos degradados del PIRS.

1.4. Objetivo de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Valorizar los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales para su uso óptimo como sustrato de enmiendas orgánicas en rehabilitación de suelos degradados.

1.4.2. Objetivos específicos

O.E.1: Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de los biosólidos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Escalerilla”.

O.E.2: Valorizar los biosólidos a través del proceso de compostaje para su aplicación como enmienda orgánica.

O.E.3: Evaluar el potencial del biosólido compostado como enmienda orgánica en suelos degradados del PIRS.

1.5. Variables e Indicadores

El diseño experimental que presenta la siguiente investigación se basa en la evaluación del efecto de diferentes tratamientos aplicados a suelos degradados mediante la variación de la cantidad de biosólido y el porcentaje de mezcla del suelo con la enmienda. En la Tabla 1 se detalla cada variable.

Tabla 1.*Indicadores y Variables de la Investigación.*

Variable	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	U. de Medida
Variable independiente: Elaboración de la enmienda orgánica	Proporción de biosólido en la mezcla de compostaje	Porcentaje de biosólido	Balanza	%
Variable Independiente: Aplicación de la enmienda al suelo degradado	Proporción de mezcla entre suelo degradado y enmienda orgánica.	% de suelo degradado en la mezcla	Proporción volumétrica	%
Variable dependiente: Calidad de la enmienda orgánica	Madurez de la enmienda	Relación (C/N)	FlashSmart F406	Und. De C/N
	Propiedades fisicoquímicas	pH del sustrato	Cintas de pH	Und. De pH
		Humedad	Prueba de compresión (manual)	%
		Temperatura	Termómetro	°C
Variable dependiente: Recuperación de suelo degradado	Remoción de contaminante	Porcentaje de remoción de cromo	Análisis de laboratorio: absorción atómica	%
Variable dependiente: Respuesta biológica	Supervivencia vegetal	Porcentaje de supervivencia de plántulas	Conteo directo	%
	Germinación de semillas	Porcentaje de germinación	Ensayo de germinación	%

Nota. Se presentan las variables de la investigación con sus respectivos indicadores.



CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

En los últimos años se han desarrollado diversas investigaciones sobre el tratamiento de los biosólidos y su aplicación como enmiendas orgánicas en la recuperación de suelos degradados; Wang et al. (2020) realizaron un análisis de respuestas en las comunidades microbianas en enmiendas de biocarbón y biosólidos, las cuales fueron sometidos en diferentes regímenes hídricos y se recolectó en el suelo (franco limosos de Yolo) de una parcela sin fertilizar; el experimento se desarrolló por un periodo de 12 semanas con diferentes niveles de biocarbón (0, 0.5, 1% de peso seco agregado al suelo seco) y biosólidos (0 y 0.5% de peso seco agregado al suelo seco), los resultados evidencian que la incorporación del biocarbón contribuyó al aumento del pH del suelo, en cambio la enmienda con biosólido redujo significativamente el pH del suelo húmedo, aumentando la biomasa microbiana en un 55% independientemente al régimen hídrico, y el nivel de nutrientes generó una reducción de los impactos de estrés por humedad en la comunidad microbiana del suelo.

En el artículo de Badzmierowski et al. (2020), desarrollaron la comparación de efectos de las enmiendas orgánicas: como los productos de biosólidos y los fertilizantes sintéticos convencionales; en la influencia de estrategias de riego (estación de verano); esto para observar las propiedades del suelo y la salud de la *Festuca arundinacea* Schreb; donde el diseño experimental se desarrolló a través de divisiones de parcelas, 5 subparcelas de fertilizantes sintéticos y 4 de productos de biosólido, con tratamiento de riego y sin aplicación de riego, el resultado de la aplicación de biosólidos mejoraron su calidad visual y el crecimiento de la planta en comparación de los fertilizantes, también se observó la reducción de la densidad aparente del suelo y un aumento de carbono y nitrógeno del suelo.

S. Kumar et al. (2020) evaluaron el impacto de la dosis de biocarbón en la dinámica de las bacterias resistentes a metales pesados en un compost de biosólidos, la metodología se desarrolló al aplicar una cantidad de biocarbón al compostaje de BS, durante 5 días en un reactor de 130 litros, esto para observar el desarrollo y la diversidad de la HMRB (bacterias resistentes a metales pesados), como resultado dio que la aplicación del biocarbón reduce significativamente la movilidad de la diversidad del HMRB en el compost de biosólidos y que además los parámetros fisicoquímicos se relacionan estrechamente con dichos resultados.

Asemaninejad et al. (2021) aplicaron enmiendas al suelo con el objetivo de manejar los relaves mineros con presencia de Cu, donde se examinó el desempeño de las mezclas de biosólidos municipales estabilizados con cal y compost; la metodología comenzó con la preparación del compost con proporciones de 30% de hojas, 30% de desechos de jardín, 10% de corteza y 10% de materiales de madera; seguidamente se procedió a dividir en bloques y 9 subtramas, y la mezcla a los 15 cm con biosólidos estabilizados; al tener la enmienda se aplicó en 9 dosis diferentes, niveles agrícolas y operativas, las cuales fueron desde 0, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 2400 y 3200 t ha⁻¹, finalmente se sembraron cebollas. Como resultado se obtuvo que los biosólidos superiores a 100 t ha⁻¹ pueden afectar negativamente al sustrato.

Jiang et al. (2021) evaluaron la influencia de los inhibidores de la ureasa en las propiedades del compostaje anaeróbico como la conversión de nitrógeno, las actividades enzimática y las comunidades de hongos durante este proceso, el compostaje se desarrolló en reactores separados en un volumen activo de 14 litros durante 20 días, después de ello se asignó los contenidos de urea con un 0.3% y 0.6% de la mezcla en base de peso seco; los resultados nos mostraron que la adición de Urea redujo emisiones de NH₃ en un 22.2% y 21.5%, como también aumentó el contenido de nitrógeno en 9.7% y 14.3%; además de ello se mostró la inhibición de la actividad enzimática durante la etapa termófila pero aumentó durante la etapa de enfriamiento y madurez.

Al-Lami et al. (2022), evaluaron la fitoestabilización asistida por enmiendas que emplea plantas y microorganismos. La enmienda con el propósito de retener los enlaces contaminantes, siendo una de las estrategias eficaces para la inmovilización de metales (Pb/Zn/Cu) en relaves mineros. Para ello, se evaluaron diferentes tratamientos de biosólidos (BS) y enmiendas ricas en carbono, como biocarbón (BC) y sustancias húmicas (HS), a tasas de aplicación del 3% y 5% con resultados de mejora de los BS en las propiedades del suelo, la actividad enzimática y la disponibilidad de nitrógeno, inmovilizando metales como Zn, Cu y Cd. La combinación de BC y BS inmovilizó el plomo (Pb), pero afectó negativamente la materia orgánica. Y, por último, los BS con HS promovieron un ciclo de nutrientes efectivo, mientras que el BC mejoró la purificación del agua y el control de la contaminación.

Las enmiendas orgánicas de biosólidos son una de las alternativas más frecuentes en diferentes investigaciones, es por ello que la investigación de Liu et al. (2022), evaluaron la efectividad de dos enmiendas orgánicas: el biochar y las astillas de madera, donde busca reducir la concentración y la lixiviación de productos farmacéuticos en los biosólidos, se realizó diferentes tratamiento: 100% biosólidos, biosólidos con astillas de madera y biosólidos con biocarbón; estos dos últimos tratamientos con una tasa de 20% de peso seco de biosólido; donde los resultados mostraron el beneficio de la reducción del pH, y el aumento de la conductividad eléctrica generando una degradación de los productos farmacéuticos por consiguiente mejorando la remoción y la lixiviación de estos productos, pero también se observó la reducción del carbono orgánico disuelto y el Carbono Total Disuelto de los sólidos modificados.

En la investigación de Saffari et al. (2023), donde realizaron experimentos a escala de banco para evaluar el efecto del biosólido en la dechloración reductiva de Tricloroetano (TCE), el procedimiento se desarrolló a través de dos controles con medio fresco y otro con biosólidos esterilizado donde el TCE de forma similar, consideran que la única fuente de carbón lo da los

biosólidos, donde mostraron que estos biosólidos podría aumentar la metanogénesis y que estos no afectarían a la decloración reductiva del TCE, pero en condiciones de ambiente se interpreta que puede proporcionar una comunidad microbiana acetogénica al suelo y que puede apoyar a los decloradores mediante la producción de cofactores y coenzimas necesarias.

Una de las investigaciones más relevantes es la de Cooper & DeMarco (2023), en la cual tiene como objetivo determinar los efectos inmediatos de la aplicación del compost de biosólidos en pastizales perennes en un ambiente frío, árido y de gran elevación, con el fin de evaluar las diferentes muestras. En la primera etapa de crecimiento se obtuvo un aumento significativo en la biomasa aérea (AGB) y esto se debe al alto contenido de nitrógeno (N) que posee el compost de biosólidos, ya que una de las limitaciones del crecimiento de los pastizales es la falta de presencia de N y agua. El resultado fue una diferencia de 1999,83 g.m⁻², entre el control y el tratamiento; lo que significó un aumento de 109%, también se observó un aumento de la humedad del suelo y la materia orgánica aumentó un 32%, en cuanto a la presencia del C se observó que solo fue significativo en el suelo degradado.

Dentro de los estudios más recientes se tiene la investigación de Morgan et al. (2024), investiga la aplicación de biosólidos en parcelas de desechos mineros en los años 1973 - 2010 utilizando dosis bajas, medias y altas, la cual fue comparada con un control tratado con fertilizante químico. Se analizaron muestras en los diferentes años para evaluar el pH, humedad, Carbono orgánico, biomasa microbiana y bacterias recicladoras de nitrógeno; en los resultados muestran que el biosólido aumentó la mineralización del nitrógeno y la presencia del carbono. No obstante, también aumentaron los metales totales, aunque la materia orgánica ayudó a reducir la disponibilidad de Cd y Cu.

En el contexto nacional, diversas investigaciones han evaluado el uso de biosólidos para su aprovechamiento. Estos aportes se complementan con estudios desarrollados a nivel regional, particularmente en la región de Arequipa, donde la tesis de Apaza & Quirita (2020), en el cultivo de plantones de Mioporo (*Myoporum laetum*) con biosólidos provenientes de la Planta de tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “La Escalerilla” donde previamente realizaron análisis de las propiedades químicas y microbiológicas de los biosólidos, así como el cumplimiento de acuerdo al Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA (2017), dentro de los resultados se comprobó que los biosólidos no superan los límites establecidos por la ley, llegando a una categorización de tipo A (Apto para el uso en la agricultura).

Finalmente, en la tesis de Chipana (2022), se enfatiza la caracterización y evaluación de los lodos provenientes de la PTAR “La Escalerilla” para determinar su rendimiento mediante diferentes metodologías, dentro de ellas está la determinación de lodos generados como el cálculo del caudal de lodo espesado, concentración de lodos y el cálculo de sólidos volátiles, enfocándose en las estaciones de secado térmico, secador convencional y almacenamiento en la agricultura.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Valorización de residuos sólidos

La valorización de residuos sólidos se entiende como una alternativa de tratamiento, manejo y reaprovechamiento de los residuos mediante procesos que permiten recuperar su valor tanto económico como ambiental, priorizándolos frente a su disposición final. La valorización comprende actividades que incluyen la transformación química, biológica o física que pueden ser de manera total o parcial sobre los residuos (Decreto Legislativo N° 1501, 2020).

Asimismo, el Decreto Legislativo N.º1278, Ley de Gestión de Residuos Sólidos, en el artículo 5 del capítulo 2 define al término de “valorización de residuos sólidos” como un potencial recurso económico, que puede ser aprovechado mediante el compost, fertilizantes y otras alternativas que contribuyan en la recuperación de suelos y la economía circular (Decreto Legislativo N.º1278, 2016). Bajo esta premisa, la valorización de biosólidos representa una alternativa sostenible tanto como para las problemáticas de acumulación y disposición final de dichos residuos, así como su aprovechamiento para la recuperación de suelos degradados contaminados.

2.2.1.1. Compostaje

El compostaje es un proceso donde se realiza la transformación aeróbica de la materia orgánica por parte de los agentes microbianos, esto conlleva a mencionar los factores físicos, químicos y biológicos; ya que influyen sobre el metabolismo de dichos agentes para la obtención de un producto estable y de excelente calidad (Wilson, 2019).

Este proceso atraviesa cuatro fases principales: la primera corresponde a la fase mesófila, que comienza con una temperatura ambiente hasta alcanzar 45°C. Posteriormente, se desarrolla la fase Termófila, donde el material alcanza temperaturas superiores a los 45°C debido a la intensa actividad microbiana. Luego pasa una segunda fase mesófila, donde se agotan las fuentes de Carbono y nitrógeno lo que genera un descenso de temperatura hasta 40°C y finalmente sucede la fase de maduración donde el material alcanza su mayor estabilidad que puede prolongarse durante varios meses a temperatura ambiente (Román et al., 2013).

Si bien el compostaje es una tecnología ampliamente validada, su eficiencia dependerá de varios factores y condiciones operativas del proceso como: la humedad, la aireación, la temperatura y la relación C/N. Por ello que el control de estos parámetros es fundamental para

poder obtener una enmienda orgánica estable y poder ser aplicado en suelos degradados contaminados (Docampo, 2013; Román et al., 2013; Wilson, 2019).

2.2.1.2. Parámetros de Seguimiento del compostaje

El compostaje al ser un proceso biológico se debe tomar en cuenta los parámetros que afectan a los microorganismos, es por ello por lo que se considera los factores como: aireación, humedad del sustrato, temperatura, pH y la relación C/N, donde podemos observar los valores recomendables para cada fase del compostaje en la Tabla 2 (Docampo, 2013; Román et al., 2013).

Tabla 2.

Parámetros de seguimiento para el compostaje

Parámetro	Rango ideal al comienzo (2-5 días)	Rango ideal para compost en fase termofílica II (2-5 semanas)	Rango ideal de compost maduro (3-6 meses)
C/N	25:1 – 35:1	15/20	10:1 – 15:1
Humedad	50% - 60%	45%-55%	30% - 40%
Concentración de Oxígeno	~10%	~10%	~10%
Tamaño de partícula	<25 cm	~15 cm	<1,6 cm
pH	6,5 – 8,0	6,5 – 8,0	6,5 – 8,0
Temperatura	45 – 60°C	45°C-Temperatura ambiente	
Densidad	250-400 kg/m ³	< 700 kg/m ³	< 700 kg/m ³
Materia Orgánica	50%-70%	>20%	>20%
Nitrógeno Total	2,5-3%	1-2%	~1%

Nota. La tabla presentada en el Manual del Agricultor (Román et al., 2013).

2.2.1.3. Parámetro de pH en el compost

En el proceso de compostaje, el pH tiene una influencia directa debido a su acción sobre los procesos microbianos y la disponibilidad de nutrientes (Moreno & Moral, 2008); es por ello que los niveles de acidez o alcalinidad que se dan en el proceso son importantes ya que depende de los materiales de origen y varía en cada fase del proceso, puesto que define la supervivencia de los microorganismos y cada grupo tiene pH óptimos para el crecimiento y multiplicación (Docampo, 2013; Román et al., 2013).

2.2.1.4. La relación C/N en el compost

Para la descomposición microbiana es importante el carbono y nitrógeno, ya que determina la velocidad de las reacciones de oxidación y las características fisicoquímicas (Moreno & Moral, 2008; Wilson, 2019). La relación C/N varía en función del material de partida y se obtiene al dividir el %C total sobre el contenido del %N total de los materiales a compostar (Román et al., 2013).

El valor ideal de relación C/N para un compost totalmente maduro es cercano a 10, pero en la práctica, se suele considerar que un compost suficientemente estable con el valor <20; este parámetro no es importante para determinar el proceso de fermentación sin embargo es relevante para asegurar la calidad del abono para la fertilización (Moreno & Moral, 2008; Röben, 2002).

2.2.2. Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Los lodos son residuos extremadamente líquidos o semisólidos, provenientes de la eliminación de los sistemas de alcantarillado o plantas de tratamiento, donde su composición es variable y la cual depende de la carga de contaminación del agua residual inicial, pero esencialmente se basan en materia orgánica, microorganismos, compuestos no biodegradables (metales pesados) y sales inocuas que han sido removidas en el proceso de tratamiento,

también se debe considerar que no han sido sometidos a un proceso de estabilización (Camacho et al., 2009; Ortiz et al., 1995; Perez, 2016).

Según Collivignarelli et al. (2019) es importante mencionar que existen varios tipos de lodos como:

- **Lodos primarios o crudos:** son sólidos fácilmente sedimentables originados en los decantadores primarios, se caracterizan por su alta putrescibilidad con un contenido de 2 a 7% en peso de sólidos totales (ST).
- **Lodos secundarios:** mezcla heterogénea compleja de microorganismos, constituyentes bacterianos, orgánicos no digeridos, materiales inorgánicos y agua. Originados durante el tratamiento biológico y los ST oscilan entre 0.5 y 1.5% en peso el cual dependerá de los tipos de tratamiento de agua residuales.
- **Lodos mixtos:** proviene de la mezcla de los lodos primarios, secundarios y terciarios, donde sus propiedades dependen netamente de las características del lodo mezclado.

2.2.3. Biosólidos

El Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA (2017) menciona que el biosólido es un “Subproducto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, con características físicas, químicas y microbiológicas que permiten su aprovechamiento como acondicionador del suelo”. No son biosólidos las cenizas producto de la incineración de lodos.

2.2.3.1. Tratamiento de Biosólidos

La estabilización de lodos pretende descomponer químicamente los sólidos orgánicos para mejorar su estabilidad, facilitar la deshidratación y reducir la cantidad de lodo. Para lograr estos propósitos, se considera tanto la digestión anaeróbica como la aeróbica (César Valdez & Vazquez, 2003; Le & Price, 2024). Además, se emplean diversas técnicas esenciales ya que se

desarrolla para el almacenamiento, transporte y aplicación de estos lodos, entre las que se incluyen la deshidratación, el secado, la digestión anaeróbica y el compostaje (Yoshida et al., 2015).

2.2.3.2. Clasificación de Biosólidos

La clasificación de los biosólidos es de la siguiente manera:

- Biosólidos de Clase A: Se pueden aplicar directamente al suelo sin restricciones.
- Biosólidos de Clase B: Son aplicables al suelo con restricciones sanitarias según la localización de los suelos y el tipo de cultivo presente.

Debemos mencionar que es importante que para ambos tipos deben cumplir con parámetro de estabilización, toxicidad química (Tabla 3) e higienización (Tabla 4), de acuerdo con las leyes que se presentan en el Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA, (2017).

Tabla 3.

Parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y B

Mg/kg ST Materia Seca	arsénico	cadmio	cromo	cobre	plomo	mercurio	níquel	zinc
Clase A y Clase B	40	40	1200	1500	400	17	400	2400

Nota. Esta tabla presenta los parámetros de toxicidad química en biosólidos del Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA.

Tabla 4.

Parámetros de higienización de biosólidos.

Indicador	Clase A	Clase B
Indicadores de contaminación fecal	<i>Escherichia coli</i> < 1000 NMP/1g ST o <i>Salmonella sp.</i> < 1 NMP/10 g ST	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo 1, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización, en la Sección B del
Indicadores de Huevos de Helmintos	Huevos viables de Helmintos < 1/4g ST o Prueba de utilización de tecnologías indicadas para la	

Nota. Esta tabla presenta los parámetros de higienización química en biosólidos del Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA.

2.2.4. Planta de tratamiento de aguas residuales La Escalerilla

2.2.4.1. Ubicación

La Planta de tratamiento de aguas residuales “La Escalerilla” se encuentra localizada en Pampa Escalerilla, donde abarca los distritos de Cerro Colorado y Yura, con coordenadas 219.179 E y 8 188.466; con dirección Carretera Arequipa la Joya Kilómetro 4.6, Cerro Colorado, provincia y departamento de Arequipa (Chipana, 2022). Dicha Planta de Tratamiento fue construida en el año 2014 y se puso en funcionamiento en el año 2015, cumpliendo 10 años de funcionamiento (SUNASS, 2021).

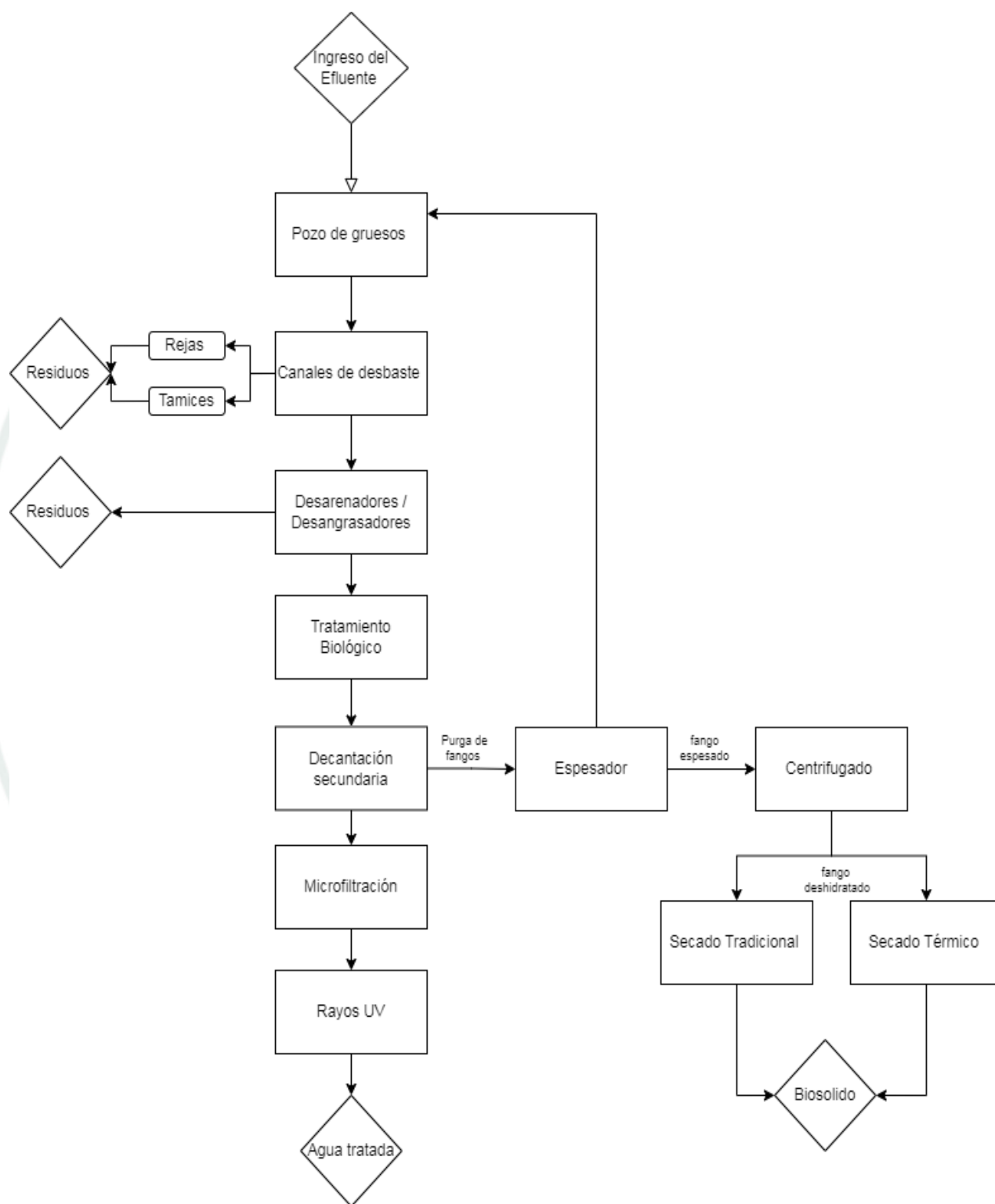
2.2.4.2. Tren de tratamiento

El proceso de la PTAR “La Escalerilla” consta de dos líneas de tratamiento: La línea de agua y la línea de lodos (Figura 1), la cual se detalla a continuación (Apaza & Quirita, 2020; Candela, 2020).

- **Tratamiento preliminar:** Pozos de gruesos, canales de desbaste (Rejas y tamices), desarenadores/ desengrasadores.
- **Tratamiento Secundario:** Reactor biológico de aireación extendidas y decantador.
- **Tratamiento Terciario:** Microfiltración y Rayos UV.
- **Tratamiento de lodos:** Espesador; donde se realiza la concentración de los lodos para luego ser decantados, Centrífuga; se desarrolla la separación de la fase líquida; el lecho de secado tradicional las cuales depende de las condiciones climáticas y finalmente el Secador Térmico, donde se somete a altas temperaturas para una deshidratación mecánica.

Figura 1.

Flujograma de la PTAR "La Escalerilla"



Nota. Líneas de tratamiento de la PTAR "La Escalerilla".

2.2.4.3. Capacidad

La PTAR “La Escalerilla” ha sido diseñada para tratar un caudal en promedio de 0,233 m³/s, y un caudal máximo de 0,327 m³/s, tomando en cuenta que recolecta las aguas residuales del Cono Norte de Arequipa Metropolitana (SEDAPAR, 2018).

Actualmente, la planta cuenta con dos sistemas de secado de lodos, el primero es el secador convencional y el segundo es el secado solar, esta última se usa con la intención de reducir el tiempo en el secado de lodos (Candela, 2020).

2.2.5. Suelos degradados

2.2.5.1. Propiedades fisicoquímicas del suelo

El estudio de las propiedades fisicoquímicas del suelo permitirá evaluar la fertilidad de los diferentes tipos de suelo, para identificar los suelos aptos para la agricultura y sobre todo en la conservación y mejora de la productividad del suelo (Ruiz, 2016). Entre los principales parámetros se encuentra el pH, que influye en la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y los procesos biológicos que se encuentran presentes en el suelo.

También se debe tener en cuenta que el rango del pH del suelo óptimo varía entre 3.5 a 9 y la razón por la cual no alcanza los valores de 0 ó 14, se debe a que la solución suelo no es una solución verdadera, sino que constituye una solución coloidal, siendo los rangos de pH de 5 a 7.5 que favorecen a los cultivos, aunque existen especies que se desarrollan mejor en determinados rangos (Noriega, 2011). En cuanto a la conductividad eléctrica (CE) nos permite determinar la cantidad de sales solubles presentes en el suelo, un parámetro que se expresa en mmhos/cm o dSm⁻¹ y su presencia influye directamente el crecimiento y desarrollo de las plantas (Gamarra L. et al., 2018).

La presencia de metales pesados en suelos contaminados representa un problema ambiental debido a su persistencia, movilidad y potencial toxicidad. En nuestro caso de estudio nos enfocamos en el cromo que puede modificar las propiedades del suelo y afectar en las plantas vegetales, especialmente en su forma hexavalente Cr (VI), catalogada como altamente tóxica debido a su fácil desplazamiento en el ambiente (Roque R. et al., 2016).

2.2.6. Enmienda Orgánicas

Las enmiendas orgánicas son una alternativa sostenible para la recuperación de suelos degradados, debido a que proporcionan materia orgánica y nutrientes que aportan a la propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Es por ello, su aplicación contribuye en el incremento de la capacidad de retención del agua, mejora en la estructura del suelo y estimula las comunidades microbianas (Epelde et al., 2018). También es importante señalar que, en comparación con los fertilizantes convencionales, las enmiendas orgánicas pueden incrementar la concentración de minerales poco cristalinos en la rizosfera ayudando a mejorar las condiciones del suelo (Wen et al., 2019). Y uno de los indicadores de la calidad del sustrato orgánico del suelo es la relación C/N, debido a que nos permite estimar la tasa de disponibilidad de nitrógeno para las plantas (Gamarra L. et al., 2018).

2.2.7. Parque Industrial de Río Seco (PIRS)

El PIRS es uno de los espacios donde se generan residuos líquidos como sólidos en el cual se origina un gran impacto al agua, suelo y aire, principalmente se ha observado contaminantes como metales ecotóxicos los cuales son Cr, As, Cd y Pb (Dueñas et al., 2014).

Dichos efluentes, al presentar altos niveles de contaminantes que sobrepasan los LMP, generan un déficit debido al tratamiento previo y la descarga hacia los alcantarillados o cuerpos de agua, generando un colapso de las lagunas de oxidación y pozos, ya que estos no son adecuados para los tratamientos de dichos efluentes industriales (Pineda, 2019).

Por otro lado, los efluentes al ser almacenados en las lagunas de oxidación, se produce la eutrofización de los suelos y lixiviación de los contaminantes con destino incierto hacia los diferentes cuerpos ambientales, por lo que representa un problema ambiental ya que son altamente tóxicos y carcinogénicos (Roque R. et al., 2016).

2.2.7.1. Efectos ecotóxicos del cromo

El cromo (Cr) es un elemento que se presenta en dos estados de oxidación: cromo trivalente (Cr III) y cromo hexavalente (Cr VI). El Cr (III) es considerado un oligoelemento esencial en bajas concentraciones, muy al contrario, el Cr (VI) presenta alta toxicidad debido a su elevada capacidad oxidante y movilidad en el medio ambiente (Tellez et al., 2004).

La International Agency for Research on Cancer, clasificó al Cr (VI) como un compuesto carcinogénico. Asimismo, diversos estudios han señalado que la exposición prolongada puede ocasionar efectos crónicos y agudos en las personas (Á. Chávez, 2008; Cuberos et al., 2009). De la misma forma, puede afectar a los ecosistemas acuáticos y terrestres, alterando de forma negativa en la actividad microbiana del suelo, el desarrollo de organismos vivos y en el crecimiento vegetal.

En el ecosistema, el Cr (VI) presenta alta solubilidad y movilidad en medios acuosos, sin embargo, puede transformarse en Cr (III) mediante procesos de reducción química asociándose con sustancias orgánicas; compuestos reductores naturales y actividad microbiana, lo que disminuye su toxicidad y movilidad al favorecer su precipitación y adsorción en partículas del suelo (Kotaś & Stasicka, 2000).

Asimismo, el comportamiento del cromo en el suelo está influenciado por condiciones fisicoquímicas como el potencial redox. En ambientes reductores favorece la reducción de Cr (VI) a Cr (III), mientras que, en condiciones oxidantes y en presencia de Fe y Mn, puede

producirse la reoxidación del Cr (III), incrementando su movilidad y toxicidad (Á. Chávez, 2008).

2.2.8. Técnicas Instrumentales

2.2.8.1. Análisis Elemental

Es una técnica empleada para determinar la composición elemental de diferentes compuestos. A través de este método se puede obtener el porcentaje de cada elemento químico presente. Dicha técnica se basa en la combustión controlada y la dinámica de las muestras dentro de un reactor, lo que lleva a la medición de óxidos generados (Frąckowiak et al., 2022).

El procedimiento inicia con el quemado de las muestras en una columna que contiene un lecho catalítico oxidante-reductor a temperatura controlada, donde se liberan gases que son conducidos hacia el analizador acoplado a un cromatógrafo de gases, dichos gases se separan mediante columnas cromatográficas y son detectados por un detector de conductividad térmica (Frąckowiak et al., 2022).

2.2.8.2. Absorción Atómica

Es una técnica analítica principalmente para detectar metales en muestras de aguas, suelos y aire. Dicha técnica se basa en que la muestra es aspirada y atomizada a través de una llama, y sobre un detector se mide la cantidad de luz absorbida, los cuales dependen de los átomos libres no excitados (Cuéllar et al., 2018; Gomez, 2011).

2.3. Marco legal

2.3.1. Internacional

- En el ámbito internacional se tiene la Alianza Mundial por el Suelo, la cual se enfoca en las decisiones sobre el suelo en temas de seguridad alimentaria, adaptación al cambio climático y mitigación de efectos (IAEA, 2019), la cual respalda el enfoque de promover prácticas sostenibles abordando desafíos ambientales.

- Asimismo, “La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación” que tiene como fin la protección y restauración de la tierra garantizando un uso sostenible (United Nations, 2021), esta influye en la regulación y gestión de los biosólidos, en especial hacia áreas propensas a la degradación del suelo y la desertificación.
- El código federal de regulación en Estados Unidos Part 503 - Standards For The Use Or Disposal Of Sewage Sludge, (1993), es una Norma enfocada en el uso o eliminación de lodos, donde detalla los requisitos para el muestreo y el análisis de biosólidos, esto nos permitirá garantizar la aplicación segura a los suelos, ya que nos proporciona parámetros necesarios para la calidad y la idoneidad de su uso.
- La Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente”, se considera especialmente el Artículo 8, que aborda sobre el uso de los lodos considerando las necesidades de la nutrición de las plantas, y esto nos ayudará para el conocimiento de valores determinados para la aplicación de plantas ornamentales.
- La ISO 19698, (2020), enfocada en la aplicación de Biosólidos en el suelo, tiene como objetivo la orientación sobre las condiciones de uso de biosólidos a partir de lodos industriales y municipales. El documento incluye directrices para aplicación en el suelo, producción de cultivos y usos beneficiosos.

2.3.2. Nacional

- En el contexto nacional según la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los servicios de Saneamiento, aprobado por el Decreto Legislativo N° 1280 (2016), faculta a los prestadores de servicios a comercializar los lodos provenientes de la PTAR, el cual lo categoriza como un residuo apto para su tratamiento y valorización con fines de reúso, ello nos permitirá aplicar este recurso como un aditivo en el suelo, con el fin de preservar y recuperar suelos degradados en nuestro país, al mismo tiempo velar por la salud de la ciudadanía.

- El Decreto Supremo N°014-2017-MINAM (2017), establece el Reglamento del Decreto Legislativo N°1278, el cual aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, quien nos guía con la adecuada gestión de los residuos y con un enfoque de reaprovechamiento de los Biosólidos.
- El Decreto Supremo N° 015-2017- VIVIENDA, (2017), proporciona pautas claras para la clasificación de biosólidos, con los diferentes parámetros requeridos, es por ello que nos ayudará en garantizar la aplicación segura para el aprovechamiento de los biosólidos, minimizando los impactos negativos posibles; en razón al Subcapítulo IV “Parámetros de control e impacto en la aplicación de biosólidos al suelo”.
- Por otro lado, la norma Técnica Peruana- NTP 201.208:2021, se enfoca en la calidad del compost, quien nos ayudará con los estándares requeridos en la calidad del compost (INACAL, 2022), lo que servirá como referencia para evaluar los estándares requeridos en esta investigación.

2.3.3.Regional / Local

- A nivel regional se tiene la Ordenanza Municipal-N°-381-2015-MDCC (2015): Ordenanza que aprueba el Reglamento de Organizaciones y Funciones (ROF) de la Municipalidad de Cerro Colorado, donde se centra en las funciones de las áreas administrativas, es por ello que nos enfocaremos en la subgerencia de residuos sólidos; la cual es relevante ya que nos proporciona información sobre la coordinación y ejecución de acciones para prevenir impactos negativos en el medio ambiente como se viene ocurriendo en el Parque Industrial Río Seco.



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Nivel de Investigación

La presente investigación está enfocada en un diseño experimental de nivel aplicativo, ya que tuvo como finalidad aplicar conocimientos teóricos y prácticos en la elaboración de enmiendas orgánicas a base de biosólidos para la recuperación de suelos degradados.

Tabla 5.

Tipo y nivel de Investigación.

Categoría	Tipo	Descripción
Nivel	Aplicativo	Se enfocará en mejorar la calidad de suelos degradados, contribuyendo en la influencia de los biosólidos para la rehabilitación de dichos suelos, además se aplicará de forma práctica en el laboratorio.
Alcance	Descriptivo	Se pretende analizar los parámetros e información acerca de la calidad de los biosólidos como también de los suelos degradados, para caracterizarlos y evaluar los resultados obtenidos.
Diseño	Experimental	Se desarrollará un tratamiento de compostaje a los biosólidos, así como al suelo degradado. Adicionando un diseño experimental en la germinación de semillas.
Enfoque	Cuantitativo	Nos basaremos en la obtención de datos y gráficos, estos se procesarán y finalmente serán estudiados.

Nota. La investigación es de tipo y nivel descriptiva - aplicado.

3.2. Localización geográfica y características del área de estudio

3.2.1. Ubicación

El estudio consideró dos zonas de muestreo ubicadas en el distrito de Cerro Colorado, región y provincia de Arequipa: el Parque Industrial de Río Seco (PIRS), de donde se recolectaron las muestras de suelo, y la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) "La Escalerilla", de donde se obtuvieron las muestras de biosólidos. Las coordenadas geográficas de cada punto de muestreo se detallan en la **Tabla 6**.

La parte experimental, en cambio, se desarrolló a escala piloto en los laboratorios de la Universidad Católica de Santa María (UCSM).

Tabla 6.

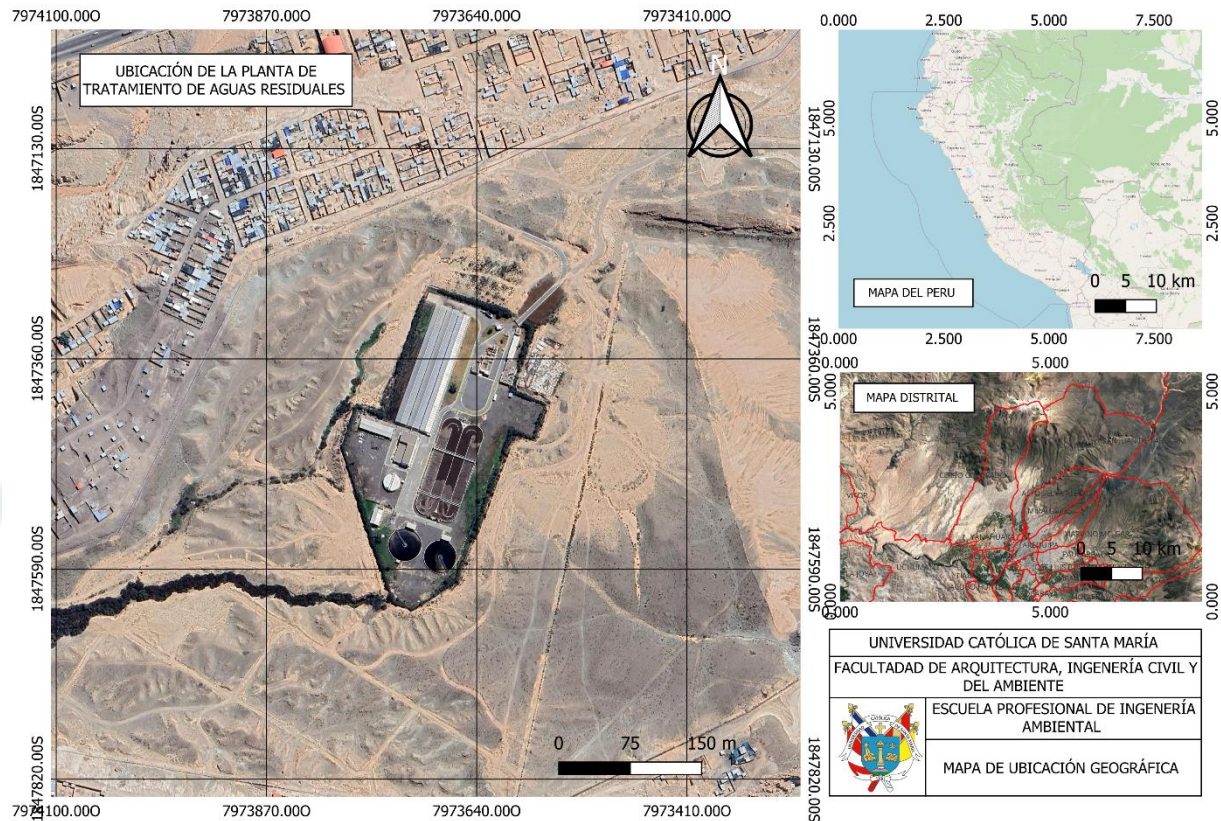
Ubicación de los puntos de muestreo de suelo.

N°	Punto de muestreo	Coordenadas UTM Este	Coordenadas UTM Norte
1	P1	221635.00	8189126.00
2	P2	221638.00	8189136.00
3	P3	221626.00	8189118.00
4	P4	221619.00	8189091.00

Nota. WGS84, Zona 19S

Figura 2.

Mapa de la PTAR “La Escalerilla” – Arequipa



Nota. Elaboración propia mediante sistema de información geográfica (SIG).

3.3. Métodos de investigación

3.3.1. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de biosólidos

3.3.1.1. Toma de muestras

El proceso metodológico inició con la obtención de muestras de biosólidos provenientes de la última etapa de la PTAR “La Escalerilla”, en la etapa de secado del sistema de tratamiento (Estabilización) siguiendo las pautas del protocolo para el muestreo de lodos descrito por (N.J.S.A, 2011; Office Of Water, 1999). Para la toma de muestra se aplicó la Técnica del cuarteo, que consiste en dividir el material recolectado en cuatro partes iguales para obtener una fracción representativa de aproximadamente de 1 kg **Figura 3.**

Posteriormente, la muestra se envasó en una bolsa Ziploc, rotulada adecuadamente con el código de identificación y fecha de muestreo, y fue remitida al laboratorio BHIOS LABORATORIOS, acreditado conforme a la norma NTP-ISO/IEC 17025:2017, aprobada por INACAL, según se detalla en el Anexo 1.

Figura 3.

Proceso de la técnica de cuarteo para la muestra de biosólidos



Nota. Muestreo de biosólidos en campo para análisis fisicoquímico.

3.3.1.2. Parámetros de caracterización

Para la caracterización se consideraron los parámetros según Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA (2017), como se observa en la Tabla 6.

Tabla 7.

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos.

<i>Parámetros físicos</i>	<i>Parámetros biológicos</i>
pH Humedad	Coliformes Totales
N Amoniacal	Coliformes Fecales
N Kjeldahl	<i>Escherichia coli</i>

Metales Pesados	Huevo de helminto
Nitritos	<i>Salmonella sp.</i>
Nitratos	
Sulfatos	
Fósforo	
Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	
Relación Carbono Nitrógeno (C/N)	

Nota, Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA (2017).

3.3.2. Valorización de biosólidos mediante compostaje

3.3.2.1. Construcción de pilas de compostaje

El proceso de construcción de las composteras, se realizaron usando cajas de maderas recicladas, las que fueron adaptadas con dimensiones de 78 cm x 45 cm x 17 cm. Cada compostera se conformó mediante la unión de dos cajas, forradas en su interior con geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE), a fin de garantizar la durabilidad de cada compostera y evitar fugas de lixiviados (Figura 4).

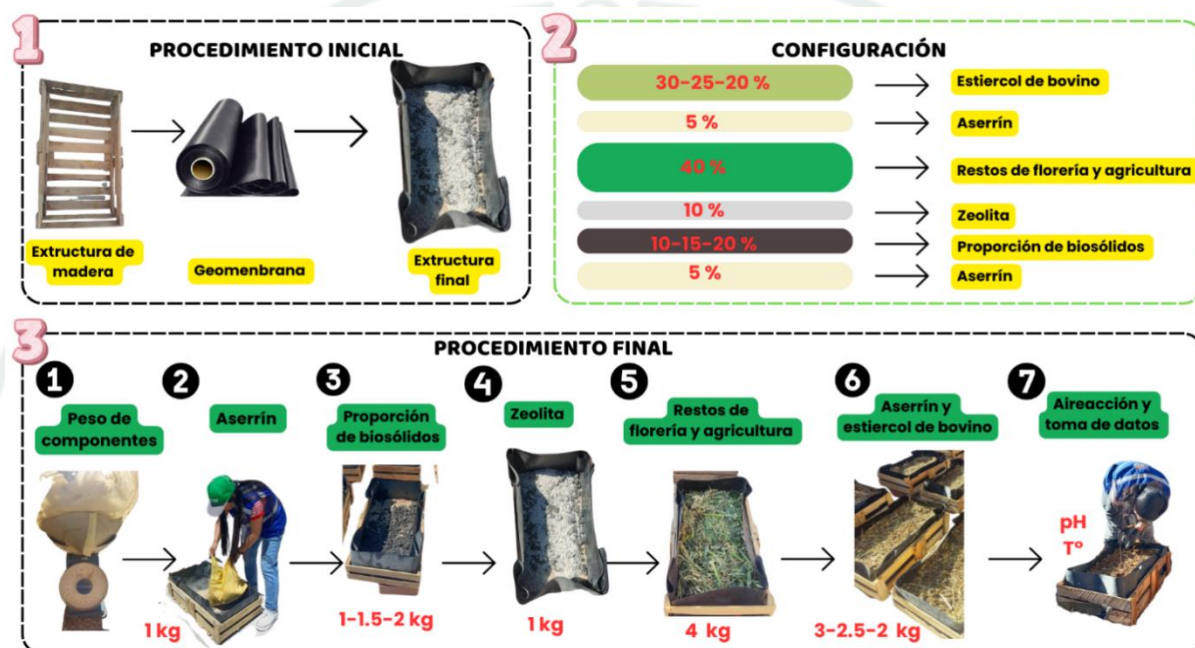
Para la configuración de los sustratos se consideró la metodología propuesta por (Cuti C. & Vargas G., 2023), quienes sugieren la disposición de los sustratos por capas. En este estudio, la distribución se organizó de manera ascendente como se aprecia en la Figura 4 en la base se colocó una capa de aserrín, seguida por biosólido, zeolita, residuos de poda, otra capa de aserrín y, finalmente, estiércol de bovino.

En cuanto a las proporciones se determinaron utilizando la calculadora de compostaje recomendado por la FAO (Román et al., 2013), siguiendo los parámetros establecidos en la Norma Técnica Peruana NTP 201.208: 2021, asimismo, de acuerdo con lo señalado por

(Mendoza, 2012), el proceso de compostaje se llevó a cabo en un área ventilada, con el fin de evitar condiciones anaeróbicas que pudieran afectar la eficiencia del compostaje.

Figura 4.

Procedimiento de armado del compost de biosólido.



Nota. Línea de procesamiento de compostaje para el biosólido y su configuración de los componentes.

3.3.2.1.1. Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño experimental unifactorial, considerando como factor experimental la proporción de biosólido incorporado en la mezcla de compostaje. Los niveles evaluados corresponden a proporciones de 10%, 15% y 20% de biosólido, establecidos con función del peso total de residuos de poda y estiércol, de acuerdo con la metodología propuesta en la investigación de (Liu et al., 2022).

La selección de los porcentajes se fundamentó en investigaciones previas, donde la aplicación de diferentes dosis de biosólido permitió mejorar la relación C/N, favoreciendo la actividad microbiana y promoviendo el crecimiento vegetal (Asemaninejad et al., 2021). En este sentido, las proporciones de 10%, 15%, 20% fueron establecidas con la finalidad de evaluar

progresivamente la influencia del biosólido compostado sobre las propiedades de la enmienda orgánica y su potencial aplicación en la recuperación de suelos degradados.

Cada tratamiento experimental contó con tres repeticiones por cada nivel de biosólido y obteniendo un total de nueve composteras. Asimismo, cada compostera constituyó una unidad experimental independiente, con la finalidad de garantizar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos, como se aprecia en la Tabla 7.

Tabla 8.

Factores del diseño experimental.

Nº de réplica	%BS	Réplica	Und	Tipo	Subtipo
1	10%	3	Kg	Categórico	Nominal
2	10%		Kg	Categórico	Nominal
3	10%		Kg	Categórico	Nominal
4	15%	3	Kg	Categórico	Nominal
5	15%		Kg	Categórico	Nominal
6	15%		Kg	Categórico	Nominal
7	20%	3	Kg	Categórico	Nominal
8	20%		Kg	Categórico	Nominal
9	20%		Kg	Categórico	Nominal

Nota. Se presentan los factores del diseño experimental en el proceso de compostaje.

3.3.2.2. Control y monitoreo del compostaje

Para evaluar la calidad de la enmienda se realizó un monitoreo continuo de los parámetros de temperatura, humedad, pH y aspecto físico todo por un periodo de tres meses (90 días), de acuerdo con las recomendaciones propuestas por (Farias et al., 1999).

La temperatura del compost se monitorea semanalmente utilizando un termómetro de suelo insertado en la parte central de cada compostera, con el fin de evaluar la actividad biológica y reconocer las fases mesofílica, termofílica y de maduración del proceso. La temperatura es uno de los principales indicadores del proceso de compostaje y de la intensidad de la actividad microbiana (Ryckeboer et al., 2003).

El pH se controló durante todo el proceso mediante mediciones periódicas con cintas indicadoras, lo que permitió seguir su evolución desde valores iniciales más ácidos hacia rangos cercanos a la neutralidad, considerados adecuados para un compost maduro (El-mrini et al., 2022). De forma complementaria, la humedad del material evaluó de manera rutinaria mediante el “método del puño”, ajustando el contenido de agua para mantenerlo dentro de un intervalo favorable para la actividad microbiana.

El proceso de compostaje se desarrolló bajo condiciones controladas de humedad y aireación. Se realizaron volteos manuales cada siete (07) días para que tenga una oxigenación adecuada y homogenización. La frecuencia de volteo es un factor operativo clave, ya que influye en la temperatura, el consumo de oxígeno y la calidad final del compost. Adicionalmente, las características físicas del compost se evaluaron mediante observaciones sensoriales (color, olor, textura y apariencia) a lo largo del proceso,

Los datos obtenidos durante el monitoreo fueron digitalizados y registrado en una planilla de control basada en la metodología de Román et al. (2013), para su control como se observa en la Figura 5.

Figura 5.

Planilla de control de proceso.

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12
Temperatura												
Ref temperatura	15°-40°		40°-65°			15°-40°					~T°ambiente	
pH												
Ref pH	4-6		8-9			7-8					6-8	
Humedad												
Ref humedad	variable, dependiendo de la humedad de entrada, entre 30% - 60%.											
Aspecto												
Ref aspecto visual												

Nota: Adaptado de Planilla de control por Román et al., (2013), FAO.

Figura 6.

Proceso de toma de muestra de los parámetros.



Nota. Se tomaron los parámetros por tres meses durante el proceso de compostaje.

El material compostado obtenido fue tamizado utilizando un tamiz N°4 (4.75 mm) para eliminar partículas de mayor tamaño. Seguidamente fue colocada en una bolsa ziploc para el

análisis en el laboratorio, tomando valores como pH, humedad, conductividad eléctrica, en una sucesión acuosa de 1:2.5 suelo: agua utilizando un Multiparámetro (Soria et al., 2021), cuyos valores fueron comparados con los rangos establecidos en la norma técnica peruana NTP 201.207.

3.3.2.3. Procedimiento para la determinación de la relación C/N mediante análisis elemental

El análisis elemental se realizó utilizando el analizador elemental FLASH SAMRT F406; en primer lugar, la muestra fue secada triturada y tamizada, con el propósito de eliminar la humedad y asegurar su representatividad. Posteriormente se colocó en cápsulas pequeñas de laboratorio debidamente selladas.

Las cápsulas fueron introducidas en el equipo PLSH SMART F406, en la cual se llevó a cabo la combustión a alta temperatura en presencia de oxígeno, permitiendo la oxidación completa de los elementos presentes de la muestra; dichos gases obtenidos fueron detectados y cuantificados mediante el detector de conductividad térmica.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron procesados por software del equipo y expresándose en porcentaje de masa de cada elemento analizado.

Los resultados obtenidos del análisis elemental nos proporcionaron los porcentajes de Carbono y Nitrógeno total, con estos datos se calculó la relación C/N mediante la ecuación:

$$\text{Relación C/N} = \frac{\%C}{\%N} \dots \dots \text{(Ecuación 2)}$$

Este parámetro permite evaluar la estabilidad y madurez de la enmienda orgánica obtenida. Los valores entre 10 y 20 indican un producto apto para su aplicación en el suelo. Es por ello, que nos permitió identificar el tratamiento de compostaje más adecuado.

3.3.2.4. Análisis Estadístico en la relación C/N

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab, mediante el cual se sistematizó la información correspondiente a la relación C/N en función de los tratamientos del compostaje. Los datos fueron previamente depurados y validados.

Antes de la aplicación de las pruebas estadísticas, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, seguidamente los datos fueron sometidos al análisis de varianza (ANOVA), considerando un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y un intervalo de confianza del 95% y las pruebas de comparación múltiple de Tukey, Fisher (Terrádez, 2003), con la finalidad de identificar si existe las diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos evaluados.

3.3.3. Evaluación del biosólido compostado en suelos degradado del PIRS

3.3.3.1. Obtención de muestras de suelo degradado del PIRS

Inicialmente se procedió a la toma de muestra de suelo, para la caracterización inicial, en el área periférica de las lagunas de oxidación del PIRS, está se realizó de acuerdo con la Técnica del Cuarteo, obteniendo así una muestra homogénea del suelo degradado como se observa en la Figura 7.

Figura 7.

Puntos de toma de muestra del suelo del PIRS.



Nota. Puntos de la muestra obtenida con sus respectivas coordenadas.

Posteriormente, fue remitida al laboratorio BHIOS LABORATORIOS y Laboratorio de Investigación y Servicio LABNVSERV de la Universidad Nacional de San Agustín. Para analizar la concentración inicial de cromo presente en el suelo degradado, luego se realizó una mezcla en proporciones de volumen / volumen de la enmienda orgánica de biosólidos con el suelo degradado obtenido del PIRS.

3.3.3.2. Preparación de mezclas suelo / enmiendas

Se preparó una mezcla del suelo degradado del PIRS con la enmienda orgánica, la cual tenía en su composición la proporción de biosólido determinada según el objetivo anterior con la mejor relación C/N. Dicha mezcla tuvo un periodo de contacto de dos meses, el cual se homogeneizó adecuadamente. Concluido este periodo, la mezcla fue rotulada adecuadamente y trasladada al laboratorio de Investigación y Servicio LABNVSERV de la Universidad Nacional de San Agustín para la ejecución del análisis de absorción atómica de cromo.

Al obtener los datos, se determinó el porcentaje de remoción del cromo para evaluar la eficiencia del tratamiento aplicado. Este cálculo se determinó a partir de las concentración inicial y final, utilizando la siguiente ecuación (Baird et al., 2015):

$$\%Remoción = \frac{Ci-Cf}{Ci} \times 100\% \dots (Ecuación 2)$$

Donde:

Ci: Concentración inicial

Cf: concentración final

Este indicador fue empleado para cuantificar la remoción de cromo en las diferentes réplicas.

3.3.3.3. Evaluación de toxicidad mediante test de germinación de semillas de *Helianthus annuus*

Se desarrollaron ensayos de germinación con la especie ornamental *Helianthus annuus*, donde se realizó una combinación de suelo degradado provenientes del PIRS con el biosólido compostado (enmienda orgánica). Las proporciones de mezcla fueron establecidas en relación volumen /volumen (v/v) de 85/15, 70/30 y 55/45 respectivamente; aplicando además el suelo degradado sin enmienda como tratamiento de control.

Cada tratamiento fue evaluado por triplicado en unidades experimentales independientes, obteniéndose un total de 27 unidades de siembra distribuidas en bandejas de germinación rotuladas. En cada unidad experimental se sembraron 10 semillas *Helianthus annuus*, como se muestra Figura 8 y Tabla 9.

Figura 8.

Procedimiento para la germinación de plántulas.



Nota. Metodología aplicada en la preparación del sustrato y establecimiento del ensayo de germinación.

Tabla 9.

Cuadro de tratamientos de suelo para la germinación.

Tratamientos										Réplica
% de suelo degradado	85%			70%				55%		Control
Tipo de biosólido	10%	15%	20%	10%	15%	20%	10%	15%	20%	control
	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
										3

Nota. G: *Helianthus annuus*.

Posteriormente, se realizó el riego constante con la finalidad de mantener la humedad superficial del sustrato y favorecer el proceso germinativo. El ensayo se desarrolló bajo

condiciones controladas de laboratorio, a temperatura ambiente y en ausencia de calefacción artificial. La evaluación de la germinación se efectuó entre los 15 y 30 días posteriores a la siembra, periodo considerado adecuado para alcanzar al menos 50% de germinación de las plántulas.

3.3.3.3.1. Análisis de la dinámica de germinación (Curvas de Germinación)

A partir de los datos obtenidos, se determinó el porcentaje de germinación acumulada en función al tiempo (30 días), lo que permitió elaborar las curvas de germinación por cada tratamiento, Estas curvas se emplearon para el análisis de la dinámica del proceso germinativo, así como también para evaluar la respuesta de las plántulas frente a las distintas concentraciones de suelo degradado. De este modo, se estableció un criterio biológico para evaluar el efecto de la enmienda orgánica sobre el suelo tratado (Keeling et al., 1994; Pallo & Guangatal, 2022).

3.3.3.3.2. Análisis de supervivencia de plántulas

Posteriormente, se determinó la tasa de supervivencia mediante el cálculo de la proporción de individuos vivos en un momento dado donde (Keeling et al., 1994):

$$\text{Tasa de supervivencia} = \frac{\text{Número de plántulas vivas}}{\text{Número de plántulas plantadas}} \times 100 \dots (\text{Ecuación 3})$$

Para facilitar el análisis e interpretación de los resultados, se calculó el promedio de los datos del tratamiento, los cuales fueron representados mediante un gráfico de barras.

3.3.3.4. Análisis Estadístico en germinación

El análisis estadístico se realizó utilizando el software Minitab, en el cual se sistematizó la información correspondiente a los ensayos de germinación de *Helianthus annuus*. Previamente dichos datos fueron depurados y validados, con la finalidad de verificar la consistencia y confiabilidad de los registros experimentales.

Una vez que se cumplió con los criterios, los datos fueron sometidos a los supuestos de normalidad y de homogeneidad, asegurando el cumplimiento de las condiciones requeridas. Posteriormente, se realizó el análisis de varianza (ANOVA), considerando un nivel de significancia $\alpha=0.05$ y un intervalo de confianza de 95%, con el objetivo de determinar la existencia de diferencia estadísticas significativas entre los tratamientos. Asimismo, cuando se identificaron diferencias significativas, se aplicaron las pruebas de comparación múltiple de Tukey y Fisher, con la finalidad de comprar medias y establecer diferencia entre los tratamientos.





CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Caracterización Físicoquímica y Microbiológicos de los Biosólidos

Los resultados obtenidos en la caracterización físicoquímica y microbiológica (Tabla 9) de los biosólidos provenientes de la PTAR “La Escalerilla” evidenciaron que los parámetros evaluados cumplen los límites establecidos para clasificar como biosólido de clase A, según el Decreto Supremo de N° 015-2017-Vivienda. Esto indica que el material presenta condiciones adecuadas de higienización y estabilidad para su aprovechamiento como enmienda orgánica. Asimismo, la ausencia de *Salmonella sp.*, la baja concentración de *Escherichia coli* y la reducida presencia de huevos de helmintos, cuyos resultados se presentan en el Anexo 3 del laboratorio acreditado, disminuyendo potenciales riesgos para la salud ambiental.

Tabla 10.

Resultados físicoquímicos y microbiológicos del biosólido

<i>Parámetros físicoquímicos y microbiológicos</i>			
<i>Parámetros físicoquímicos</i>			
<i>N</i>	<i>Parámetros</i>	<i>Resultados</i>	<i>D.S. N°15-2017-Vivienda</i>
01	Ph	6.19	5
02	Humedad	5.21	-
03	N Kjeldahl	6.86	-
04	Metales Pesados		
	Ag (plata)	0.78616	-
	Al (aluminio)	2478.23	-
	As (arsénico)	6.86208	40
	B (boro)	59.009	-
	Ba (bario)	131.612	-
	Be (berilio)	0.18442	-

Bi (bismuto)	23.9669	-
Ca (calcio)	21598.47	-
Cd (cadmio)	1.40291	40
Ce (cerio)	4.97433	-
Co (cobalto)	1.77391	-
Cr (cromo)	211.045	1200
Cs (cesio)	0.44102	-
Cu (cobre)	160.798	1500
Fe (hierro)	3103.05	-
Hg (mercurio)	0.5530	17
K (potasio)	3731.49	-
Li (litio)	1.98573	-
Mg (magnesio)	3609.96	-
Mn (manganeso)	121.061	-
Mo (molibdeno)	5.5431	-
Na (sodio)	1776.53	-
Ni (níquel)	10.7664	400
P (fósforo)	12804.87	-
Pb (Plomo)	47.2759	400
Sb (antimonio)	1.0065	-
Se (selenio)	2.0954	-
Si (silicio)	735.87	-
Sn (estaño)	0.7805	-
Sr (estroncio)	80.5755	-
Ti (titanio)	54.7134	-
Tl (talio)	0.09706	-
U (uranio)	0.50899	-
V (vanadio)	9.7402	-
Zn (zinc)	836.133	2400

05	Nitritos	1.554	-
06	Nitratos	1939.0	-
07	Nitrógeno Amoniacal	2326.47	-
08	Sulfatos	328.63	-
09	Fósforo	12804.87	-
10	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	58.68	-
11	Relación Carbono Nitrógeno (C/N)	4.26	-
Parámetros microbiológicos			
11	Coliformes Totales	< 3	
12	Coliformes Fecales	< 3	
13	<i>Escherichia coli</i>	< 3	<1000 NMP/1g ST
14	Huevo de helminto	< 1	
15	<i>Salmonella sp.</i>	< 3	<1 NMP/10g St<1/4g ST

Para contrastar los resultados obtenidos, se realizó una comparación adicional con normativas internacionales (Tabla 10), tales como la normativa de Estados Unidos (40 CFR Part. 503), Chile (Decreto supremo N.º4), Argentina (Resolución N.º 97) y Colombia (Decreto N.º 1287). A partir de esta comparación, se observó que los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos o Parámetros de higienización cumplen con los valores establecidos en dichas normativas. Este análisis complementario reafirma la aptitud del biosólido para su valorización y aplicación como enmienda orgánica en los suelos degradados.

Por otro lado, los valores obtenidos por la muestra de biosólidos evidencian la presencia de metales pesados, sin embargo, las concentraciones totales no superan los límites establecidos tanto por las normativas nacionales como internacionales señaladas anteriormente. Este comportamiento coincide con lo reportado en la investigación de Steppas et al. (2025), quienes señalaron que los metales como el cromo, cobre, níquel, plomo, zinc y mercurio el cual

se encontraban por debajo de los límites permitidos por la legislación griega. No obstante, dichos autores observaron procesos de lixiviación de estos metales, lo que demuestra que existe cierta movilidad y, en consecuencia, un potencial riesgo ecotoxicológico asociado a su uso a largo plazo.

Tabla 11.

Cuadro de comparación de parámetros de toxicidad química

mg/kg st. Mat. Seca	Muestra de biosólido	Perú ^(a)		Argentina ^(b)	Chile ^(c)		Colombia ^(d)		USEPA ^(e))
Clase de biosól. /lodo		A	B		A	B	A	B	
As (arsénico)	6.8620 8	40	40	74	20	40	20	40	41
Cd (cadmio)	1.4029 1	40	40	20-40	8	40	8	40	39
Cr (cromo)	211.04 5	1200	1200	1000-1500	-	-	1000	150 0	1200
Cu (cobre)	160.79 8	1500	1500	1000-1750	100 0	1200	1000	175 0	1500
Pb (plomo)	47.275 9	400	400	750-1200	300	400	300	400	300
Hg (mercurio)		17	17	16-25	10	20	10	20	17
Ni (níquel)	10.766 4	400	400	300-400	80	420	80	420	420
Zn (zinc)	836.13 3	2400	2400	2500-4000	200 0	2800	2000	200 0	2800
Se (selenio)	2.0954				50	100	36	100	36
Mo (molibdeno)	5.5431						18	75	18
Parámetros de higienización									
Coliformes Totales	< 3	El nivel de higienización se puede demostrar con el cumplimiento de los procesos previstos en el Anexo I, en su defecto, mediante alguna de las tecnologías indicadas para la higienización		<1		<200 0	<1	<2	<1000
Coliformes Fecales	< 3								
Escherichia coli	< 3					<100 0			
Huevo de helminto	< 1					<1/4		<1	<10
Salmonella sp.	< 3					<3		<3	Ausenci a

- (a) Decreto Supremo N° 015-2017-Vivienda. Art. 13 y 14. 22 de junio de 2017 (Perú)
- (b) Resolución N° 97, Reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos. 22 de noviembre del 2001 (Argentina)
- (c) Decreto Supremo N° 004, Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de aguas servidas (Chile)
- (d) Decreto N° 1287, Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. 10 de julio de 2014 (Colombia).
- (e) Título 40 del Código de Regulaciones Federales (CFR), Part. 503, Normas para el Uso o la Eliminación de Lodos de Depuradora, 19 de febrero de 1993 (EE. UU)

Con respecto al pH, la muestra presentó el valor de 6.19, el cual se encuentra en el rango ligeramente ácido. Este resultado coincide con otras investigaciones similares realizadas en tratamientos de biosólidos provenientes de las distintas EDAR, donde reportaron valores que se encuentran entre 4.4. y 7.4 en biosólidos sometido a procesos de degradación y estabilización (Cano et al., 2024; Kanteraki et al., 2024; Onchoke et al., 2022). En este sentido, el valor de pH obtenido puede considerarse adecuado para su aprovechamiento como enmienda orgánica.

La humedad presentó un valor de 5.21% esto muestra poca presencia de agua en el biosólido. Este resultado se debe al proceso de secado térmico al cual fue sometido dentro la PTAR “La Escalerilla”, con el objetivo principal de reducir la carga microbiológica de biosólidos y a la par facilitar su manejo, almacenamiento y transporte.

En cuanto a la Capacidad del Intercambio Catiónico (CIC), se obtuvo un valor de 58.68 meq/100g, este dato indica que tiene una buena capacidad para retener e intercambiar nutrientes. Este resultado supera al reportado en la investigación de Guacaneme & Barrera-Cataño (2007), quienes obtuvieron un CIC de 33.3 meq/100g, considerado un valor admisible para favorecer la retención de nutrientes en el sustrato. Asimismo, en la investigación de suelos contaminados rehabilitados de Salgado et al. (2025), reportaron el incremento hasta valores entre 65.5 y 81.9 meq/100g, y este comportamiento está asociado con la mejora de las propiedades químicas del

suelo y la recuperación de su funcionalidad. En ese sentido, el valor que se obtuvo en los resultados presenta características que favorecen al mejoramiento de suelos degradados.

Para finalizar, el resultado inicial de la relación C/N fue de 4.26 siendo muy baja respecto a los rasgos típicos de biosólido. Esto nos indica baja disponibilidad de carbono y nitrógeno para ser utilizada de forma directa como enmienda orgánica. En ese contexto, las muestras de biosólidos fueron sometidas a un tratamiento adicional con el fin de ajustar sus características a los criterios establecidos a la norma técnica aplicable para enmiendas orgánicas.

4.2. Evaluación de la Enmienda obtenida del proceso de Compostaje

4.2.1. Caracterización de enmienda de biosólido

Se obtuvo un compost maduro y estabilizado a partir de los biosólidos, con valores adecuados como se observa en la **Tabla 12**. La enmienda orgánica final presentó características adecuadas que permitieron su aplicación. También se realizó un cuadro de seguimiento parámetros como el pH, temperatura y aspecto el cual se procedió mediante la visualización de la textura, como se muestra en el **Anexo 2 (Durante el Proceso de Compostaje)**. La calidad del compost se confirmó, siguiendo criterios de estabilidad y madurez comúnmente utilizados en la literatura.

Tabla 12.

Resultados de Parámetros según la NTP 201.207, para la enmienda orgánica

Parámetros	Enmienda Orgánica			ESTANDAR	CUMPLE	FUENTE
	(Resultados)					
	B1	B2	B3			
pH	8.10	8.22	7.14	6-8	SI	NTP 201.207
Humedad-	SC	SC	SC	≤ 35%	SI	NTP 201.207

N	2.18	2.13	1.90	≥ 1 %	SI	NTP 201.207
Relación C/N	11.94	11.82	13.70	10-20	SI	NTP 201.207
Conductividad eléctrica	3.00	3.75	1.53	≤ 4.0 dS/m	SI	NTP 201.207
Coliformes Totales	<3	<3	<3	< 1000 NMP/g	SI	NTP 201.207
Salmonella	<3	<3	<3	ausente en 25 g de muestra	SI	NTP 201.207

Nota. B1: enmienda obtenida con 10% de biosólido, B2: enmienda obtenida con 15% de biosólido, B3: enmienda obtenida con 20% de biosólido.

Los parámetros evaluados durante el proceso de compostajes y en el producto final evidencian que la enmienda presentó características acordes con los criterios técnicos establecido con la normativa vigente. El control de variables como temperatura, el pH, la humedad permitió favorece la estabilización del biosólidos.

La obtención de la enmienda orgánica mediante el proceso de compostaje presentó características fisicoquímicas las cuales se pudieron determinar según la Norma Técnica Peruana, esto para comprobar la calidad de la enmienda resultante, dichos valores están dentro del parámetro óptimos para su aplicación como se observaba en la Tabla 11.

En cuanto al pH, los valores obtenidos oscilan desde 6.72 a 8.07, encontrándose dentro del rango establecido por la NTP 201.207 y presentan potencial de uso agrícola. Estos resultados son consistentes con lo reportado por Castellanos et al. (2019), quienes indican que sus valores obtenidos están en un rango de 6.5 a 8 como adecuados para este tipo de aplicaciones. De igual manera, coinciden con lo descrito por Rosas-Martínez et al. (2021) en

su evaluación de residuos, donde registraron un rango de 6.21 a 7.70, rangos que fueron considerados óptimos por su normativa mexicana vigente. En este sentido, los valores obtenidos indican condiciones favorables para la estabilidad de la enmienda orgánica.

Por otro, la Conductividad Eléctrica (CE) presentó valores favorables (≤ 4.0 dS/m) encontrándose dentro de los valores según la NTP 201.207, la cual nos indica una salinidad compatible con el crecimiento vegetal. De manera adicional, se hizo comparaciones con otras investigaciones como el de R. Li et al. (2020), quienes señalaron que valores elevados de conductividad eléctrica pueden generar al incremento de sales en el medio. Es por ello que Oarga Mulec et al. (2016) en su investigación recomendaron que los valores de CE en el compost se mantengan por debajo de 25 mS/cm para evitar efectos negativos en el suelo.

Asimismo, Ippolito et al. (2010), obtuvieron que la aplicación de biosólidos compostados puede incrementar la CE del suelo debido al aporte de nutrientes, lo que nos da entender que este resultado favorece ya que presenta un adecuado nivel de salinidad.

4.2.2. Obtención de resultados de la relación C/N de la enmienda

El análisis de parámetro de relación C/N se realizó al término del proceso de compostaje, con el objetivo de evaluar el grado estabilización y madurez alcanzada. Este parámetro es criterio clave para valorar la eficiencia de la degradación de materia orgánica y la disponibilidad relativa de nitrógeno en el producto final (Raj & Antil, 2011). Los valores obtenidos a detalle para cada tratamiento se presentan en la **Tabla 13** y el **Anexo 4**, donde se observaron diferencias entre los tratamientos, que refleja la calidad de enmienda producida.

Tabla 13.

Relación de C/N según tratamiento.

Tratamiento	N	C	C/N	Promedio C/N
-------------	---	---	-----	--------------

10%	B1	1	2.283	26.811	11.7437582	11.96
		2	2.197	26.753	12.1770596	
10%	B2	1	2.305	26.678	11.5739696	11.71
		2	2.199	26.053	11.847658	
10%	B3	1	2.229	25.62	11.4939435	11.64
		2	2.212	26.075	11.7879747	
15%	B4	1	2.152	25.676	11.9312268	11.89
		2	2.064	24.471	11.8561047	
15%	B5	1	2.238	26.215	11.7135836	11.65
		2	2.122	24.5881	11.587229	
15%	B6	1	1.988	22.964	11.5513078	11.78
		2	2.15	25.812	12.0055814	
20%	B7	1	1.83	23.931	13.0770492	13.08
		2	1.626	21.284	13.0897909	
20%	B8	1	2.101	27.703	13.1856259	13.39
		2	2.024	27.504	13.5889328	
20%	B9	1	1.772	26.304	14.8442438	14.63
		2	2.147	30.932	14.4070796	

Nota. B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8 y B9 corresponden a las nomenclaturas empleadas para la identificación en procedimiento análisis elemental

En la investigación se obtuvieron los promedios de la relación C/N que oscilaban aproximadamente entre 11.6 y 11.9 para los tratamientos de 10% y 15% de biosólidos y aumentaron a un valor de 13 y 14.6 con el 20% de biosólido, lo que indica que las enmiendas

están relativamente maduras, ya que diversos estudios consideran como indicativos un rango de 10 a 20 para un compost estable y con madurez (Sathya et al., 2025).

En el caso de la relación C/N del biosólido inicial fue de 4.26, considerado un valor muy por debajo de la NTP, que refleja un contenido bajo de carbono en comparación con el nitrógeno. Tras someterlo al proceso de compostaje, la relación C/N de cada tratamiento alcanzaron a valores que oscilan de 11 a 14 esta vez encontrándose dentro del rango establecido por la NTP.

Estos resultados obtenidos indica que el proceso de compostaje fue eficaz, ya que presentó un incremento relativo del carbono orgánico estable, coherente con evolución típica del proceso de compostaje. Este resultado coincide con la investigación que realizaron Ji et al. (2023) quienes señalan que el proceso de compostaje es una estrategia efectiva para corregir el desequilibrio inicial y producir una enmienda con criterios de madurez, lo que genera un incremento de su potencial de uso y eficaz en suelos.

4.2.3. Análisis estadístico de la relación C/N de la enmienda

El análisis de varianza mostró un efecto altamente significativo del factor de porcentaje de tratamiento de biosólidos (T-%BS) sobre la relación C/N, por lo que se rechaza la hipótesis nula, confirmando que la proporción de biosólido incorporada en las pilas de compostaje influyó directamente en la relación C/N. Este comportamiento demuestra que la composición de la mezcla condicionó la actividad microbiana, favoreciendo una mayor mineralización del carbono y estabilización progresiva del material. Es por ello que las diferencias observadas no corresponden a variaciones aleatoria, sino al efecto del porcentaje del biosólido compostado, como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14.

Análisis de Varianza de la relación C/N

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
T-%BS	2	14.843	7.4216	33.66	0.000
Error	15	3.307	0.2205		
Total	17	18.150			

Nota. T-%BS: representa los tratamientos en función del porcentaje de biosólido.

Al confirmarse diferencias entre los tratamientos, se aplicaron las pruebas de comparación múltiple de Tukey y LSD de Fisher para identificar los tratamientos que difieren entre sí.

Los resultados de la prueba de Tukey (**Tabla 14**) evidenciaron que el tratamiento con 20% alcanzó la mayor medida de relación C/N (13.699), conformando un grupo estadísticamente independiente (grupo A). En contraste, los tratamientos con 10% y 15% de biosólidos presentaron medias muy similares (11.7707 y 11.7742, respectivamente), agrupándolos dentro del mismo conjunto estadístico (grupo B), lo que indica la ausencia de diferencias significativas entre ellas.

Los resultados sugieren que el incremento de la proporción de biosólidos hasta un 20% favoreció significativamente la estabilización de la materia orgánica durante el proceso de compostaje, ya que refleja un aumento en la relación C/N.

Tabla 15.

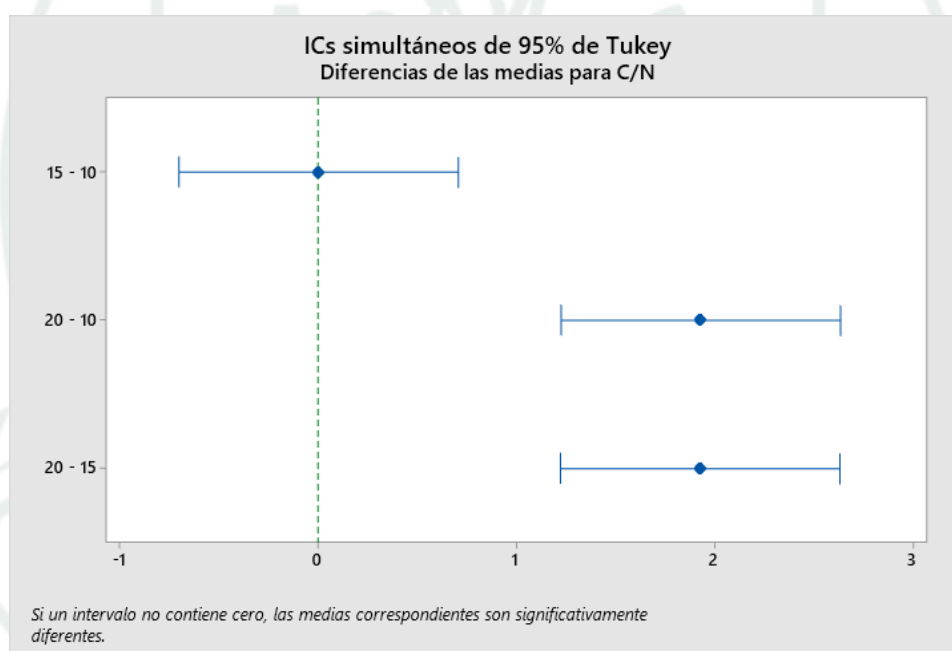
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

T-%BS	N	Media	Agrupación
20	6	13.699	A
15	6	11.7742	B
10	6	11.7707	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 9.

Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Tukey



La **Figura 9** complementa estos resultados al mostrar la separación de medias obtenidas mediante la prueba de Tukey, donde se observa claramente que el tratamiento con 20% se distancia de los demás tratamientos, confirmando su efecto significativo.

Para el análisis con el método LSD de Fisher (**Tabla 16 y Figura 10**), con un nivel de confianza de 95%, confirma los resultados obtenidos mediante la prueba de Tukey,

identificando diferencias significativas entre el tratamiento con 20% de biosólido y los demás tratamientos. Esta coincidencia entre ambas pruebas estadísticas fortalece la confiabilidad de los resultados y permite afirmar que la proporción de biosólido constituye un factor determinante en la evolución de la relación C/N durante el compostaje.

Tabla 16.

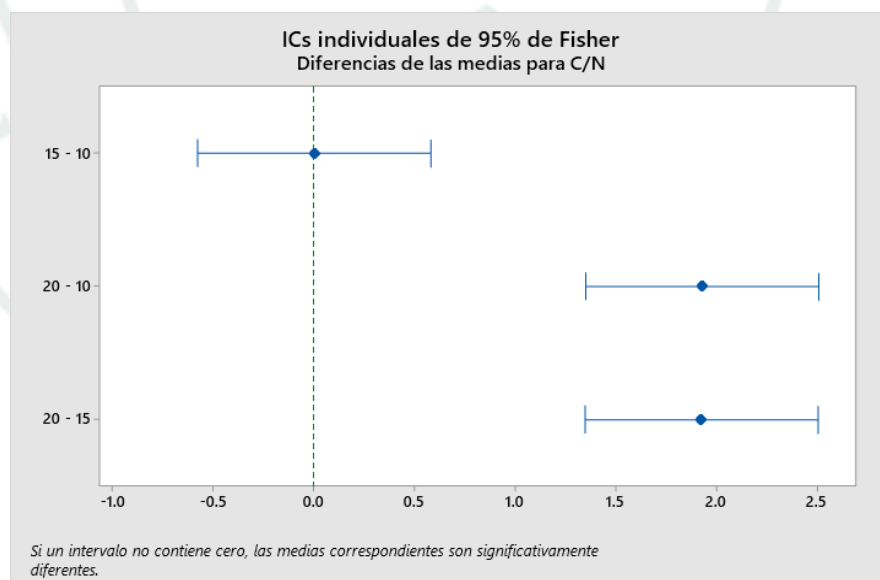
Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher

T-%BS	N	Media	Agrupación
20	6	13.699	A
15	6	11.7742	B
10	6	11.7707	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes

Figura 10.

Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Fisher a un 95% de confianza.



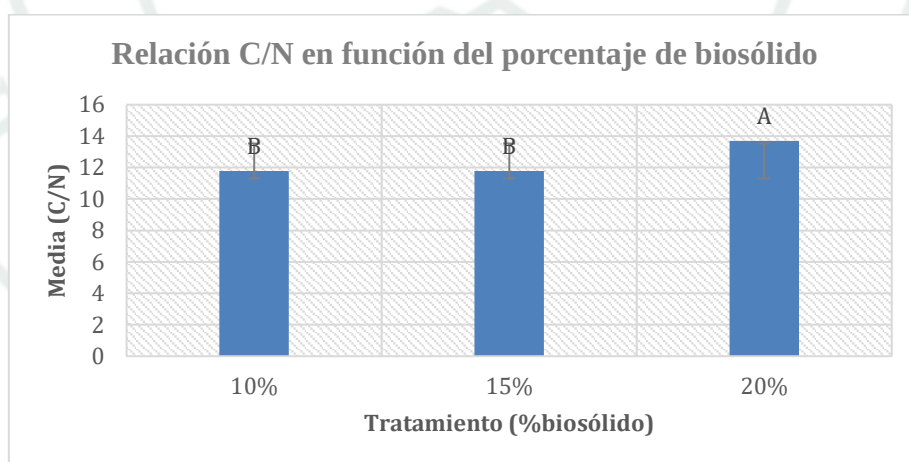
Desde un punto de vista práctico, estos hallazgos indican que la incorporación de un 20% de biosólido favorece la obtención de una enmienda orgánica con mayor grado de madurez y estabilidad.

Las pruebas de comparaciones nos permitieron identificar específicamente, cuales presentaron diferencias estadísticas entre sí, complementando el resultado obtenido mediante la prueba de ANOVA. Los resultados demostraron que el tratamiento con mayor proporción de biosólido alcanzó una relación C/N significativamente diferente respecto a los demás tratamientos, lo que demuestra que el incremento del biosólido favoreció el proceso de estabilización de la enmienda orgánica obtenida.

Este comportamiento puede atribuirse al mayor contenido de materia orgánica biodegradable y nutrientes presentes en el biosólido, los cuales favorecen la actividad metabólica de los microorganismo durante el compostaje.

Figura 11.

Efecto del porcentaje de biosólido en la relación C/N.



Nota. Las barras representan la media $\pm$ desviación estándar. Las letras diferentes indican diferencias significativas según Tukey ($P < 0.05$).

Los resultados óptimos en cuanto al parámetro de Relación C/N, correspondieron a aquellos tratamientos que presentan los valores más elevados y que mostraron diferencias estadísticas significativas respecto a los demás tratamientos. Este parámetro es fundamental, ya que constituye uno de los principales indicadores de la madurez y estabilidad del compost, ya que refleja el grado de descomposición de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes en el producto final (Bazrafshan et al., 2015). Como se observa en la **Figura 11**, la relación C/N tendió a incrementarse conforme aumentó el porcentaje del biosólido incorporado, alcanzando los mayores valores en los tratamientos con 20% de biosólido.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado R. Li et al., (2020) quienes obtuvieron relaciones C/N finales entre 16.76 y 19.20 durante el compostaje de biosólidos, indicando que valores cercanos a 20 representan condiciones favorables de estabilización de materia orgánica. Sin embargo, diversos autores señalan que no existe un único valor referencial para definir la madurez del compost, ya que esta depende de la composición inicial de los materiales utilizados y de las condiciones del proceso de compostaje.

Asimismo, en la investigación de Pan et al. (2019a), obtuvieron relaciones C/N finales entre 17 y 18, inferiores al valor teórico 20, pero suficientes para evidenciar la madurez del producto compostado. De manera similar, Awasthi et al. (2017) reportaron valores comprendidos entre 11.4 y 31.26 al emplear diferentes proporciones de biocarbón y paja de trigo, concluyendo que las variaciones observadas responden a la composición de las mezclas utilizadas y a la dinámica de degradación microbiana durante el proceso de compostaje.

En la presente investigación, los tratamientos evaluados alcanzaron valores promedios de la relación C/N, encontrándose dentro del rango considerado adecuado. Diversos estudios han señalado que las relaciones C/N finales inferiores a 20 son indicativos de una adecuada

estabilización, mientras que valores comprendidos entre 10 y 15 suelen asociarse con materiales maduros, libres de fitotoxicidad y aptos para su aplicación agrícola (Jakubus, 2020).

Por otro lado, el incremento de la relación C/N respecto al biosólido inicial (C/N=4.26) evidencia que el proceso de compostaje favoreció la transformación y estabilización de la materia orgánica. Este comportamiento puede atribuirse a la mineralización de compuestos orgánicos y a la reorganización de los nutrientes durante el proceso biológico, generando un material adecuado para uso como enmienda orgánica.

En consecuencia, aunque ninguno de los tratamientos alcanzó la relación C/N 20, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los rangos aceptados por la literatura científica y la Norma Técnica Peruana NTP 201.207. Particularmente, los tratamientos con 20% de biosólido presentaron los valores más elevados de la relación C/N, evidenciando un mayor grado de estabilización y madurez.

4.3. Evaluación del Biosólido Compostado en suelos degradados del PIRS

4.3.1. Evaluación de concentración de cromo en el tratamiento del suelo degradado

La concentración inicial de cromo en el suelo del PIRS fue de 335.95 ppm (B0), como se muestra en la **Tabla 17** y en los **Anexos 5 y 6**. Si bien este valor no cuenta con un límite específico para uso agrícola dentro de los ECA - suelo, evidencia una contaminación relevante asociada a las actividades industriales desarrolladas en el PIRS, esto concuerda con la acumulación de metales pesados en suelos expuestos a descargas industriales.

Tras la aplicación de la enmienda orgánica elaborada a partir de biosólidos, se observó una reducción de la concentración de cromo en todos los tratamientos evaluados. El tratamiento B1 registró una concentración final de 268.68 ppm, equivalente a una remoción del 20.02%, mientras que el tratamiento B2 alcanzó 262.23 ppm, con una remoción del 21.94%. Por su parte, el tratamiento B3 presentó la menor concentración de cromo, con 190.13 ppm, logrando

una remoción del 43.40%, valor considerablemente superior al obtenido en los demás tratamientos. En conjunto, los tratamientos alcanzaron una remoción promedio de 28.45%, lo que evidencia la capacidad de la enmienda orgánica para reducir la concentración de cromo presente en el suelo.

Tabla 17.

Tabla de comparación de suelo del PIRS y tratamientos

MUESTRA	Análisis de:	Unidad	Resultado	% de remoción	Promedio de % de remoción
B0	Cromo (Cr)	ppm	335.95	-	-
B1 (20%)	Cromo (Cr)	ppm	268.68	20.02%	28.45%
B2 (20%)	Cromo (Cr)	ppm	262.23	21.94%	
B3 (20%)	Cromo (Cr)	ppm	190.13	43.40%	

Nota. B0: suelo degradado del PIRS; B1, B2, B3: tratamiento del biosólido al 20%.

Los resultados obtenidos demostraron que la aplicación de la enmienda a base de biosólidos contribuyó a la reducción de la concentración de cromo en el suelo degradado. Este comportamiento evidencia que la materia orgánica estabilizada favorece a procesos de inmovilización del metal pesado, disminuyendo la biodisponibilidad en el suelo, lo que representa una alternativa a considerar para la mitigación de riesgos ambientales.

Asimismo, aunque las concentraciones finales de cromo continúan siendo elevadas, diversos estudios han demostrado que las enmiendas orgánicas no solo contribuyen a disminuir la concentración total de metales pesados, sino también su movilidad y biodisponibilidad. En este sentido, Kacprzak et al. (2014) reportaron que la aplicación de materiales orgánicos en suelos contaminados favoreció la estabilización de Pb, Zn y Cd, reduciendo significativamente

su absorción por las plantas. De manera similar, Al-Lami et al. (2022) evidenciaron que la incorporación de biosólidos en suelos provenientes de relaves mineros mejoró sus propiedades fisicoquímicas y promovió la inmovilización de metales como Zn, Cu y Cd.

Estos resultados coinciden con investigaciones que señalan que la materia orgánica presente en compost y biosólidos puede transformar los metales pesados hacia formas más estables, disminuyendo su movilidad y toxicidad. Al respecto, Mossa et al. (2020) indicaron que los metales asociados a fracciones orgánicas presentan menor reactividad química y, por consiguiente, un menor riesgo ambiental. Asimismo, Asemaninejad et al., (2021) señalaron que la aplicación controlada de biosólidos mejora las propiedades del suelo sin generar efectos adversos significativos, favoreciendo procesos de recuperación ambiental.

Los resultados sugieren que la reducción observada no responde únicamente a una disminución de la concentración de cromo total, sino principalmente a procesos de inmovilización química del metal en el suelo. Entre los mecanismos involucrados podría incluirse la transformación de especies más móviles y biodisponibles, como Cr (VI), hacia formas más estables como Cr (III). La literatura indica que este comportamiento puede atribuirse a que, en suelos tratados con enmiendas orgánicas, el Cr (VI) es reducido por la materia orgánica disuelta y de grupos funcionales presentes en las sustancias húmicas, principalmente grupos fenólicos y carboxilos. El Cr (III) generado presenta una menor movilidad y toxicidad, quedando inmovilizado mediante procesos de complejación con la materia orgánica. Asimismo, puede formar co-precipitados con óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, así como precipitar en forma de compuestos poco solubles. Estos mecanismos favorecen la retención del metal en el suelo, disminuyendo su biodisponibilidad sobre los organismos y el ambiente circundante (Q. Guo et al., 2024; Yang et al., 2021).

En conjunto, los resultados obtenidos sugieren que la disminución de la concentración de cromo en los tratamientos evaluados se relaciona principalmente con procesos de reducción e inmovilización química promovidos por la materia orgánica presente en la enmienda. Estos mecanismos favorecen la estabilización del metal en el suelo y contribuyen a disminuir su movilidad, evidenciando el potencial de la enmienda como alternativa de rehabilitación de suelo degradado con presencia de cromo.

4.3.2. Evaluación de toxicidad mediante el test de germinación de *Helianthus annuus*

4.3.2.1. Resultados de Germinación de semillas de *Helianthus annuus*

La germinación de semillas se utilizó como indicador biológico para evaluar el potencial de la enmienda orgánica en la reducción de la toxicidad del suelo bajo los diferentes tratamientos. En la Tabla 18 se presenta el porcentaje de germinación obtenido para cada tratamiento a los 15 y 30 días, los intervalos que, en condiciones de laboratorio, representa al menos el 50% de la germinación esperada.

Tabla 18.

Datos de % de plántulas germinadas por tratamiento en relación con el tiempo.

% Biosólido		10%		15%		20%	
Tiempo (Días)		15	30	15	30	15	30
% de suelo tratado		40%	50%	10%	20%	40%	50%
	85%	50%	60%	0%	10%	30%	40%
		60%	70%	10%	20%	0%	20%
		10%	20%	20%	40%	0%	40%
	70%	40%	40%	4%	40%	10%	20%
		60%	60%	0%	10%	10%	10%

	40%	60%	0%	20%	0%	20%
55%	10%	10%	0%	20%	20%	40%
	0%	0%	20%	70%	30%	60%
100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
(control)	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Nota. % Germinación = (semillas germinadas/total de semillas) x 100

Según la Tabla 18, se observa que los tratamientos con biosólido presentan porcentajes de germinación variables según el porcentaje de suelo tratado y el tiempo de evaluación. En general, los tratamientos mostraron mayores porcentajes de germinación en comparación con el suelo del PIRS (control), en el cual no se registró germinación. Esto nos indica que la incorporación de biosólidos contribuyó a disminuir la fitotoxicidad del suelo proveniente del PIRS y a generar condiciones más favorables para el desarrollo inicial de las plántulas.

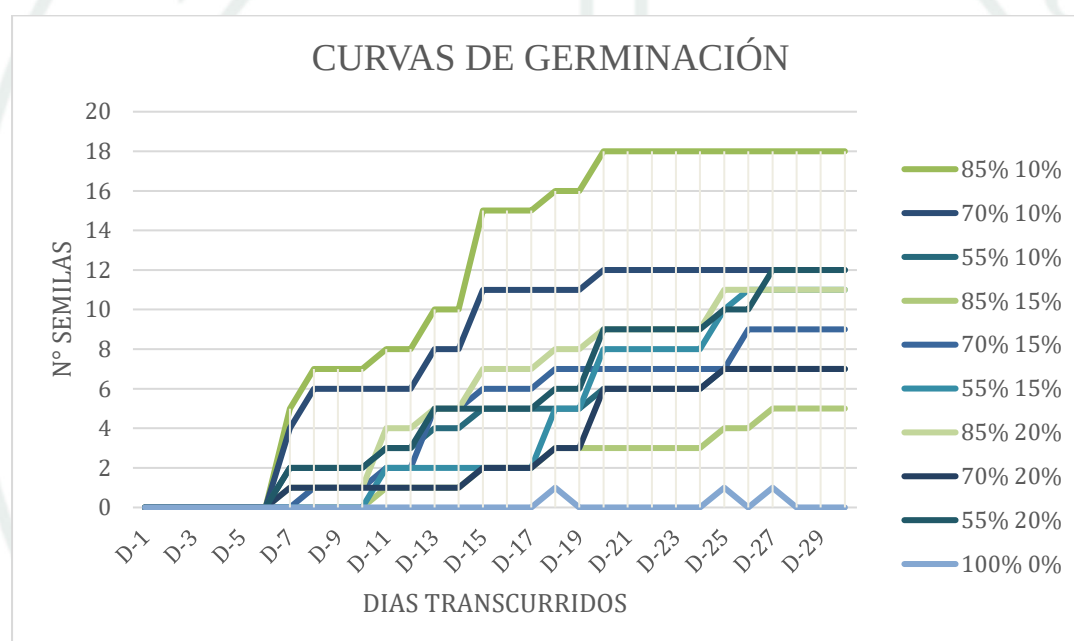
Los patrones observados sugieren que la enmienda orgánica no solo contribuye a inmovilizar parte de los contaminantes presentes en el suelo, sino también mejoró las propiedades fisicoquímicas del sustrato (estructura, humedad, disponibilidad de nutrientes), creando un ambiente más favorable para la emergencia y establecimiento inicial de las plántulas (Liang et al., 2016; Shea et al., 2021). En conjunto, el bioensayo de germinación confirma la utilidad como herramienta de bioindicación de la calidad de suelo y respalda que la aplicación de enmienda de biosólidos, en las dosis evaluadas, esto nos indica una reducción de fitotoxicidad del suelo del PIRS y mejora sus condiciones para el desarrollo vegetal. 54 posteriormente, los datos fueron sometidos a un análisis estadístico mediante el uso del software Minitab, con el fin de evaluar la significancia de las diferencias y obtener una interpretación cuantitativa más precisa.

4.3.2.2. Análisis de la dinámica de germinación

De manera complementaria, las curvas de germinación presentadas en la Figura 12 permiten analizar la dinámica del proceso germinativo a lo largo de los 30 días. En la figura se presentan tratamientos con diferentes proporciones de suelo contaminado (85%,70% y 55%) y de biosólidos (10%,15%,20%), lo que posibilita evaluar el efecto de la dosis de enmienda sobre la velocidad y el grado de germinación.

Figura 12.

Curvas de Germinación en un periodo de 30 días



Nota. % suelo degradado: 85%, 70% y 55%; % de biosólido: 10%, 15% y 20%

El comportamiento de las curvas mostró que los tratamientos con menor concentración de biosólidos presentaron una germinación más rápida y uniforme, mientras que los tratamientos con mayores porcentajes de biosólidos evidenciaron una emergencia más lenta y dispersa en el tiempo. Esto nos indica un posible efecto dosis-respuesta, donde dosis moderadas favorecen la reducción de fitotoxicidad y mejoran las condiciones del sustrato, sin embargo, dosis más altas pueden generar estrés por acumulación de compuestos fitotóxicos durante la fase inicial de la germinación (R. P. Singh & Agrawal, 2008).

En este sentido, las investigaciones sobre biosólidos y otras enmiendas orgánicas han señalado que, cuando se aplican en rangos óptimos, pueden mejorar la estructura del suelo, aportar nutrientes y reducir la biodisponibilidad de metales, incrementando la germinación (Emmanouil et al., 2024; Shrestha et al., 2019). Sin embargo, concentraciones excesivas se asocian con un aumento de conductividad eléctrica, presencia de sales y compuestos solubles que inducen a la fitotoxicidad, reflejada en menor índice de germinación, acortamiento radicular o inhibición parcial del crecimiento (R. P. Singh & Agrawal, 2010; Venegas et al., 2019).

De igual manera, estos resultados coinciden con los hallazgos en la investigación de Souahi et al. (2025), quienes demostraron que la aplicación de enmiendas orgánicas redujo la biodisponibilidad de Cadmio. En particular, se ha observado que mezclas de suelo con biosólidos u otros residuos orgánicos logran porcentajes elevados de germinación e índices de germinación superiores al 80-100%, considerados no fitotóxicos, cuando se aplican en proporciones adecuadas (Fijalkowski & Kwarciak-Kozłowska, 2020).

En el caso del suelo degradado del PIRS (control), la baja o nula germinación sugiere una alta toxicidad inicial, probablemente asociada a la presencia de metales pesados y otras sustancias contaminantes. Frente a ello, todos los tratamientos con biosólido, tanto abajas como a mayores concentraciones, mostraron una germinación más rápida que el control, lo que confirma que la enmienda contribuye a atenuar la fitotoxicidad del sustrato original. Destaca particularmente el tratamiento con 10% de biosólido, el cual registró uno de los mayores porcentajes de germinación según la curva obtenida.

4.3.2.3. Análisis de Supervivencia de plántulas

El porcentaje de supervivencia de las plántulas se calculó aplicando la fórmula descrita en la sección de metodología y, posteriormente, se obtuvo el promedio por tratamiento. Los

resultados se presentaron en la Tabla 19 y, para facilitar su interpretación, se representan gráficamente en la Figura 13.

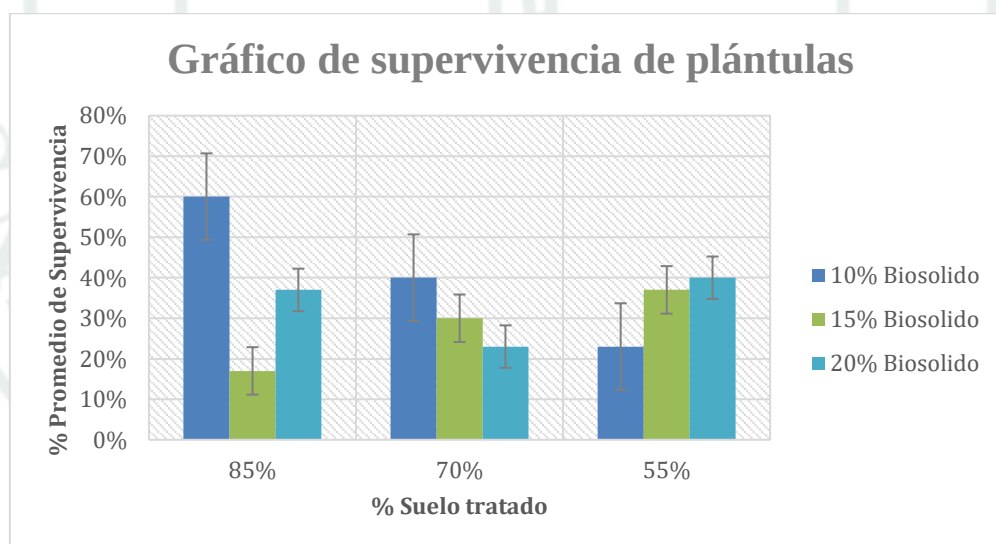
Tabla 19.

Supervivencia de plántulas según tratamiento

% Biosólido	% de Suelo tratado durante 30 días		
	85%	70%	55%
10% Biosólido	60%	40%	23%
15% Biosólido	17%	30%	37%
20% Biosólido	37%	23%	40%

Figura 13.

Gráfico del % de supervivencia en razón a los tratamientos del suelo y enmienda.



Nota. % suelo degradado del PIRS: 85%, 70% y 55%; % de biosólido: 10%, 15% y 20%

En la Figura 13 se observa que el tratamiento con 10% de biosólidos presenta, en promedio, los mayores porcentajes de supervivencia en comparación con 15% y 20%, los cuales muestran valores más similares entre sí. Esto sugiere un efecto en razón de la dosis hacia la respuesta, en el que dosis moderadas de enmienda orgánica favorecen la germinación,

mientras que incrementos adicionales no mejoran e incluso pueden limitar la supervivencia, fenómeno también descrito para biosólidos y otros materiales orgánicos en suelos contaminados.

La mejor germinación observada es con el 10% de biosólido esto puede deberse por un equilibrio más favorable entre la disminución de la toxicidad del suelo y la generación de nuevas limitantes químicas. Entonces la dosis moderada, el biosólido aporta materia orgánica y nutrientes que mejoran la estructura del sustrato, la disponibilidad de N, P y otros elementos esenciales, lo que genera la inmovilización de metales, reduciendo su fracción fitotóxica, lo que se traduce a una mayor emergencia (Conesa & Párraga-Aguado, 2022; Gonzaga et al., 2020).

Asimismo, los tratamientos con 85% de suelo del PIRS registraron mayores porcentajes de supervivencia que los de 70% y 55%, lo que indica que una mayor proporción de suelo tratado genera condiciones más estables y favorables para el crecimiento inicial, probablemente por una mejor combinación entre reducción de toxicidad y disponibilidad de nutrientes.

Estos resultados son coherentes con lo reportado por Barreto A et al., (2024) y Singh et al. (1997), quienes en estudios con enmiendas orgánicas o biosólidos evidencian mejoras en el establecimiento de cultivo, siempre en cuando las dosis sean adecuadas; en cambio, aplicaciones altas pueden aumentar o modificar propiedades físicas hasta llegar afectar negativamente la germinación y el crecimiento temprano.

Este comportamiento también coincide con lo reportado por Melo et al. (2019), quienes observaron que la respuesta fisiológica y germinativa de la planta frente a la aplicación de la enmienda orgánica (Sewchar) varían en función de las dosis empleadas, registrándose efectos más favorables en concentraciones moderadas. No obstante, la magnitud de esta respuesta

también depende de la especie vegetal evaluada, debido a diferencia en sus requerimientos nutricionales, su capacidad de adaptación y la tolerancia en el medio.

Diversos estudios muestran que aún bajo las misma dosis y tipo de enmienda, algunas especies incrementan notablemente su biomasa y su estado nutricional, mientras otras apenas responden o incluso presentan reducciones de crecimiento (Abreu et al., 2017a; Garcés-Hernández et al., 2024). Esto se puede evidenciar en la investigación de Abreu et al. (2017b), donde los sustratos formulados por biosólidos, *Schinus terebinthifolius* respondió mejor a proporciones altas biosólido, mientras que *Handroanthus heptaphyllus* alcanzó su mejor desempeño con una mezcla intermedia, lo que se relaciona con diferencia en su ecología, tolerancia a cambio de pH, salinidad y disponibilidad en el sustrato.

Este resultado guarda una relación con la curva de germinación obtenida, ya que ambos análisis muestran una tendencia consistente, donde las menores concentraciones de biosólidos favorecieron una respuesta más eficiente durante las etapas iniciales de desarrollo de plántulas. Lo que sugiere que a dosis moderadas proporción condiciones más favorables para la germinación

4.3.2.4. Análisis Estadístico de % de germinación plántulas germinadas

Para el análisis de varianza se realizó utilizando los datos correspondientes a los 15 y 30 días, con el propósito de obtener una evaluación más precisa del comportamiento de los tratamientos.

Análisis Estadístico en 15 días transcurridos

El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas entre los tratamientos evaluados con el valor de $p = 0.005 < 0.05$, lo que indica que el porcentaje de biosólidos incorporado en la enmienda influyó significativamente sobre la germinación de *Helianthus annuus* durante las etapas iniciales de desarrollo. En consecuencia, se rechaza la

hipótesis nula y se acepta que existen diferencias entre las medias de los tratamientos (Tabla 19).

Este resultado demuestra que la respuesta biológica de las semillas estuvo directamente relacionada con las características fisicoquímicas de cada tratamiento, donde se demuestra que pequeñas variaciones la composición del sustrato pueden modificar la germinación inicial de las plántulas.

Tabla 20.

Análisis de Varianza en la germinación del girasol en 15 días.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TRAT.	2	0.3526	0.17628	6.61	0.005
Error	24	0.6405	0.02669		
Total	26	0.9931			

Nota. TRAT: pruebas de las enmiendas con % de biosólido

Los resultados de la prueba de comparación múltiple de Tukey (Tabla 21) (Figura 14) evidenciaron que el tratamiento con 10% de biosólido presentó la mayor media de germinación (0.344), mientras que el tratamiento con 15% registró la menor respuesta (0.0711). El tratamiento con 20% mostró un comportamiento intermedio, compartiendo agrupaciones estadísticas con ambos tratamientos. Esto sugiere que el incremento de biosólido no produjo una mejora proporcional en la germinación, sino que existió una dosis óptima del 10% fue capaz de favorecer el establecimiento inicial de las plántulas.

Tabla 21.

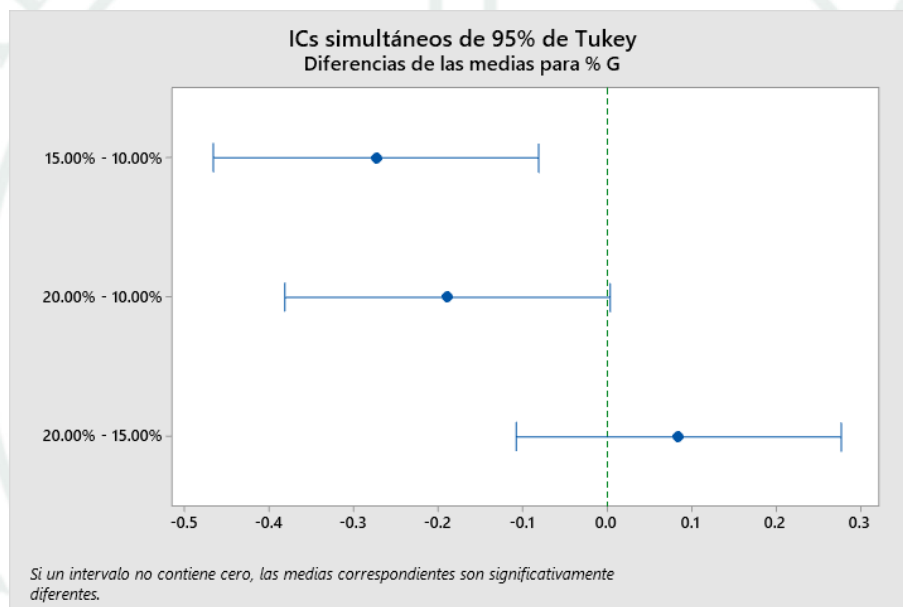
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

TRAT	N	Media	Agrupación
10%	9	0.3444	A
20%	9	0.1556	AB
15%	9	0.0711	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 14.

Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Tukey.



Para el análisis con el método LSD de Fisher con una confianza de 95% (Tabla 21) (Figura 15) confirmó esta tendencia, identificando al tratamiento con 10% de biosólidos como estadísticamente diferente de los demás tratamientos con mayores concentraciones. La coincidencia entre ambas pruebas fortalece los resultados y nos permite afirmar que las menores dosis favorecieron a la germinación durante los primeros 15 días.

Tabla 22.

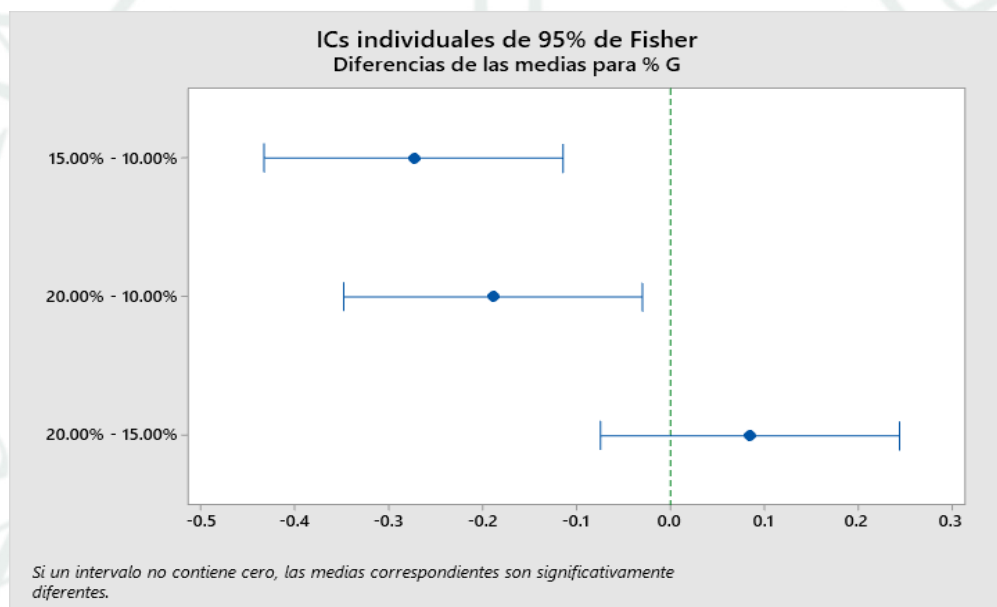
Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%.

TRAT	N	Media	Agrupación
10%	9	0.3444	A
20%	9	0.1556	B
15%	9	0.0711	B

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 15.

Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Fisher.



Este comportamiento podría atribuirse a que una dosis moderada de biosólidos favoreció la disponibilidad de nutrientes y mejoró las condiciones físicas del sustrato sin generar acumulación excesiva de compuesto fitotóxicos durante la fase inicial, como se pudo observar con los resultados de la curva de germinación y el porcentaje de supervivencia.

Análisis Estadístico en 30 días transcurridos

A diferencia de lo observado durante la etapa inicial, el análisis de varianza (ANOVA) realizado a los 30 días no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos ya que

obtuvo el valor de $p = 0.405 > 0.05$, indicando que el porcentaje de biosólido aplicado no influyó de manera significativa sobre la germinación en esta etapa como se observa en la Tabla 22. Por lo tanto, se acepta la hipótesis nula de igualdad entre las medias.

Esto demuestra que conforme avanza el desarrollo de las plántulas, las diferencias iniciales ocasionado por el porcentaje de biosólidos tendieron a disminuir, permitiendo una respuesta germinativa más uniforme entre los tratamientos.

Tabla 23.

Análisis de Varianza en la germinación del girasol en 30 días.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
TRAT.	2	0.08074	0.04037	0.95	0.402
Error	24	1.02444	0.04269		
Total	26	1.105			

Nota. TRAT: pruebas de las enmiendas con % de biosólido

Los resultados obtenidos mediante las pruebas de Tukey y LSD de Fisher (Tablas 24 y 25) corroboraron esta situación, ya que todos los tratamientos fueron agrupados dentro de una misma categoría estadística. Esto indica que, aunque inicialmente existieron diferencias en la velocidad de germinación, con el transcurso del tiempo las semillas tendieron a alcanzar porcentajes de germinación similares independientemente de la concentración de biosólido aplicada.

Tabla 24.

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%.

TRAT	N	Media	Agrupación
10%	9	0.4111	A
20%	9	0.3333	A
15%	9	0.2778	A

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 16.

Diferencias de medias con razón a la respuesta en el método de Tukey a un 95% de confianza.

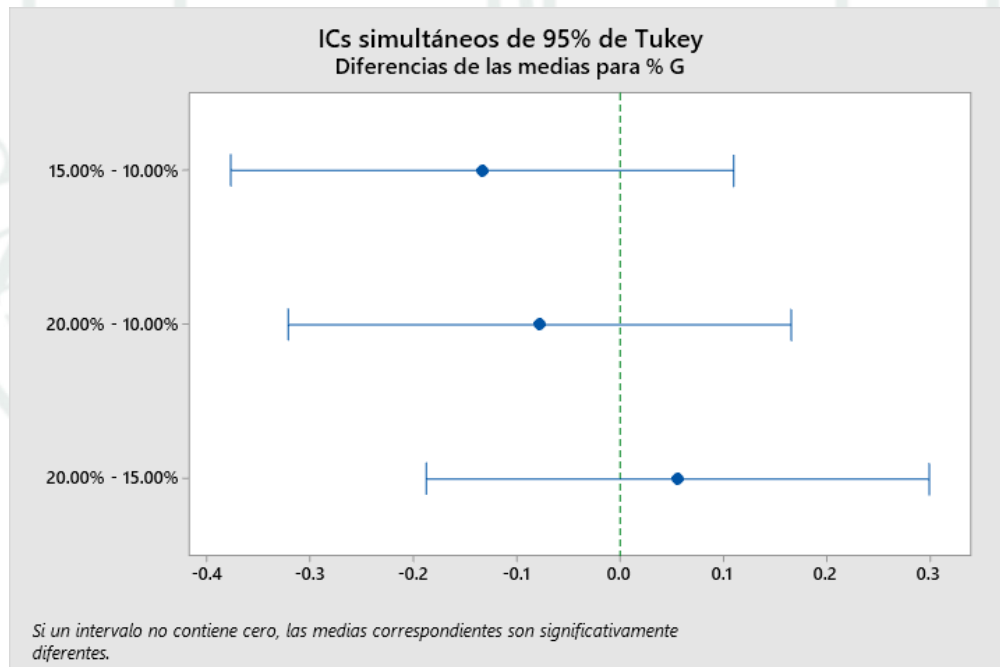


Tabla 25.

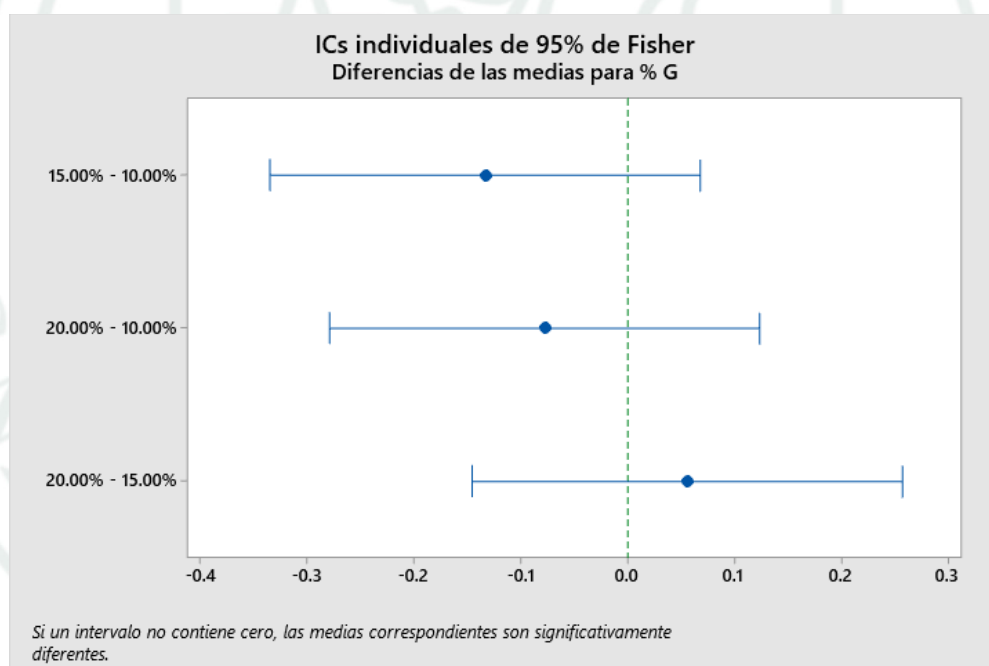
Agrupar información utilizando el método LSD de Fisher y una confianza de 95%.

TRAT	N	Media	Agrupación
10%	9	0.4111	A
20%	9	0.3333	A
15%	9	0.2778	A

Nota. Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Figura 17.

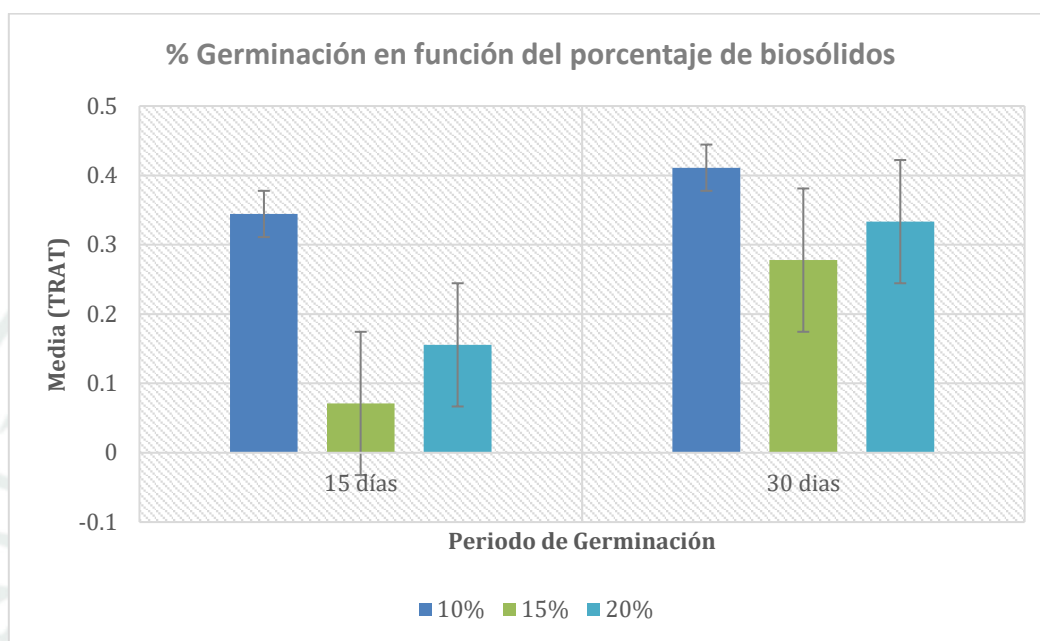
Diferencias de medidas con razón a la respuesta en el método de Fisher.



Este comportamiento sugiere que el efecto de la enmienda orgánica fue más relevante durante las primeras fases del proceso germinativo, cuando las semillas son más sensibles a las condiciones fisicoquímicas del sustrato. Sin embargo, una vez superada esta etapa crítica, las diferencias entre tratamientos disminuyeron progresivamente hasta desaparecer desde el punto de vista estadístico.

Figura 18.

Efecto del porcentaje de biosólido en la relación al % de la Germinación en un periodo de 15 y 30 días.



El análisis estadístico evidencia que, a los 15 días, el tratamiento de 10% de biosólido presenta el mayor porcentaje de germinación. Por el contrario, a los 30 días no se identifican diferencias significativas entre los tratamientos, lo que nos da a entender una respuesta homogénea en la germinación. Sin embargo, al integrar estos resultados con el análisis de la relación C/N, el tratamiento con 20% de biosólido mostró una ventaja adicional asociada con mayor estabilidad de la enmienda y un posible incremento en la capacidad de inmovilización del metal, aspecto relevante para los procesos de recuperación de suelos degradados con presencia de cromo.

Alcántara et al. (2015), evaluaron semillas de mostaza, zanahoria y lupino en sustratos de relaves mineros enmendados con biosólidos, sin contar diferencias significativas en la germinación entre los distintos tratamientos; no obstante, en el caso de la zanahoria se observó una germinación superior en los sustratos con mayor proporción de biosólidos, lo que evidencia

diferencias en los requerimientos nutricionales y en la tolerancia de cada especie frente a la enmienda.

De forma similar Vaughn et al. (2018), compararon biosólidos pirolizados y biosólidos de clase A en la germinación de *ryegrass perenne*, sin encontrar diferencias significativas en el porcentaje de emergencia, pero sí en el crecimiento longitudinal de los brotes, que fue mayor en los tratamientos con biosólidos de clase A, indicando que la germinación puede ser poco sensible a las variaciones del sustrato, mientras que las etapas posteriores de crecimiento si reflejan mejor las diferencias en calidad y tipo de enmienda.

Asimismo, Kamal et al. (2025) demostraron mediante análisis de varianza (ANOVA) que los suelos contaminados con metales pesados inducen respuestas diferenciadas de germinación entre tratamientos, lo que ayuda a explicar por qué en el presente estudio se obtuvieron porcentajes relativamente bajos y sin diferencias estadísticas a los 30 días, a pesar de la tendencia positiva en algunos tratamientos.

Por su parte, Awasthi et al. (2017) reportaron porcentajes de germinación de col china superiores al 50% en sustratos con biosólidos, destacando que enmiendas con 8% y 12% fueron más eficientes para incrementar los nutrientes orgánicos y la fertilidad del suelo; en particular, el 8% de biosólidos promovió un mejor crecimiento de la col china, lo que sugiere que dosis moderadas pueden ser más favorables para el desarrollo del cultivo, en concordancia con el desempeño observado en *Helianthus annuus* en este estudio a dosis intermedias de biosólidos.

Finalmente, la revisión científica de Emmanouil et al. (2024), mostró un cuadro comparativo de diferentes investigaciones en la cual la prueba de germinación de semillas era el indicador para sustratos compuestos por biosólidos, dichas investigaciones la mayoría mostró resultados sin efectos negativos sobre la emergencia de plantas, en cuanto al resultado más favorable mostró la investigación de Carraturo et al. (2024), el cual tuvo un índice de

germinación entre 120% a 80% de los valores con respecto al control. Esto nos hace interpretar que el compostaje biosólido favorece en la germinación de las plántulas, como se dio en la presente investigación. De manera similar, en el presente estudio la incorporación de biosólidos favoreció la germinación respecto al tratamiento control, evidenciando el potencial de esta enmienda para mejorar las condiciones iniciales del sustrato degradado.

Por otro lado, Cooper & DeMarco (2023) en su investigación reportaron incrementos en biomasa, humedad y el contenido de materia orgánica, así como una mayor capacidad de almacenamiento de carbono, y en consecuencia dio como resultado in mayor aumento de productividad de plantas y forraje. En conjunto, estas investigaciones demuestran la idoneidad del biosólido como enmienda orgánica, lo cual coincide con los resultados del presente estudio. No obstante, la variabilidad de los factores edáficos, ambientales y condiciones del entorno determina las diferencias observadas entre los distintos tratamientos.

De igual manera en la investigación de Pan et al. (2019b) la adición de la Poligorskita contribuyó en la mejora del proceso del compost de biosólido, favoreciendo la maduración del producto final. Este efecto se evidenció en los ensayos de germinación, los cuales 66 registraron porcentajes de germinación superiores al 80% en todos los tratamientos evaluados, lo que evidencia el gran potencial de mejora en las enmiendas provenientes de biosólidos.

En sustratos con biosólidos, se ha observado que algunas especies muestran incrementos marcados de biomasa y contenido foliar de N, P, K y otros nutrientes hasta alcanzar la meseta de crecimiento, mientras que otras reducen su desempeño cuando se superan ciertas dosis, aún bajo las mismas condiciones de mezcla y manejo (Garcés-Hernández et al., 2024).

En conjunto, la evidencia de la diferentes investigaciones y los resultados obtenidos en esta investigación indican que la aplicación de biosólidos constituye una alternativa viable para

mejorar la germinación y favorecer los procesos iniciales de establecimiento vegetal en suelos degradados. No obstante, la respuesta depende de la dosis aplicada y de las características fisicoquímicas del sustrato, siendo las concentraciones moderadas las que mostraron el comportamiento más favorable.





CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

PRIMERO: Las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de la muestra biosólidos obtenido de la PTAR “La Escalerilla”, cumplieron con los criterios establecidos en el Decreto Supremo N°015-2017-VIVIENDA para biosólidos de Clase A, evidenciando condiciones adecuadas de higienización y bajas concentraciones de microorganismos patógenos. Sin embargo, la relación C/N inicial fue de 4.26 indico una baja estabilidad de la materia orgánica, lo que limita su aplicación directa como enmienda, es por ello que fue necesario un proceso de valorización mediante compostaje.

SEGUNDO: El proceso de compostaje permitió mejorar significativamente la calidad del biosólido, incrementando la relación C/N desde un valor inicial de 4.26 hasta valores entre 11.64 y 14.63, además de obtener parámetros de pH, conductividad eléctrica y calidad microbiológica dentro de los rangos establecido por la NTP 201.208:2021. Entre los tratamientos evaluados, la enmienda elaborada con 20% de biosólido presentó los mejores resultados de estabilidad y madurez, alcanzando una relación de C/N en promedio de 13.70 y diferencias estadísticas significativas con respecto a los demás tratamientos.

TERCERO: La aplicación de la enmienda orgánica elaborada de biosólidos compostados demostró un potencial significativo para la recuperación de suelos degradados con cromo. El tratamiento con 20% de biosólido alcanzó la mayor eficiencia de remoción, reduciendo la concentración de cromo desde 335.95 ppm hasta 190.13 ppm, equivalente a una remoción del 43.40%, mientras que la remoción promedio fue de 28.45%. Estos resultados evidencian que la materia orgánica incorporada favoreció procesos de inmovilización y estabilización del metal, constituyendo una alternativa sostenible para la rehabilitación de suelos degradados.

CUARTO: La aplicación de enmiendas orgánicas elaboradas a partir de biosólidos favoreció la germinación de *Helianthus annuus* en el suelo degradado del PIRS. A los 15 días, el tratamiento con 10% de biosólido presentó el mayor porcentaje de germinación y diferencias significativas respecto a los demás tratamientos, evidenciando que dosis moderadas de enmienda generan condiciones favorables para la germinación de las plántulas. No obstante, a los 30 días no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, lo que indica que todos alcanzaron porcentajes de germinación similares.

5.2. RECOMENDACIONES

PRIMERO: Se recomienda que, previo al proceso de compostaje, los biosólidos recién obtenidos de la PTAR sean previamente homogeneizados, debido a que inicialmente se presentan en grandes formas de grumos de lodo, lo cual dificulta una mezcla uniforme con los demás materiales de compostaje. Durante las labores de aireación manual se observó que dichos grumos presentaban sequedad en su interior, por lo que esta etapa de homogeneización facilitará la aireación y evitará la necesidad de fragmentar los biosólidos durante el proceso de aireación, asegurando una mejor eficiencia del proceso.

SEGUNDO: Respecto a los tipos de secado de biosólido, se propone realizar de manera adicional un análisis comparativo entre los biosólidos provenientes del secado térmico y del secado natural, ya que existe la posibilidad de que presenten diferencias en la concentración de nutrientes y en la reducción de patógenos. Teniendo en cuenta que el biosólido sometido al secado térmico podría ofrecer mayor seguridad sanitaria debido a la menor presencia de microorganismos patógenos, mientras que el biosólido con secado natural podría conservar mayores nutrientes beneficiosos para el suelo.

TERCERO: En relación con la selección de semillas, se recomienda utilizar especies con capacidad de fitorremediación, de mayor tamaño y con mayor resistencia y adaptación a suelos

contaminados. Asimismo, se sugiere evitar el uso de semillas pequeñas, ya que podrían mostrar menor tolerancia a las condiciones del suelo tratado y presentar bajos porcentajes de germinación.

CUARTO: Se recomienda complementar futuras investigaciones con análisis de especiación química y biodisponibilidad del cromo, con el fin de diferenciar las formas químicas presentes en el suelo y comprender con mayor precisión los mecanismos de reducción, inmovilización y estabilización promovidos por la enmienda orgánica.

QUINTA: Como limitación del presente estudio, se identificó que el periodo de evaluación de la remediación del suelo fue de dos meses. Por ello, se recomienda realizar investigaciones a mediano y largo plazo que permitan determinar la estabilidad de la inmovilización del cromo y los efectos persistentes de la enmienda orgánica sobre las propiedades del suelo.



CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, A. H. M. de, Leles, P. S. dos S., Melo, L. A. de, Oliveira, R. R. de, & Ferreira, D. H. A. A. (2017a). CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL DE SUBSTRATOS FORMULADOS COM BIOSSÓLIDO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi. E *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. *Ciência Florestal*, 27, 1179-1190. <https://doi.org/https://doi.org/10.5902/1980509830300>
- Alcantara, H. J. P., Doronila, A. I., Nicolas, M., Ebbs, S. D., & Kolev, S. D. (2015). Growth of selected plant species in biosolids-amended mine tailings. *Minerals Engineering*, 80, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.06.012>
- Al-Lami, M. K., Oustriere, N., Gonzales, E., & Burken, J. G. (2022). Phytomanagement of Pb/Zn/Cu tailings using biosolids-biochar or -humus combinations: Enhancement of bioenergy crop production, substrate functionality, and ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 836, 155676. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155676>
- Amorim Junior, S. S., Hwa Mazucato, V. S., Machado, B. dos S., de Oliveira Guilherme, D., Brito da Costa, R., & Correa Magalhães Filho, F. J. (2021). Agronomic potential of biosolids for a sustainable sanitation management in Brazil: Nutrient recycling, pathogens and micropollutants. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125708. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125708>
- Apaza, A., & Quirita, J. (2020). “Efectos del biosólido de la PTAR la Escalerilla como abono en el cultivo de plantones de Mioporo (*Myoporum laetum*)- Arequipa 2019 [Universidad Tecnológica del Perú]. https://repositorio.utp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12867/3801/Adela%20Apaza_Julio%20Quirita_Tesis_Titulo%20Profesional_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Asemaninejad, A., Langley, S., Mackinnon, T., Spiers, G., Beckett, P., Mykytczuk, N., & Basiliko, N. (2021). Blended municipal compost and biosolids materials for mine reclamation: Long-term field studies to explore metal mobility, soil fertility and microbial communities. *Science of The Total Environment*, 760, 143393. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143393>
- Awasthi, M. K., Wang, Q., Chen, H., Wang, M., Ren, X., Zhao, J., Li, J., Guo, D., Li, D., Awasthi, S. K., Sun, X., & Zhang, Z. (2017). Evaluation of biochar amended biosolids co-composting to improve the nutrient transformation and its correlation as a function for the production of nutrient-rich compost. *Bioresource Technology*, 237, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.044>
- Badzmierowski, M. J., Evanylo, G. K., & Ervin, E. H. (2020). *Biosolids amendments improve an anthropogenically disturbed urban turfgrass system-Web of Science Core Collection*. <https://ezproxy.ucsm.edu.pe:2137/wos/woscc/full-record/WOS:000543747600040>

- Baird, R., Eaton, A., & Rice, E. (2015). *Standard Methods for Water and Wastewater Analysis: 23rd Edition*.
<https://manuals.plus/m/97b3080ecbeb3a938c616cef5503bbcfa6ed687443f686d3eb488f3e95d48ac1>
- Barreto A, K., Cunha Coelho, F., Freitas, S., Golçalves da Rocha, J., & Pixoline, E. (2024). *Maximizing agricultural sustainability: Determining the optimal biosolid dose for germination and initial growth of maize and cowpea*. 10.18605/2175-7275/cereus.v16n2p352-366
- Bazrafshan, E., Zarei, A., Mostafapour, F. K., Poormollae, N., Mahmoodi, S., & Zazouli, M. A. (2015). *Maturity and Stability Evaluation of Composted Municipal Solid Wastes* (Research Article No. 5; Número 1, p. e20165). Health Scope.
<https://doi.org/10.17795/jhealthscope-33202>
- Buta, M., Hubeny, J., Zieliński, W., Harnisz, M., & Korzeniewska, E. (2021). Sewage sludge in agriculture – the effects of selected chemical pollutants and emerging genetic resistance determinants on the quality of soil and crops – a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 214, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112070>
- Camacho, A., Abellán, J., Palacios, J. C., & López Dolores. (2009). *Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España*. 140.
- Candela, G. (2020). *Propuestas de Estabilización y Aprovechamiento de Lodos de Ptar y Bes En Perú Basadas en su Caracterización Fisicoquímica y Microbiológica*. [Universidad Nacional Agraria La Molina].
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/4422/candela-levano-gianella-milagros.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cano, A., Castellnou, R., Pastor, E., Subirats, J., Matamoros, V., & Uggetti, E. (2024). Optimizing the final rest period of sludge treatment wetlands: Assessment of biosolids quality. *Journal of Environmental Management*, 370, 122716.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122716>
- Carraturo, F., Siciliano, A., Giordano, A., Di Capua, F., Barone, F., Casaletta, E., Cicotti, F., Guida, M., & Adani, F. (2024). Ecotoxicological assessment of waste-derived organic fertilizers and long-term monitoring of fertilized soils using a multi-matrix and multi-species approach. *Science of The Total Environment*, 912, 169341.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169341>
- Castellanos, P. M. A., García, B. P., Cuéllar, L. Á., & Pita, M. D. (2019). Análisis de variables físicas y microbiológicas en el proceso de compostaje de biosólidos en pilas menores a un metro cúbico. *Cuaderno activa*, 11, 23-32. <https://doi.org/10.53995/20278101.576>
- CEPES. (2015). Los suelos en el Perú. *La Revista Agraria - CEPES*. ¿Necesitamos ampliar la frontera agrícola? <https://larevistaagrariaperu.org/2015-2/>

- César Valdez, E., & Vazquez, A. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/ingenieria_de_los_sistemas_de_tratamiento_y_disposicion_de_aguas_residuales_civilgeeks.pdf
- Chávez, Á. (2008). DESCRIPCIÓN DE LA NOCIVIDAD DEL CROMO PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA CURTIEMBRE Y DE LAS POSIBLES FORMAS DE REMOVERLO. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 9(17).
- Chávez, L., & Alpaca, Y. (2014). "ACCIÓN COAGULANTE – FLOCULANTE DEL CLORURO FÉRRICO Y EL POLÍMERO ANIÓNICO FLOERGER AN 910, EN EL TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA RESIDUAL DE LA LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN DEL PARQUE INDUSTRIAL RÍO SECO (PIRS)". repositorio. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5a684349-b5e8-4eb2-abd1-372562cc9ac6/content>
- Chipana, J. (2022). "Caracterización y Evaluación de los Lodos Residuales provenientes de La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Escalerilla, para su reaprovechamiento en la Agricultura ". [Universidad Nacional de San Agustín]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/62c4d3a4-9d4e-4ae8-9e8d-b387cb180b8c/content>
- Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abbà, A., & Carnevale Miino, M. (2019). Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, 238, 117844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117844>
- Conesa, H. M., & Párraga-Aguado, I. (2022). Effects on metal availability of the application of tree biochar and municipal waste biosolid in a metalliferous mine tailings substrate. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(4), 1317-1327. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00967-2>
- Cooper, A., & DeMarco, J. (2023). Composted biosolids amendments for enhanced soil organic carbon and water storage in perennial pastures in Colorado. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 347, 108401. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108401>.
- Cuberos, E., Rodriguez, A. I., & Prieto, E. (2009). Niveles de Cromo y Alteraciones de Salud en una Población Expuesta a las Actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 11(2), 278-289. <https://doi.org/10.1590/S0124-00642009000200012>
- Cuéllar, I. C. C., Cabra, J. R. V., Curbelo, M. Á. G., Martínez, D. A. V., & Valencia, E. R. (2018). APLICACIONES Y GENERALIDADES DE UN ESPECTROFOTÓMETRO DE ABSORCIÓN ATÓMICA AA-700 DE SHIMADZU.
- Cuti C., V. G., & Vargas G., Y. R. (2023). *Tratamiento de Residuos Orgánicos (Plumas) Generados en Centros de Faenamiento Avícola A Partir de Compostaje Optimizado*

- con Bacterias Queratinolíticas, Arequipa 2020*. [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12581>
- Decreto Legislativo N° 1280, Legislation No. 1280 (2016). <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-legislativo-n-1280/>
- Decreto Legislativo N° 1501 (2020). <http://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1866220-2>
- Decreto Legislativo N°1278, Legislation No. 1278, LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (2016). https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/dl_1278.pdf
- Decreto Supremo N°014-2017-MINAM (2017).
- Decreto Supremo N° 015-2017-VIVIENDA, 9 (2017).
- Docampo, R. (2013). *COMPOSTAJE Y COMPOST*. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-06/128221231213112259.pdf>
- Dueñas, A., Huarachi, R., Yapó, U., Apfata, P., & González, R. (2014). Bioacumulación de arsénico en *Chlorella Vulgaris* (Chlorophyta: Chlorellaceae) en efluente de Parque Industrial Río Seco (PIRS) y toxicidad aguda sobre *Daphnia Magna* (Crustacea: Daphniidae), Arequipa, Perú. *The Biologist*, 12(1), 9-22.
- Eche, J. J. E., & Cruz, E. G. S. de la. (2021). Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), 205-215. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21773>
- Elgarahy, A. M., Eloffy, M. G., Priya, A. K., Yogeshwaran, V., Yang, Z., Elwakeel, K. Z., & Lopez-Maldonado, E. A. (2024). Biosolids management and utilizations: A review. *Journal of Cleaner Production*, 451, 141974. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141974>
- El-mrini, S., Aboutayeb, R., & Zouhri, A. (2022). *Effect of initial C/N ratio and turning frequency on quality of final compost of turkey manure and olive pomace* | *Journal of Engineering and Applied Science* | Springer Nature Link. <https://link.springer.com/article/10.1186/s44147-022-00092-6>
- Emmanouil, C., Giannakis, I., & Kyzas, G. Z. (2024). Terrestrial bioassays for assessing the biochemical and toxicological impact of biosolids application derived from wastewater treatment plants. *Science of The Total Environment*, 931, 172718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172718>
- Epelde, L., Jauregi, L., Urra, J., Ibarretxe, L., Romo, J., Goikoetxea, I., & Garbisu, C. (2018). Characterization of Composted Organic Amendments for Agricultural Use. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00044>

- FAO. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo: Resumen Técnico*. FAO. <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/358197/>
- Farias, D., Ballesteros, M., & Bendeck, M. (1999). *Variación de Parámetros Fisicoquímicos durante un Proceso de Compostaje*. (Rev. Colomb. Quím, Vol. 28). <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/17259>
- Fijalkowski, K. L., & Kwarciak-Kozłowska, A. (2020). Phytotoxicity assay to assess sewage sludge phytoremediation rate using guaiacol peroxidase activity (GPX): A comparison of four growth substrates. *Journal of Environmental Management*, 263, 110413. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110413>
- Frąckowiak, E., Płatek-Mielczarek, A., Piwek, J., & Fic, K. (2022). Advanced characterization techniques for electrochemical capacitors. En *Advances in Inorganic Chemistry* (Vol. 79, pp. 151-207). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.adioch.2021.12.006>
- Gamarra L., C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortiz, M., Galeano, M. del P., Cabrera Cardús, A. J. N., Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortiz, M., Galeano, M. del P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 4-26. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i46.134>
- Garcés-Hernández, C., Robinson, B., Bravo-Linares, C., Lowe, H., Villanueva, S., Prosser, J., & Gutiérrez-Ginés, M.-J. (2024). An Assessment of the Suitability of Contrasting Biosolids for Raising Indigenous Plants in Nurseries. *Water*, 16(9), 1226. <https://doi.org/10.3390/w16091226>
- García, F. (2016). *INFORMEN°0238-2016-OEFA/DE-SDCA*. Informe_238-2016-OEFA-DE-SDCA.pdf
- Gomez, D. (2011). *VALIDACION DE LA METODOLOGIA POR EL METODO ESTANDAR 3111^a – ABSORCION ATOMICA PARA EL ANALISIS DE METALES PESADOS EN MUESTRAS DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES*.
- Gonzaga, M. I. S., Matias, M. I. de A. S., Andrade, K. R., Jesus, A. N. de, Cunha, G. da C., Andrade, R. S. de, & Santos, J. C. de J. (2020). Aged biochar changed copper availability and distribution among soil fractions and influenced corn seed germination in a copper-contaminated soil. *Chemosphere*, 240, 124828. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124828>
- Guacaneme, S., & Barrera-Cataño, J. I. (2007). Efecto de la aplicación de biosólidos, como enmienda orgánica, en la recuperación de un suelo disturbado por actividad extractiva en la cantera de soratama, localidad de Usaqué, Bogotá. *Pontificia Universidad Javeriana Colombia*, 12, 85-98.
- Guo, J., Ma, F., Qu, Y., Li, A., & Wang, L. (2012). Systematical strategies for wastewater treatment and the generated wastes and greenhouse gases in China. *Frontiers of*

Environmental Science & Engineering, 6(2), 271-279. <https://doi.org/10.1007/s11783-011-0328-0>

- Guo, Q., Yu, D., Yang, J., Zhao, T., Yu, D., Li, L., & Wang, D. (2024). A novel sequential extraction method for the measurement of Cr(VI) and Cr(III) species distribution in soil: New insights into the chromium speciation. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135864. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135864>
- IAEA. (2019, julio 29). *Alianza Mundial por el Suelo (GSP)* [Text]. IAEA. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/es/el-oiea/alianza-mundial-por-el-suelo-gsp>
- INACAL. (2022). *Inacal aprobó Norma Técnica sobre los requisitos del compost elaborado a partir de residuos sólidos orgánicos municipales*. <https://www.gob.pe/institucion/inacal/noticias/616950-inacal-aprobo-norma-tecnica-sobre-los-requisitos-del-compost-elaborado-a-partir-de-residuos-solidos-organicos-municipales>
- Ippolito, J. A., Barbarick, K. A., & Brobst, R. B. (2010). Infrequent composted biosolids applications affect semi-arid grassland soils and vegetation. *Journal of Environmental Management*, 91(5), 1123-1130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.004>
- ISO 19698:2020 - Biosolids Land Application Standard for Safe Use (2020). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/af6c286e-db36-4c8b-aa18-211d71b79920/iso-19698-2020>
- Jakubus, M. (2020). A Comparative Study of Composts Prepared from Various Organic Wastes Based on Biological and Chemical Parameters. *Agronomy*, 10(6), 869. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060869>
- Ji, Z., Zhang, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Z. (2023). Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 886, 163929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163929>
- Jiang, J., Wang, Y., Yu, D., Li, J., Han, J., Cui, H., Cheng, R., Yao, X., Yan, G., Li, Y., & Zhu, G. (2021). Effects of urease inhibitors on enzymatic activities and fungal communities during the biosolids composting. *RSC Advances*, 11(60), 37667-37676. <https://doi.org/10.1039/D1RA07628K>
- Kacprzak, M., Grobelak, A., Grosser, A., & Napora, A. (2014). The potential of biosolid application for the phytostabilisation of metals. *Desalination and Water Treatment*, 52(19-21), 3955-3964. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.887492>
- Kamal, G., Cossu, M., Garau, G., Garau, M., & Melito, S. (2025). Germination and seedling development of selected Mediterranean aromatic plants in heavy metal contaminated soils: A preliminary study for the recovery of mining sites in Sardinia. *Italian Journal of Agronomy*, 20(2), 100041. <https://doi.org/10.1016/j.ijagro.2025.100041>

- Kanteraki, A. E., Isari, E. A., Zafeiropoulos, I., Cangemi, S., Bountla, A., & Kalavrouziotis, I. K. (2024). Structural analysis and characterization of biosolids. A case study of biosolids from wastewater treatment plants in Western Greece. *Science of The Total Environment*, 908, 168425. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168425>
- Keeling, A. A., Paton, I. K., & Mullett, J. A. J. (1994). Germination and growth of plants in media containing unstable refuse-derived compost. *Soil Biology and Biochemistry*, 26(6), 767-772. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(94\)90271-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)90271-2)
- Kotaś, J., & Stasicka, Z. (2000). *Presencia de cromo en el medio ambiente y métodos de su especiación—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749199001682>
- Kumar, M., Singh, E., Binod, P., Sindhu, R., Sarsaiya, S., Kumar, A., Chen, H., Duan, Y., Pandey, A., Kumar, S., Taherzadeh, M., Li, J., & Zhang, Z. (2022). Biotechnological strategies for bio-transforming biosolid into resources toward circular bio-economy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111987. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111987>
- Kumar, S., Liu, T., Kumar, M., & Zhang, Z. (2020). Evaluation of biochar amendment on heavy metal resistant bacteria abundance in biosolids compost. *Bioresource Technology*, 306, 123114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123114>
- Le, Q., & Price, G. W. (2024). A review of the influence of heat drying, alkaline treatment, and composting on biosolids characteristics and their impacts on nitrogen dynamics in biosolids-amended soils. *Waste Management*, 176, 85-104. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.019>
- Li, R., Xu, K., Ali, A., Deng, H., Cai, H., Wang, Q., Pan, J., Chang, C.-C., Liu, H., & Zhang, Z. (2020). Sulfur-aided composting facilitates ammonia release mitigation, endocrine disrupting chemicals degradation and biosolids stabilization. *Bioresource Technology*, 312, 123653. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123653>
- Liang, C., Gascó, G., Fu, S., Méndez, A., & Paz-Ferreiro, J. (2016). Biochar from pruning residues as a soil amendment: Effects of pyrolysis temperature and particle size. *Soil and Tillage Research, Current and future challenges in biochar research*, 164, 3-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.002>
- Liu, Y., Ptacek, C. J., Beauchemin, S., Mackinnon, T., & Blowes, D. W. (2022). Effect of composting and amendment with biochar and woodchips on the fate and leachability of pharmaceuticals in biosolids destined for land application. *Science of The Total Environment*, 810, 151193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151193>
- Lu, T., Li, J., Wang, X., Ma, Y., Arde, E., & Zhua, N. (2016). Derivation of ecological criteria for copper in land-applied biosolids and biosolid-amended agricultural soils. *Journal of Environmental Management*, 183, 945-951. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.052>

- Medina Arias, C. A. (2023). *Evaluación de la exposición y ecotoxicidad en suelos contaminados por efluentes de curtiembres en la zona de Rio Seco—Arequipa utilizando el bioensayo de ecotoxicidad con Eisenia Foetida* [Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/12389>
- Melo, T. M., Bottlinger, M., Schulz, E., Leandro, W. M., Botelho de Oliveira, S., Menezes de Aguiar Filho, A., El-Naggar, A., Bolan, N., Wang, H., Ok, Y. S., & Rinklebe, J. (2019). Management of biosolids-derived hydrochar (Sewchar): Effect on plant germination, and farmers' acceptance. *Journal of Environmental Management*, 237, 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.042>
- Mendoza, M. (2012). *Propuesta de Compostaje de los Residuos Vegetales Generados En La Universidad De Piura* [Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial y de Sistemas, Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/a51a4b7d-2638-42d9-903c-bf853d94cc4a/content>
- MINAM. (2020). *Hacia una tierra equilibrada y un Perú sostenible*. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/702051-hacia-una-tierra-equilibrada-y-un-peru-sostenible>
- Moreno, J., & Moral, R. (2008). *Compostaje*. Mundi-Prensa Libros.
- Morgan, B. S. T., Tian, G., Oladeji, O. O., Cox, A. E., Granato, T. C., Zhang, H., & Podczewinski, E. W. (2024). Analysis of effects and factors linked to soil microbial populations and nitrogen cycling under long-term biosolids application. *Science of The Total Environment*, 934, 173216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173216>
- Mossa, A.-W., Bailey, E. H., Usman, A., Young, S. D., & Crout, N. M. J. (2020). The impact of long-term biosolids application (>100 years) on soil metal dynamics. *Science of The Total Environment*, 720, 137441. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137441>
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/cb30a4de-7d87-4e79-8e7a-ad5279038718/content>
- N.J.S.A., N. (2011). *Sludge Quality Assurance*. https://dep.nj.gov/wp-content/uploads/rules/rules/njac7_14c.pdf
- Noriega, V. (2011). *Cadena agroproductiva de papa Manejo y Fertilidad de Suelos* (MINISTERIO DE AGRICULTURA). <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/627/1/Guia%20de%20orientaci%3b3n%20Fertilidad%20de%20Suelos%2011.pdf>
- Oarga Mulec, A., Mihelič, R., Walochnik, J., & Griessler Bulc, T. (2016). Composting of the solid fraction of blackwater from a separation system with vacuum toilets – Effects on

- the process and quality. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4683-4690. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.080>
- Office Of Water. (1999). *POW Sludge Sampling And Analysis Guidance Document*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/potw-sludge-sampling-guidance-document.pdf>
- Onchoke, K., Fateru, O. O., Friedfeld, R. B., & Weatherford, P. (2022). *Evaluation and analysis of perlite and municipal wastewater sludge (biosolids) from three wastewater treatment plants in East Texas, USA | Environmental Monitoring and Assessment | Springer Nature Link*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-09794-z>
- Ordenanza-Municipal-N°-381-2015-MDCC (2015). <https://www.mdcc.gob.pe/wp-content/uploads/2016/08/Ordenanza-Municipal-N%C2%B0-381-2015-MDCC.pdf>
- Ortiz, M. L., Gutiérrez, M. E., & Sanchez, E. (1995). Propuesta de Manejo de los Lodos Residuales de La Planta de Tratamiento de La Ciudad Industrial del Valle'de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 11(2), Article 2.
- Pallo, E., & Guangatal, C. (2022). *Evaluación de sustratos orgánicos para la producción de plántulas de brócoli (Brassica oleracea Var. Itálica)* [bachelorThesis]. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/36439>
- Pan, J., Li, R., Zhai, L., Zhang, Z., Ma, J., & Liu, H. (2019a). Influence of palygorskite addition on biosolids composting process enhancement. *Journal of Cleaner Production*, 217, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.227>
- Pan, J., Li, R., Zhai, L., Zhang, Z., Ma, J., & Liu, H. (2019b). Influence of palygorskite addition on biosolids composting process enhancement. *Journal of Cleaner Production*, 217, 371-379. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.227>
- Part 503 - Standards For The Use Or Disposal Of Sewage Sludge, Legislation Nos. 100-4 (1993). <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-503>
- Perez, M. (2016). *Tratamiento de Lodos Residuales Procedentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Mediante Procesos Electroquímicos para La Disminución De Metales Pesados (Pb)*. [Obtención de Título, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12045/1/UPS-CT005868.pdf>
- Pineda, J. (2019). *Evaluación del Potencial de Fitorremediación de Isolepis Cernua y Nasturtium Aquaticum para El Tratamiento Secundario de Efluentes de Curtiembre Del Parque Industrial Rio Seco – Arequipa*. Universidad Nacional de San Agustín.
- Prieto, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). *Circular economy: Relationship with the evolution of the concept of sustainability and strategies for its implementation*. 11.
- Proto, M., & Courtney, R. (2023). Application of organic wastes to subsoil materials can provide sustained soil quality in engineered soil covers for mine tailings rehabilitation:

- A 7 years study. *Ecological Engineering*, 192, 106971. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106971>
- Qu, B., Hu, B., Rong, R., Wu, L., Shi, X., Ma, Z. F., Yuan, L., Goodacre, R., Jordan, K. P., & Chen, Y. (2025). Regional concentrations of heavy metals in surface soils and risk of body pain in elderly residential population: A national cohort study in China. *BMC Public Health*, 25(1), 1571. <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22638-y>
- Raj, D., & Antil, R. S. (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from agro-industrial wastes. *Bioresource Technology*, 102(3), 2868-2873. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.077>
- Reid, C. J., Farrell, M., & Kirby, J. K. (2025). *Microbial communities in biosolids-amended soils: A critical review of high-throughput sequencing approaches—ScienceDirect*. Journal of Environmental Management. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479725001793#bib1>
- Röben, E. (2002). *Manual de Compostaje Para Municipios*. <http://www.bionica.info/Biblioteca/Roben2002MauaCompostaje.pdf>
- Rodríguez-Berbel, N., Fox, A., Ortega, R., Schlöter, M., Schulz, S., & Miralles, I. (2025). Restoring soil quality in semi-arid mining-degraded soils: Effects of different combinations of organic amendments on microbial nutrient cycling after 40 months of application. *Journal of Environmental Management*, 378, 124733. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124733>
- Román, P., Martínez, M. M., & Pantoja, A. (2013). *MANUAL DE COMPOSTAJE DEL AGRICULTOR Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Oficina Regional para América Latina y el Caribe. <https://www.fao.org/4/i3388s/i3388s.pdf>
- Roque R., F., Prado, D., & Ruiz de Somocurcio, F. (2016). *Biodepuración de aguas residuales industriales contaminadas con cromo (III) y (VI) utilizando microflora nativa aislada y caracterizada provenientes del Parque Industrial Río Seco (PISRS) de la ciudad de Arequipa*. <http://repositoriodigital.minam.gob.pe/xmlui/handle/123456789/530>
- Rosas-Martínez, V., Rodríguez-Lagunes, D. A., Llaena-Hernández, R. C., Milanés-Ramos, N., Rico-Contreras, J. O., & Castañeda-Castro, O. (2021). EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE COMPOSTA DE RESIDUOS AVÍCOLAS Y CACHAZA. *Agrociencia*, 55(4), 291. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i4.2478>
- Ruiz, G. P. (2016). *Estudio Físicoquímico del Suelo del Sistema de Andenería Del Centro Poblado Caca, Provincia de Yauyos, Lima*. [Pontificia Universidad Católica del Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7010/RUIZ_OLORTINO_GEAN_PIERRE_ESTUDIO_FISICO_QUIMICO_SUELO_YAUYOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Coosemans, J., Deprins, K., & Swings, J. (2003). *Microbiological aspects of biowaste during composting in a monitored compost bin*. 94(127-137). <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.01800.x>
- Saffari, S., Boyer, J., Ronin, D., Blanco, J. R., Hapeman, C. J., Jackson, D., Kaya, D., & Torrentes, A. (2023). Use of organic amendments derived from biosolids for groundwater remediation of TCE. *Chemosphere*, 323, 138059. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138059>
- Salgado, L., Gallego, J. L., Caballero, R., Larramona, M., Afif, E., Herias, M., Lara, R., Menéndez, J. M., & Forján, R. (2025). *From waste to solution: Valorisation of a dolomite by-product for degraded soil rehabilitation—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479725037715?via%3Dihub>
- Sathya, T. A., Alarjani, K. M., Elshikh, M. S., Flanetraj, S. R., & Ponnuswamy, V. (2025). Co-composting of green leaves and kitchen waste: Characterization of organic amendments, microbial activity and analysis of defence enzymes in plants. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 15(17), 24331-24342. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05608-z>
- SEDAPAR. (2018). *Diagnostico Hidrico Rápido, Departamento de Control de Calidad y Efluentes*. <https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2020/09/Diagnostico-Hidrico-Rapido.pdf>
- Shea, E., Wang, Z., Allison, B., & Simmons, C. (2021). Alleviating phytotoxicity of soils biosolarized with almond processing residues. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101662. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101662>
- Shrestha, P., Bellitürk, K., & Görres, J. H. (2019). Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soil by Switchgrass: A Comparative Study Utilizing Different Composts and Coir Fiber on Pollution Remediation, Plant Productivity, and Nutrient Leaching. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7), 1261. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071261>
- Singh, R. P., & Agrawal, M. (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28(2), 347-358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Singh, R. P., & Agrawal, M. (2010). Efecto de diferentes aplicaciones de lodos de depuradora en el crecimiento y rendimiento del cultivo de *Vigna radiata L.*: Absorción de metales por la planta. *Ecological Engineering*, 36(7), 969-972. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.03.008>
- Singh, S. N., Kulshreshtha, K., & Ahmad, K. J. (1997). Impacto de la enmienda del suelo con cenizas volantes en la germinación de semillas, el crecimiento de plántulas y la composición de metales de *Vicia faba L.* *Ecological Engineering*, 9(3), 203-208. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)10004-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)10004-0)

- Solis, C. (2020). *ESTRATEGIAS BASADAS EN PRODUCCIÓN MÁS LIMPIA y BIORREMEDIACIÓN PARA MITIGAR LOS IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS GENERADOS POR LOS EFLUENTES INDUSTRIALES DE LAS CURTIEMBRES DEL PARQUE INDUSTRIAL DE RÍO SECO, AREQUIPA* [UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1f73fdb1-a5d9-4652-b6d9-cf8a94af462a/content>
- Soria, R., Ortega, R., Bastida, F., & Miralles, I. (2021). Role of organic amendment application on soil quality, functionality and greenhouse emission in a limestone quarry from semiarid ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 164, 103925. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103925>
- Souahi, H., Ghieb, R., & Taib, N. (2025). Las enmiendas orgánicas mejoraron el crecimiento del trigo en suelos contaminados con Cadmio. *Boletín de Contaminación Ambiental y Toxicología*. <https://doi.org/10.1007/s00128-025-04177-9>
- Steppas, C., Giannakis, I., Golia, E. E., Papadimou, S. G., Manakou, V., Emmanouil, C., Lagopodi, A., & Kungolos, A. (2025). Assessment of biosolids produced in Northern Greece applied to agricultural soils as phytoprotective agents. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 47, 102111. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.102111>
- SUNASS. (2021). *Servicio de Agua Potable y Alcantarrillado de Arequipa S.A. (SEDAPAR S.A.)*. https://www.sunass.gob.pe/wp-content/uploads/2021/06/PET-SEDAPAR_CD-1.pdf
- Tellez, J., Carvajal, R., & Gaitan, A. (2004). *ASPECTOS TOXICOLÓGICOS RELACIONADOS CON LA UTILIZACIÓN DEL CROMO EN EL PROCESO PRODUCTIVO DE CURTIEMBRES*. Rev Fac Med Univ Nac Colomb.
- Terrádez, M. (2003). *ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA)*.
- UNESCO. (2020). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2020: Agua y cambio climático*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373611.locale=es>
- United Nations. (2021). *Healthy land is central to the wellbeing of the planet's ecosystems and biodiversity; it feeds us, shelters us, and provides the backbone to a thriving global economy*. UNCCD. <https://www.unccd.int/convention/overview>
- US EPA. (2025). *Global Non-CO2 Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation Potential: 2020-2080* [Reports and Assessments]. <https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases/global-non-co2-greenhouse-gas-emission-projections-0>
- Van Herwijnen, r., Laverie, T., Ouki, S. K., Al-Tabba, A., Hodson, M. E., & Hutchings, T. R. (2006). The effect of composts on the leaching of metals from contaminated soils-Web of Science Core Collection. *Brebbia CA*, 94, 99+. <https://doi.org/10.2495/BF060101>

- Vaughn, S. F., Dinelli, F. D., Kenar, J. A., Jackson, M. A., Thomas, A. J., & Peterson, S. C. (2018). Physical and chemical properties of pyrolyzed biosolids for utilization in sand-based turfgrass rootzones. *Waste Management*, 76, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.009>
- Venegas, M., Leiva, A., Bay-Schmith, E., Silva, J., & Vidal. (2019). *Fitotoxicidad de los biosólidos para su aplicación en el suelo: Influencia de la digestión anaeróbica convencional y avanzada con pretratamiento secuencial—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186419301440?via%3Dihub>
- Vilca, F. & Gordillo, Y. B. (2016). *Retención de metales pesados en suelos y su impacto ambiental. Caso: Aguas residuales – parque industrial Río Seco* [Universidad Nacional de San Agustín]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3276>
- Wang, D., Felice, M. L., & Scow, K. M. (2020). Impacts and interactions of biochar and biosolids on agricultural soil microbial communities during dry and wet-dry cycles. *Applied Soil Ecology*, 152, 103570. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103570>
- Wen, Y., Xiao, J., Goodman, B. A., & He, X. (2019). Effects of Organic Amendments on the Transformation of Fe (Oxyhydr)Oxides and Soil Organic Carbon Storage. *Frontiers in Earth Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00257>
- Wilson, B. S. (2019). *El proceso de compostaje*. Universidad de la Salle.
- Xiong, R., Gao, X., Tu, X., Mao, Y., Jiang, L., Zheng, L., & Du, Y. (2022). *Heavy Metal Remediation in Sludge Compost: Recent Progress-Web of Science Core Collection*. 10, 469-486. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017226>
- Xue, J., Verstraete, W., Ni, B.-J., Giesy, J. P., Kaur, G., Jiang, D., McBean, E., Li, Z., Shin, H.-M., Xiao, F., Liu, Y., Liu, J., Chibwe, L., Wai Ng, K. T., & Uchida, Y. (2025). Rethink biosolids: Risks and opportunities in the circular economy. *Chemical Engineering Journal*, 510, 161749. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161749>
- Yang, Z., Zhang, X., Jiang, Z., Li, Q., & Huang, P. (2021). *Reductive materials for remediation of hexavalent chromium contaminated soil – A review—ScienceDirect*. Science of The Total Environment. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721007221?via%3Dihub>
- Yoshida, H., Nielsen, M. P., Scheutz, C., Jensen, L. S., Christensen, T. H., Nielsen, S., & Bruun, S. (2015). Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*. (world). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09064710.2015.1027730>

ANEXOS

Anexo 1. Acreditación de BHIOS LABORATORIO S.R.L.



DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN

1 de 9

ALCANCE DE LA ACREDITACIÓN DE LABORATORIOS DE ENSAYO

BHIOS LABORATORIOS S.R.L.

Ubicado en : Av. Quiñones B-6 (2do. Piso) – Yanahuara - Arequipa
Proceso : Reducción¹
Expediente N° : 00006-2025-DA-E
Informe Ejecutivo N° : 38-2025-DA
Vigencia de la Acreditación : Del 2022-02-16 al 2026-02-15
Acreditado con la Norma : NTP-ISO/IEC 17025:2017
Código de Registro : LE – 055
Fecha de Actualización : 2025-07-31

Laboratorio : LABORATORIO DE FÍSICOQUÍMICA
Campo de Prueba : FÍSICAS Y QUÍMICAS (Incluye MUESTREO)

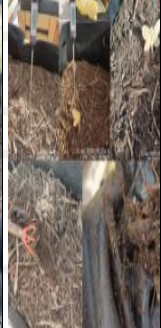
N°	Tipo Ensayo	Norma Referencia	Año	Título
1	ACEITES Y GRASAS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5520 B, 24th Ed.	2023	OIL AND GREASE. Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method
Producto(s):				AGUA NATURAL
				AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
				AGUA RESIDUAL
2	CENIZA	AOAC 942.05, Subchapter 1, 22nd Ed., (Rev. Online 2008)	2023	Ash of Animal Feed
Producto(s):				ALIMENTO BALANCEADO PARA ANIMALES
3	CENIZA	NTP 205.004:2022	2022	CEREALES Y LEGUMINOSAS. Determinación de cenizas
Producto(s):				CEREALES Y MENESTRAS
4	CONDUCTIVIDAD	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510-B, Pág. 1-4, 24th Ed.	2023	Conductivity. Laboratory Method
Producto(s):				AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO
				AGUAS NATURALES
				AGUAS RESIDUALES

¹ Es responsabilidad del laboratorio la revisión del presente alcance. En caso existan observaciones a dicho alcance, el laboratorio deberá informarlo al INACAL, con el debido sustento, en un plazo no mayor a 05 días útiles (contados a partir de recibido el presente documento), cumplido este plazo no se aceptarán observaciones.

Formato: DA-acr-06P-21F Ver. 00

Anexo 2 . Tabla de Control de Seguimiento.

PLANTILLA DE CONTROL DE PROCESO												
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12
TEMPERATURA												
Ref de temperatura	15° - 40°		40° - 65°			15° - 40°					Temperatura ambiente	
M 10% - A	19.3	28	25	23	27	26	33	36	23	24	23	23
M10% - B	19.05	35	23	24	27	29	33	36	24	24	23	24
M10% - AB	18.55	31	22	23	27	27	34	36	23	27	25	26
M 15% - A	18	32	21	23	26	29	33	35	23	26	24	22
M15% - B	18.9	32	22	25	28	24	34	36	25	25	25	24
M15% - AB	18.95	30	22	24	29	24	33	35	24	28	26	25
M20% - A	17.95	28	22	22	24	28	31	34	22	24	25	25
M20% - B	18.3	31	21	23	26	26	31	33	23	25	25	25
M20% - AB	18.2	32	22	23	27	24	35	36	23	27	25	23
pH												
Ref de pH	4 - 6		8 - 9			7 - 8					6 - 8	
M 10% - A	6	6	9	7	6	7	7	7	7	7	6	7
M10% - B	6	6	9	8	7	6	7	6	6	7	7	7
M10% - AB	6	6	8	8	7	7	7	7	7	7	6	7
M 15% - A	6	6	9	9	7	6	7	6	6	7	6	7
M15% - B	6	6	9	9	8	7	7	7	7	6	7	7
M15% - AB	6	6	9	9	7	7	7	7	7	7	6	7
M20% - A	6	6	9	8	7	6	7	7	6	7	6	7
M20% - B	6	6	9	9	8	6	7	7	6	7	7	7

M20% - AB	6	6	9	9	8	6	7	7	6	7	6	7
HUMEDAD												
Ref de humedad	Variable dependiendo de la humedad de entrada, entre 30% - 60%											
M 10% - A	30			62								
M10% - B	30			68								
M10% - AB	30			50								
M 15% - A	30			54								
M15% - B	30			57								
M15% - AB	30			45								
M20% - A	30			47								
M20% - B	30			58								
M20% - AB	30			57								
Aspecto												
Ref aspecto visual	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	Semana 12
M 10% - A												
M10% - B												
M10% - AB												
M 15% - A												
M15% - B												
M15% - AB												
M20% - A												
M20% - B												
M20% - AB												

Anexo 3. Resultados de laboratorio de la muestra de biosólido.



INFORME DE ENSAYOS Nº 2024- 2024 PÁGINA 2 DE 4

RESULTADOS

LAB	DETERMINACIÓN	BIOSÓLIDO CA-1	UNIDADES
MB	Numeración de Coliformes Termotolerantes o Fecales	<3	NMP/g ST
MB	Recuento de Coliformes	<3	NMP/g
MB	Huevos Viables de Helminthos (Cuantificación)	<1	Huevos/4g ST
MB	Numeración de Escherichia coli (NMP)	<3	NMP/g ST
MB	Detección de Salmonella	Ausencia ³	/en 10g ST
FQ	Nitrógeno Kjeldahl	6.86	%
FQ	CIC : Capacidad de intercambio catiónico	58.68	meq/100g
FQ	C/N : Relacion Carbóno/Nitrógeno	4.26	---
FQ	pH	6.19	U de pH
FQ	Humedad	5.21	%
FQ	Nitrato (NO ₃ -)	1939.0	mg/Kg
FQ	Sulfatos (como S)	318.63	mg/Kg
FQ	Nitrógeno Amoniacal	2326.47	mg/Kg
FQ	Nitrilo (NO ₂ -)	1.554	mg/Kg

ABREVIATURAS:

%	: Expresado en porcentaje
---	: No Aplica
/en 10g ST	: En 10 gramos de sólidos totales
NMP/g	: Número más probable por gramo
NMP/g ST	: Número más probable por gramo de sólidos totales
mg/Kg	: Miligramos por kilogramo
meq/100g	: Millequivalentes por 100 gramos
Huevos/4g ST	: Huevos por 4 gramos de sólidos totales
U de pH	: Unidades de pH

MÉTODOS UTILIZADOS :

Numeración de Coliformes Termotolerantes o Fecales	: BHIOS-MB-053: Numeración de Coliformes Fecales por la Técnica de tubos múltiples - NMP (Basado en SMEWW APHA 22 nd Ed. 2012: 9221-E) Versión 02-2012
Recuento de Coliformes	: ICMSF Método 1, Pág 132-133, Vol 1, 2 ^a Ed, 1983 (Reimpresión 2000). 1983. Técnica del Numero mas Probable (NMP). Método 1 (Norteamericano)
Huevos Viables de Helminthos (Cuantificación)	: NMX-AA-113-SCFI-2012 Análisis de Agua - Medición del número de huevos de helminthos en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica - Método de Prueba - Modificado para biosólidos
Numeración de Escherichia coli (NMP)	: ICMSF 1983 (Reimpresión 2000): Técnica del Numero mas Probable (NMP). Método 1 (Norteamericano). Pruebas de Identificación de Organismos Coliformes: IMVIC. Pág 132-133 y 139-145.
Detección de Salmonella	: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WEF Part 9000. 9260-B Detection of Pathogenic Bacteria: Salmonella. 23rd Ed. 2017.
Nitrógeno Kjeldahl	: BHIOS-FQ-015: Determinación de Nitrógeno Total en Suelos. Versión 01-2008.
CIC : Capacidad de intercambio catiónico	: Aquino, R; M. Camacho y G. Llanos, 1989. Métodos para Análisis de Aguas, Suelos y Residuos Sólidos. Serie: Documentos Técnicos N°1. IDMA y CONCYTEC. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico. Pág.53. 1ra Ed. Lima. Perú.
C/N : Relacion Carbóno/Nitrógeno	: Aquino, R; M. Camacho y G. Llanos, 1989. Métodos para Análisis de Aguas, Suelos y Residuos Sólidos. Serie: Documentos Técnicos N°1. IDMA y CONCYTEC. Determinación de la Relación Carbóno/Nitrógeno. Pág.77. 1ra Ed. Lima. Perú.
pH	: Aquino, R; M. Camacho y G. Llanos, 1989. Métodos para Análisis de Aguas, Suelos y Residuos Sólidos. Serie: Documentos Técnicos N°1. IDMA y CONCYTEC. Determinación de pH. Pág.49. 1ra Ed. Lima. Perú.
Humedad	: BHIOS-FQ-093 Determinación de Humedad en Suelos, Abonos, Lodos y Sedimentos. Versión 01-2014
Nitrato (NO ₃ -)	: Aquino, R; M. Camacho y G. Llanos, 1989. Métodos para Análisis de Aguas, Suelos y Residuos Sólidos. Serie: Documentos Técnicos N°1. IDMA y CONCYTEC. Determinación de Nitratos. Pág.70. 1ra Ed. Lima. Perú.
Sulfatos (como S)	: BHIOS-FQ-095 Determinación de Sulfatos Solubles en Suelos, Abonos, Lodos y Sedimentos. Versión 01-2014

INFORME DE ENSAYOS N° 2024- 2024

PÁGINA 3 DE 4

MÉTODOS UTILIZADOS :

Nitrógeno Amoniacal
Nitrito (NO₂⁻)

: BHIOS-FQ-063 Determinación de nitrógeno amoniacal en suelos Versión 01-2012
: Aquino, R; M. Camacho y G. Llanos, 1989. Métodos para Análisis de Aguas, Suelos y Residuos Sólidos. Serie: Documentos Técnicos N°1. IDMA y CONCYTEC.
Determinación de Nitritos . Pág.70. 1ra Ed. Lima. Perú.

OBSERVACIONES :

Determinación de pH: Relación suelo/agua = 1/5

LD: Límite de detección del método.

Cualquier valor precedido por "<" indica menor al límite de cuantificación del método

*Ausencia = No detectado – Presencia = Detectado

LC: Límite de cuantificación del método.

Metales Totales por ICP-MS

LAB	DETERMINACIÓN	LD	LC	BIOSÓLIDO CA-1	UNIDADES
FQ	Ag (Plata)	<0.08000	<0.20000	0.78816	mg/Kg
FQ	Al (Aluminio)	<0.03	<0.10	2478.23	mg/Kg
FQ	As (Arsénico)	<0.01000	<0.05000	6.86208	mg/Kg
FQ	B (Boro)	<0.100	<0.500	59.009	mg/Kg
FQ	Ba (Bario)	<0.030	<0.100	131.612	mg/Kg
FQ	Be (Berilio)	<0.20000	<1.00000	0.18442	mg/Kg
FQ	Bi (Bismuto)	<0.1000	<0.5000	23.9669	mg/Kg
FQ	Ca (Calcio)	<0.20	<1.00	21598.47	mg/Kg
FQ	Cd (Cadmio)	<0.01000	<0.05000	1.40291	mg/Kg
FQ	Ce (Cerio)	<0.05000	<0.25000	4.87433	mg/Kg
FQ	Co (Cobalto)	<0.05000	<0.25000	1.77291	mg/Kg
FQ	Cr (Cromo)	<0.01000	<0.05000	211.045	mg/Kg
FQ	Cs (Cesio)	<0.01000	<0.05000	0.44102	mg/Kg
FQ	Cu (Cobre)	<0.050	<0.250	160.798	mg/Kg
FQ	Fe (Hierro)	<0.30	<1.50	3103.05	mg/Kg
FQ	Hg (Mercurio)	<0.01000	<0.05000	0.5530	mg/Kg
FQ	K (Potasio)	<0.01	<0.05	3731.49	mg/Kg
FQ	Li (Litio)	<0.01000	<0.05000	1.98573	mg/Kg
FQ	Mg (Magnesio)	<0.20	<1.00	3609.96	mg/Kg
FQ	Mn (Manganeso)	<0.2000	<1.0000	121.061	mg/Kg
FQ	Mo (Molibdeno)	<0.1000	<0.5000	5.5431	mg/Kg
FQ	Na (Sodio)	<0.01	<0.50	1776.53	mg/Kg
FQ	Ni (Niquel)	<0.1000	<0.5000	10.7664	mg/Kg
FQ	P (Fosforo)	<0.10	<0.50	12804.87	mg/Kg
FQ	Pb (Plomo)	<0.0100	<0.0500	47.2759	mg/Kg
FQ	Sb (Antimonio)	<0.1000	<0.5000	1.0065	mg/Kg
FQ	Se (Selenio)	<0.1000	<0.5000	2.0954	mg/Kg
FQ	Si (Silicio)	<0.1	<0.5	735.87	mg/Kg
FQ	Sn (Estaño)	<0.1000	<0.5000	0.7805	mg/Kg
FQ	Sr (Estroncio)	<0.1000	<0.5000	80.5755	mg/Kg
FQ	Ti (Titanio)	<0.0500	<0.2500	54.7134	mg/Kg
FQ	Tl (Talio)	<0.05000	<0.25000	0.09706	mg/Kg
FQ	U (Uranio)	<0.05000	<0.25000	0.50899	mg/Kg
FQ	V (Vanadio)	<0.0500	<0.2500	9.7402	mg/Kg
FQ	Zn (Zinc)	<0.080	<0.200	836.133	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg

: Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS :

Metales Totales por ICP-MS

: Digestion + EPA METHOD 6020 B, Rev. 2 2014 Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
DIRECCIÓN : NRO. S/N URB. SAN JOSE (UMACOLLO) AREQUIPA - AREQUIPA - AREQUIPA
PRODUCTO DECLARADO : BIOSÓLIDO
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO : Lodo sólido grumoso.
CODIFICACIÓN / MARCA : CA-1
DATOS DECLARADOS POR EL CLIENTE : Fecha de muestreo: 09/04/2024
TAMAÑO DE MUESTRA RECIBIDA : 01 muestra de 1700 g aprox.
PRESENTACIÓN, ESTADO Y CONDICIÓN : En bolsa de polietileno tipo ziploc, cerrada y rotulada. A una temperatura de 23.6 °C.
CONDICIONES DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : Recibida en el Laboratorio
CONTRAMUESTRA Y PERIODO DE CUSTODIA : Ninguna (por ser muestra única)
FECHA PRODUCCIÓN : No especificada
FECHA DE VENCIMIENTO : No especificada
CONTRATO N° : 0682-2024
FECHA DE RECEPCIÓN : 09/04/2024

CONDICIONES DE USO DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS:

- El presente Informe de Ensayos tan sólo es válido únicamente para la Muestra analizada / el Lote muestreado , según sea el caso.
- No deben inferirse a la Muestra analizada o al Lote muestreado otros parámetros que no estén consignados en el presente Informe de Ensayos.
- En caso de que el producto haya sido muestreado por el cliente (Muestra recibida en laboratorio), BHIOS LABORATORIOS no se responsabiliza si las condiciones de muestreo no fueron las adecuadas, los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
- En caso de que el producto haya sido muestreado por BHIOS LABORATORIOS , la presentación, estado y condición del lote corresponden a las encontradas al momento del muestreo.
- Los datos declarados por el cliente son consignados a solicitud expresa del mismo cliente y no son necesariamente verificados por el Laboratorio, por lo que BHIOS LABORATORIOS no asume responsabilidad por el uso de los mismos.
- El Periodo de Custodia es dependiente del tipo de ensayo y de la disponibilidad de la Muestra.
- BHIOS LABORATORIOS no guarda contramuestras de productos perecibles o de productos cuyas características pudieran variar durante el almacenamiento.
- El presente Informe de Ensayos no es un certificado de conformidad, ni certificado del sistema de calidad del productor.
- Está terminantemente prohibida la reproducción parcial de este Informe de Ensayos sin el conocimiento y la autorización escrita de BHIOS LABORATORIOS.
- Cualquier modificación, borrón o enmienda, anula el presente Informe de Ensayos.



PÁGINA 4 DE 4

Determinación de pH: Relación suelo/agua = 1/5
LD: Límite de detección del método.
Cualquier valor precedido por "<" indica menor al límite de cuantificación del método
³Ausencia = No detectado – Presencia = Detectado
LC: Límite de cuantificación del método.

MB 09/04/2024 al 16/04/2024


Blgo. Miguel Valdivia Martínez
Gerente Técnico

Fin del Informe

PRP-08-F-05-IE Versión: 02 Fecha de Emisión: 01/03/22 Elaborado por: GT / Revisado por: CAC / Aprobado por : GG Página 2 de 2

Av. Quíñones B-6 (2do. Piso) - Urb. Magisterial II Etapa - Yanahuara - Arequipa - Perú
Teléfono: ++51(0)54 273320 / 274515 Celular: 983768883 / 954068110
e-mail: bhios@bhioslabs.com y operaciones@bhioslabs.com

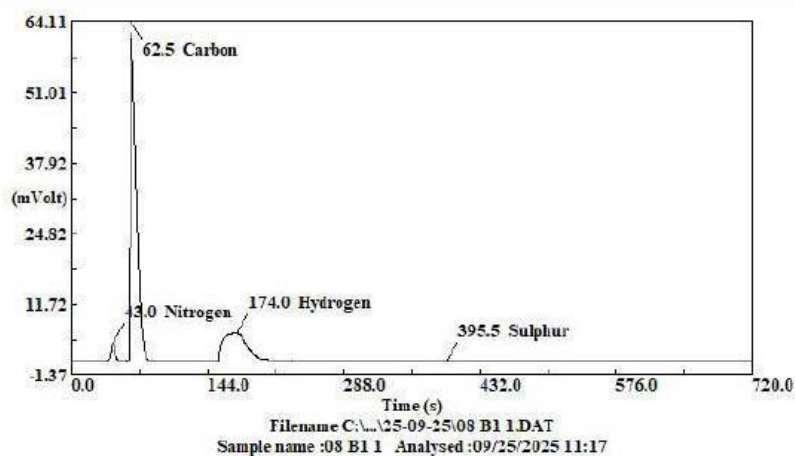
BIOS LABORATORIOS ..calidad a su servicio

CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Fish Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	08 B1 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 11:17
Printed :	9/26/2025 11:25
Sample ID :	08 B1 1 (# 8)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.13
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
Nitrogen	2.283
Carbon	26.811
Hydrogen	3.424
Sulphur	0.624
	33.141
Protein value:	4.26638 (%)

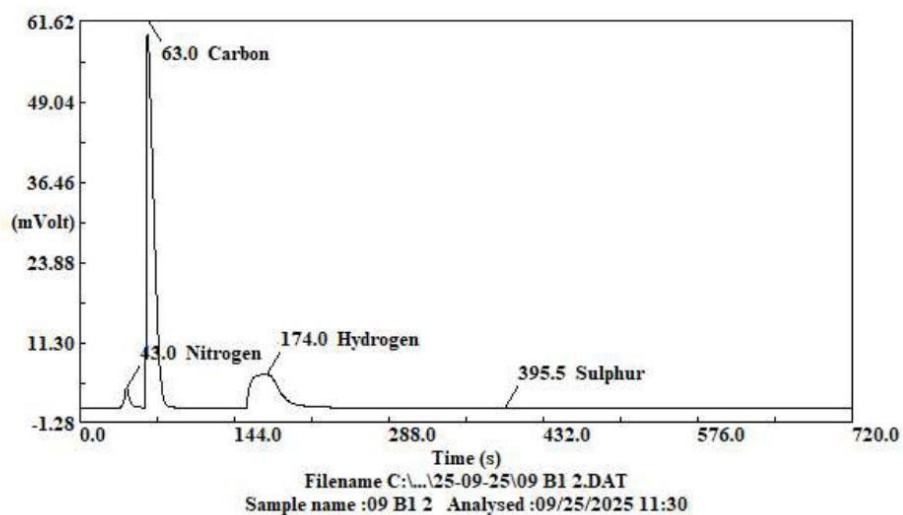


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	09 B1 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 11:30
Printed :	9/26/2025 11:25
Sample ID :	09 B1 2 (# 9)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.05
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.197
Carbon	26.753
Hydrogen	3.552
Sulphur	0.605
	33.107
Protein value:	3.73346 (%)

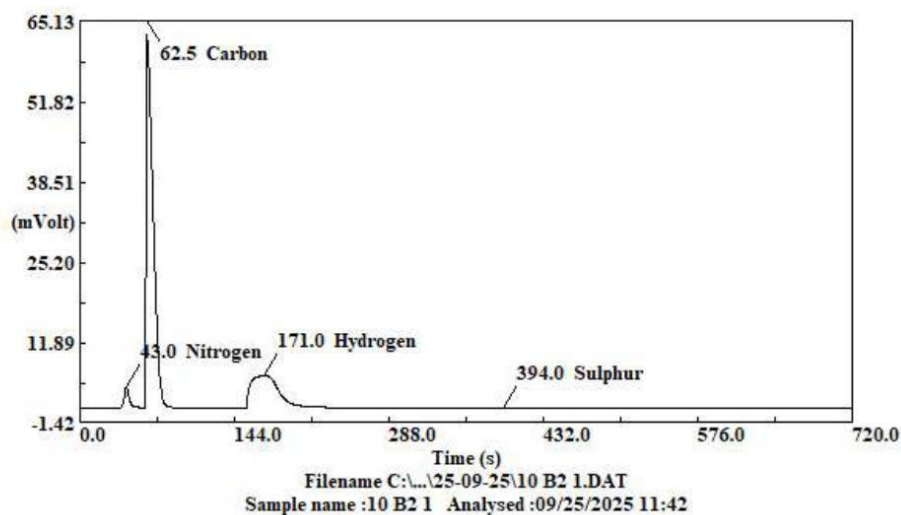


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	10 B2 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 11:42
Printed :	9/26/2025 11:25
Sample ID :	10 B2 1 (# 10)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.07
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.305
Carbon	26.678
Hydrogen	3.524
Sulphur	0.646
	33.153
Protein value:	4.40603 (%)

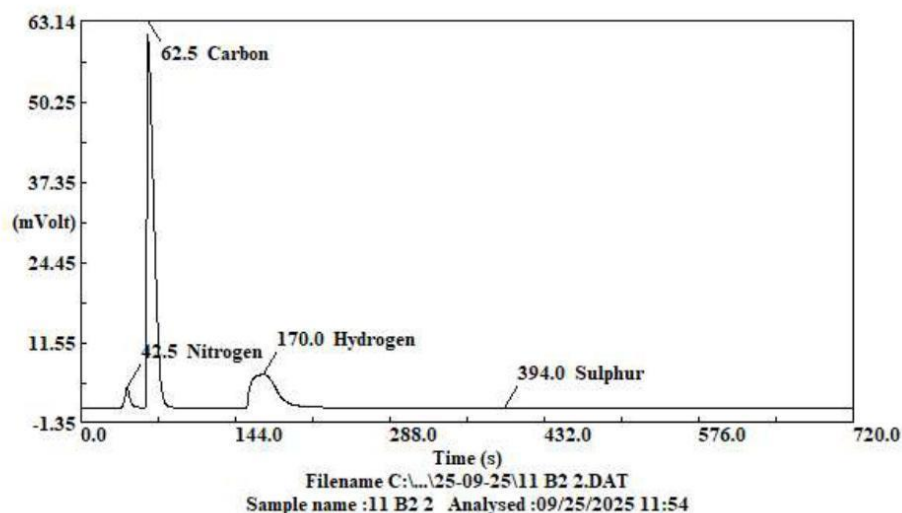


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	11 B2 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 11:54
Printed :	9/26/2025 11:25
Sample ID :	11 B2 2 (# 11)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.03
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.199
Carbon	26.053
Hydrogen	3.292
Sulphur	0.631
	32.176
Protein value:	3.74637 (%)

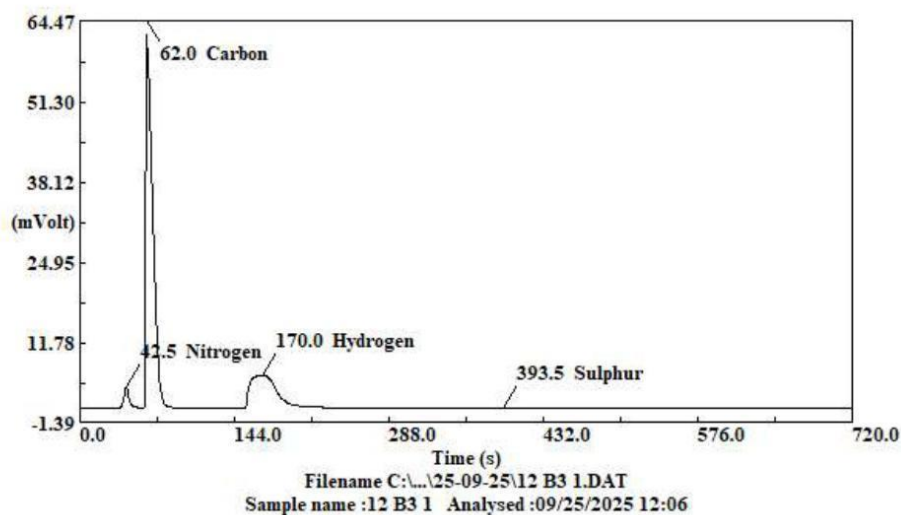


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	12 B3 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 12:06
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	12 B3 1 (# 12)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.15
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.229
Carbon	25.620
Hydrogen	3.265
Sulphur	0.662
	31.776
Protein value:	3.93 (%)

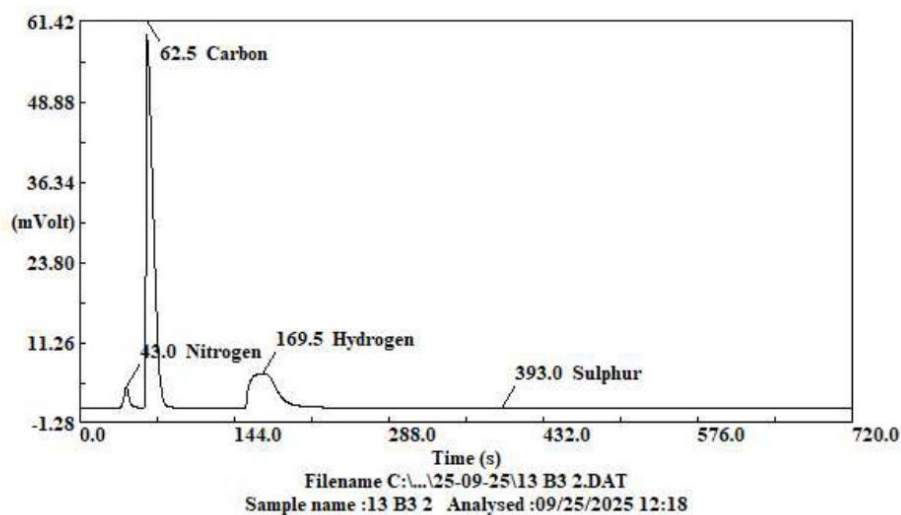


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	13 B3 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 12:18
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	13 B3 2 (# 13)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.212
Carbon	26.075
Hydrogen	3.458
Sulphur	0.681
	32.426
Protein value:	3.82219 (%)

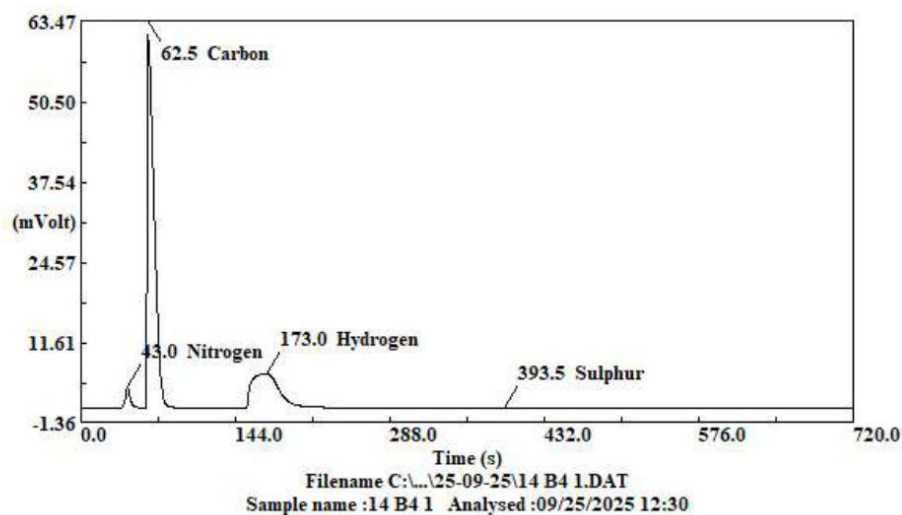


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	14 B4 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 12:30
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	14 B4 1 (# 14)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.11
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.152
Carbon	25.676
Hydrogen	3.505
Sulphur	0.775
	32.108
Protein value:	3.45017 (%)

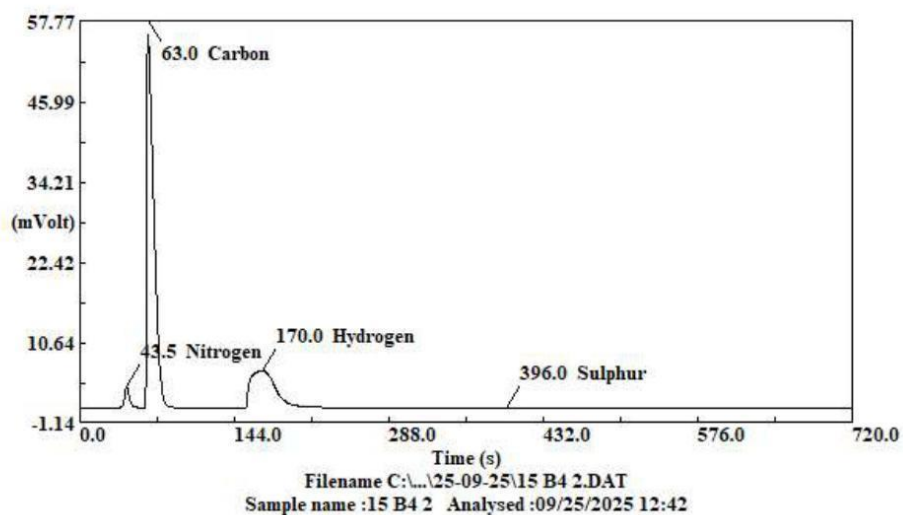


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	15 B4 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 12:42
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	15 B4 2 (# 15)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.02
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.064
Carbon	24.471
Hydrogen	3.270
Sulphur	0.741
	30.546
Protein value:	2.89694 (%)

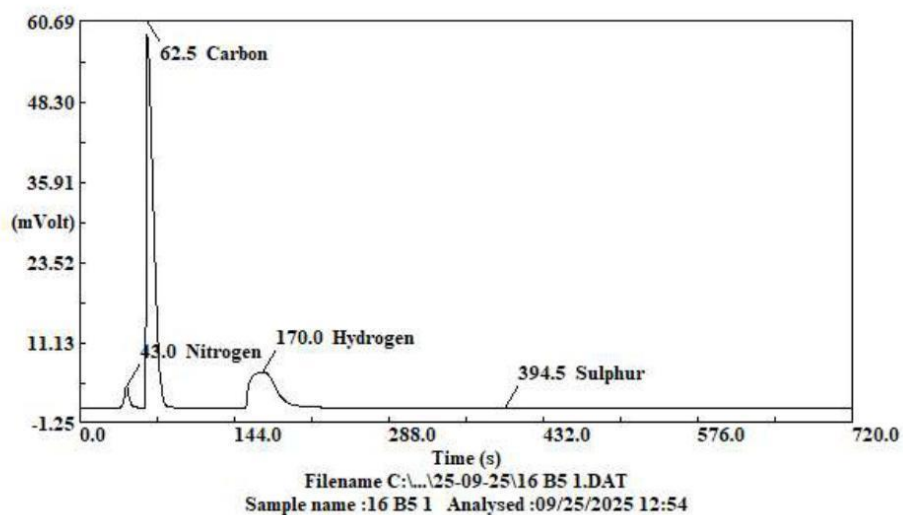


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	16 B5 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 12:54
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	16 B5 1 (# 16)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 2.97
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.238
Carbon	26.215
Hydrogen	3.489
Sulphur	0.756
	32.698
Protein value:	3.98681 (%)

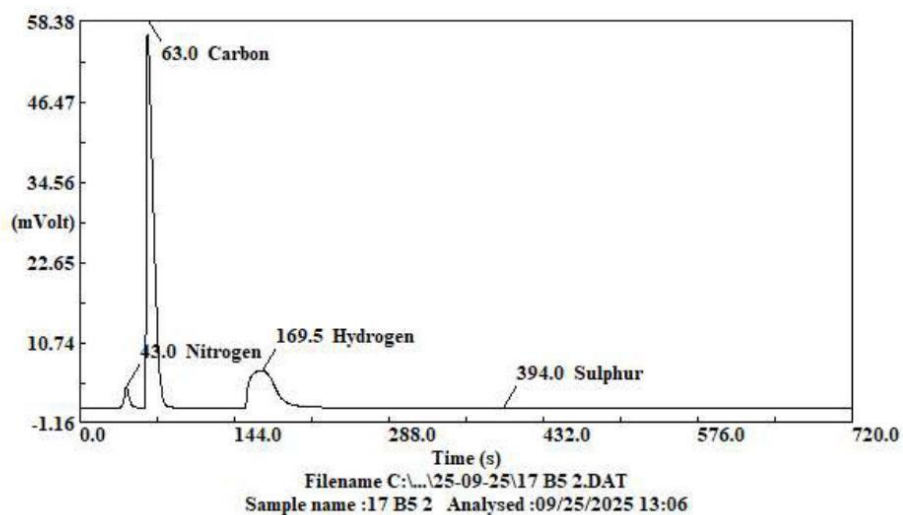


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analys\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	17 B5 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 13:06
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	17 B5 2 (# 17)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.02
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.122
Carbon	24.581
Hydrogen	3.373
Sulphur	0.728
	30.803
Protein value:	3.26115 (%)

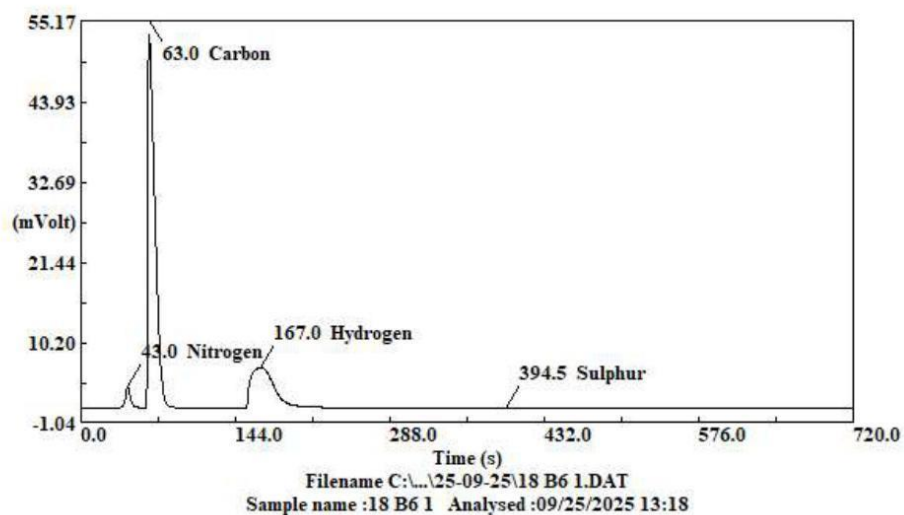


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	18 B6 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 13:18
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	18 B6 1 (# 18)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.08
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	1.988
Carbon	22.964
Hydrogen	3.067
Sulphur	0.670
	28.688
Protein value:	2.42374 (%)

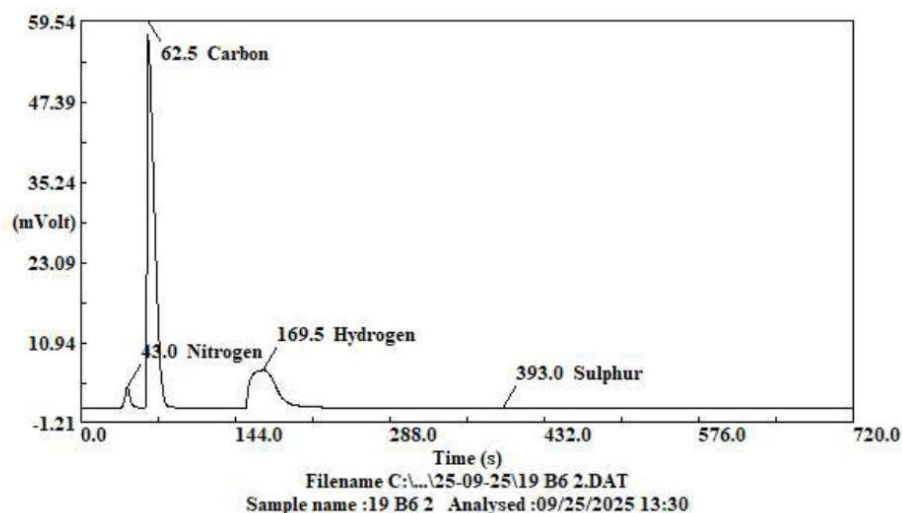


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	19 B6 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 13:30
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	19 B6 2 (# 19)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.02
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.150
Carbon	25.812
Hydrogen	3.496
Sulphur	0.739
	32.197
Protein value:	3.43969 (%)

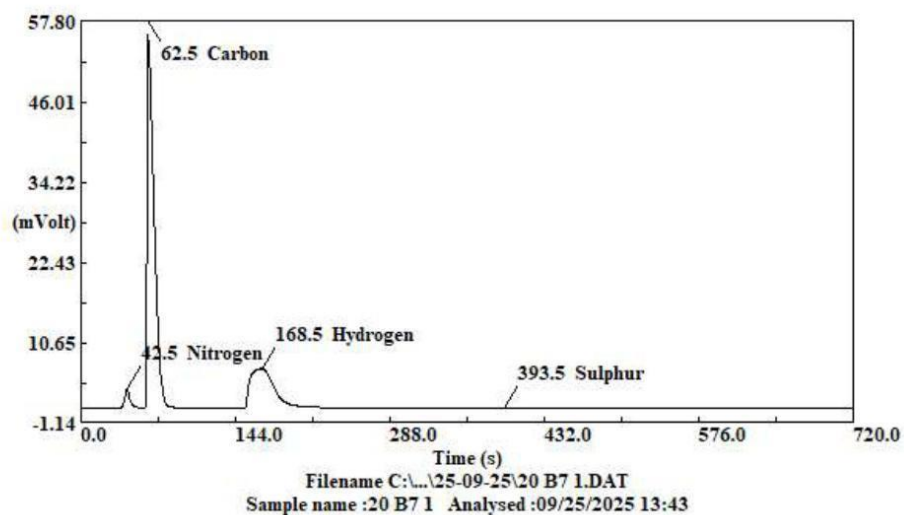


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	20 B7 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 13:43
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	20 B7 1 (# 20)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.04
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	1.830
Carbon	23.931
Hydrogen	3.252
Sulphur	0.765
	29.778
Protein value:	1.43555 (%)

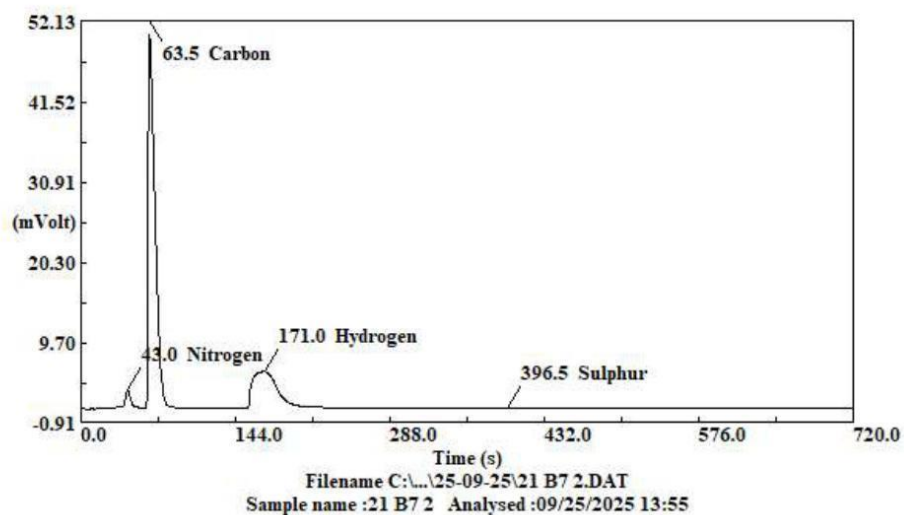


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	21 B7 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 13:55
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	21 B7 2 (# 21)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.02
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	1.626
Carbon	21.284
Hydrogen	2.852
Sulphur	0.675
	26.437
Protein value:	0.16132 (%)

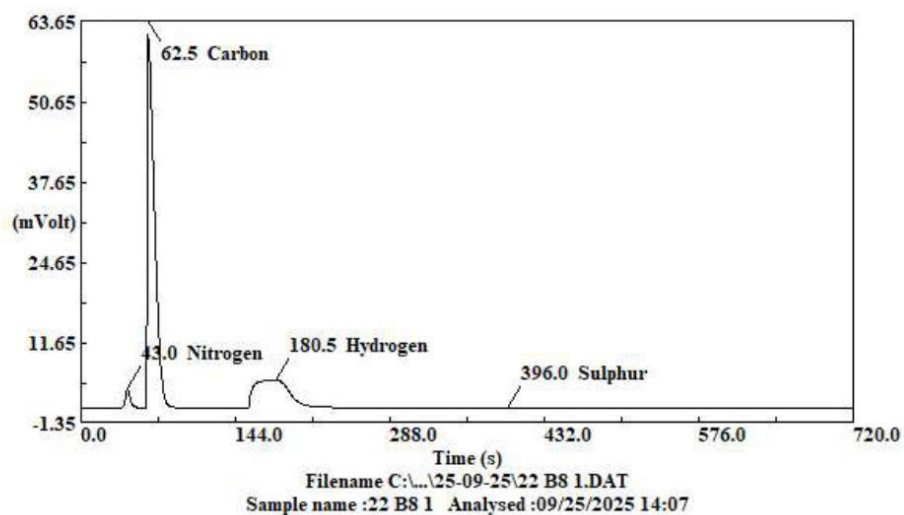


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	22 B8 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 14:07
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	22 B8 1 (# 22)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 2.99
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.101
Carbon	27.703
Hydrogen	3.794
Sulphur	0.788
	34.386
Protein value:	3.13389 (%)

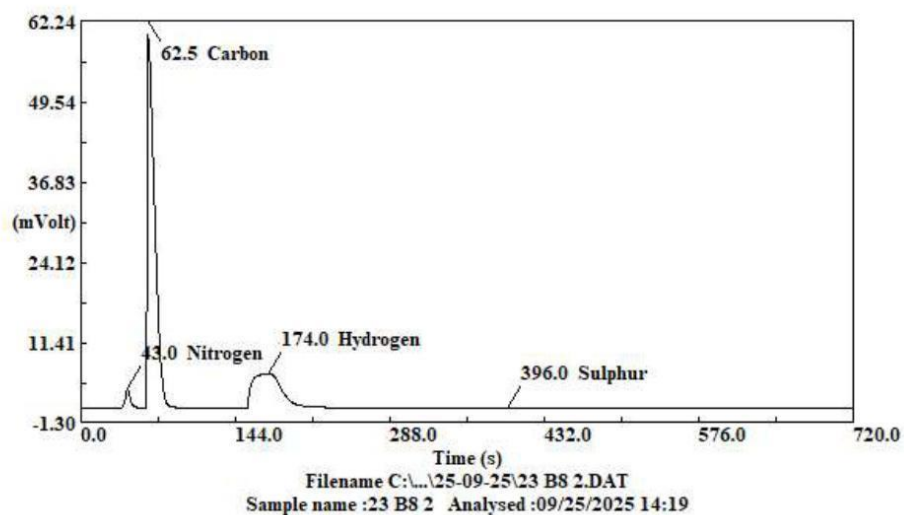


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25\CHNS.mth
Chromatogram :	23 B8 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 14:19
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	23 B8 2 (# 23)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.02
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.024
Carbon	27.504
Hydrogen	3.737
Sulphur	0.755
	34.021
Protein value:	2.65065 (%)

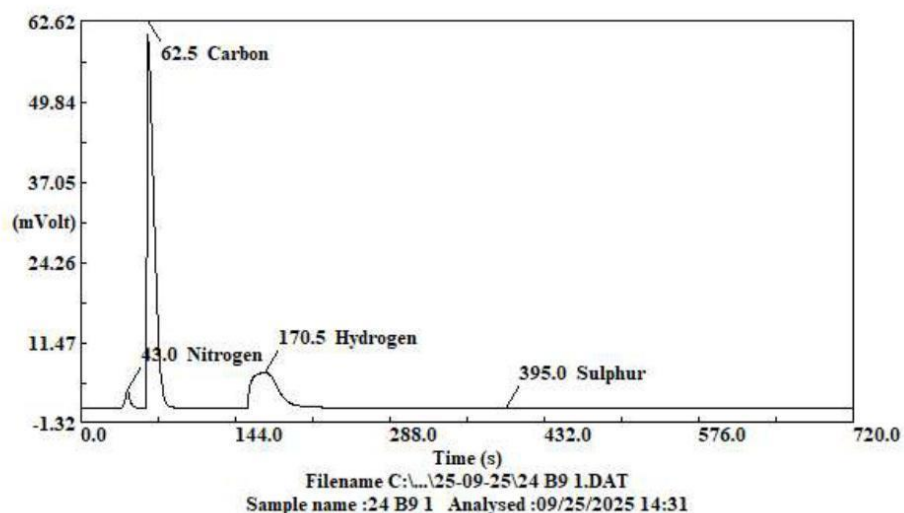


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	24 B9 1
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 14:31
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	24 B9 1 (# 24)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.02
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	1.772
Carbon	26.304
Hydrogen	3.543
Sulphur	0.643
	32.261
Protein value:	1.07347 (%)

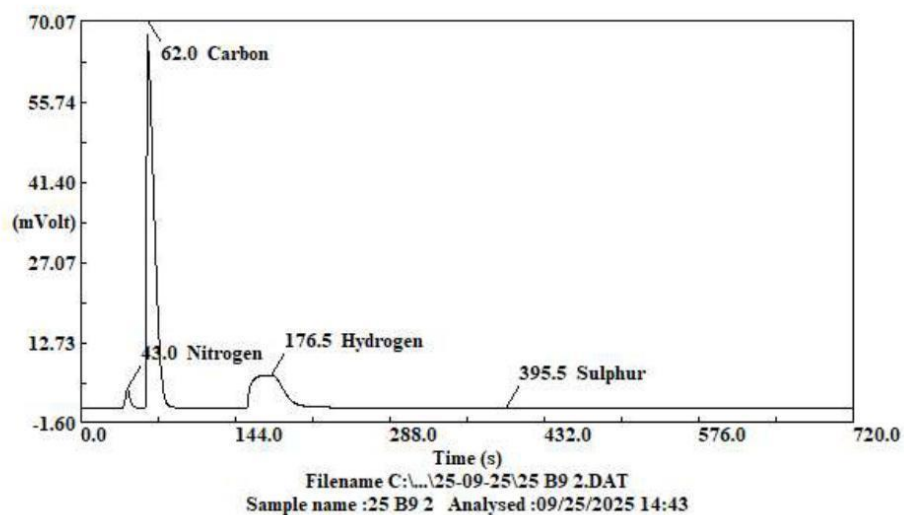


CHNS

Method Name :	CHNS
Method File :	C:\Users\UCSM\Documents\Flash Smart\analysis\CHNS\25-09-25\2025-09-25 CHNS.mth
Chromatogram :	25 B9 2
Operator ID :	Angie
Company Name :	UCSM
Analysed :	09/25/2025 14:43
Printed :	9/26/2025 11:26
Sample ID :	25 B9 2 (# 25)
Instrument N. :	FlashSmart F406
Analysis Type :	UnkNown (Area) Sample weight : 3.06
Protein Fact. :	6.25

Calib. method : using 'Least Squares to Linear fit'

Component Name	Element %
-----	-----
Nitrogen	2.147
Carbon	30.932
Hydrogen	4.279
Sulphur	0.747
	38.105
Protein value:	3.42034 (%)



INFORME DE ENSAYOS N° 9635-2025-B
PÁGINA 1 DE 2

SOLICITANTE : UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA
DIRECCIÓN : NRO. S/N URB. SAN JOSE (UMACOLLO) AREQUIPA - AREQUIPA -
AREQUIPA
PRODUCTO DECLARADO : SUELO
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO : Polvo fino color cafe.
CODIFICACIÓN / MARCA : P:1
DATOS DECLARADOS POR EL CLIENTE : Ninguno
TAMAÑO DE MUESTRA RECIBIDA : 01 muestra de 1088 g aprox., para análisis FQ.
PRESENTACIÓN, ESTADO Y CONDICIÓN : En bolsa transparente con cierre hermético cerrada y etiquetada. A una temperatura de 23.2°C
CONDICIONES DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : Recibida en el Laboratorio
CONTRAMUESTRA Y PERIODO DE CUSTODIA : Ninguna (por ser muestra única)
FECHA PRODUCCIÓN : No especificada
FECHA DE VENCIMIENTO : No especificada
CONTRATO N° : 2591-2025
FECHA DE RECEPCIÓN : 28/11/2025

CONDICIONES DE USO DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS:

El presente Informe de Ensayos tan sólo es válido únicamente para la Muestra analizada / el Lote muestreado, según sea el caso.
No deben inferirse a la Muestra analizada o al Lote muestreado otros parámetros que no estén consignados en el presente Informe de Ensayos.
En caso de que el producto haya sido muestreado por el cliente (Muestra recibida en laboratorio), BHIOS LABORATORIOS no se responsabiliza si las condiciones de muestreo no fueron las adecuadas, los resultados se aplican a la muestra tal como se recibió.
En caso de que el producto haya sido muestreado por BHIOS LABORATORIOS, la presentación, estado y condición del lote corresponden a las encontradas al momento del muestreo.
Los datos declarados por el cliente son consignados a solicitud expresa del mismo cliente y no son necesariamente verificados por el Laboratorio, por lo que BHIOS LABORATORIOS no asume responsabilidad por el uso de los mismos.
El Periodo de Custodia es dependiente del tipo de ensayo y de la disponibilidad de la Muestra.
BHIOS LABORATORIOS no guarda contramuestras de productos perecibles o de productos cuyas características pudieran variar durante el almacenamiento.
El presente Informe de Ensayos no es un certificado de conformidad, ni certificado del sistema de calidad del productor.
Está terminantemente prohibida la reproducción parcial de este Informe de Ensayos sin el conocimiento y la autorización escrita de BHIOS LABORATORIOS.
La forma oficial de entrega y uso del Informe de Ensayos es: "Digital, en formato (PDF) con una Firma Electrónica Autorizada" (cualquier tipo de edición invalida el documento digital).
Se tiene la opción, de emitir el Informe de Ensayos de manera "Impresa/Física a partir del documento digital, visado con un Sello y Firma Manuscrita".
(cualquier modificación, borrón o enmienda, anula el documento impreso)

INFORME DE ENSAYOS N° 9635-2025-B
PÁGINA 2 DE 2

RESULTADOS

LAB	DETERMINACIÓN	SUELO P:1	UNIDADES
FQ	Elemento Cr	335.95	mg/Kg

ABREVIATURAS:

mg/Kg : Miligramos por kilogramo

MÉTODOS UTILIZADOS :

Elemento Cr : Environmental Protection Agency. Method 3050B. Acid Digestion of Sediments, Sludges and Soils. Revision 1996.

FECHAS DE EJECUCIÓN DE LOS ENSAYOS : FQ 28/11/2025 al 10/12/2025

FECHA DE EMISIÓN DEL PRESENTE INFORME DE ENSAYOS : 10/12/2025



Contraseña: EOQ3uh

Fin del Informe



Firmado digitalmente por: Miguel Valdivia Martínez
Gerente Técnico - BHIOS LABORATORIOS S.R.L.
mvaldivia@bhioslabs.com
Av. Quiñones B-6 (2do piso) Urb. Magisterial II Etapa
Yanahuara.
11/12/2025 13:40

PRP-08-F-05-IE Versión: 05 Fecha de Emisión: 2025/05/07 Elaborado por: GT / Revisado por: CAC / Aprobado por: GG Página 2 de 2
Av. Quiñones B-6 (2do. Piso) - Urb. Magisterial II Etapa - Yanahuara - Arequipa - Perú
Teléfono: ++51(0)54 273320 / 274515 Celular: 983768883 / 954068110
e-mail: bhios@bhioslabs.com y operaciones@bhioslabs.com

Anexo 6. Resultado del análisis de cromo en el suelo del PIRS tratado con la enmienda orgánica.

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE: 26412-25

CLIENTE: CAROLINA LUCERO MENDOZA SANIS
NANCY ELIZABETH QUISPE CAYO.

DIRECCIÓN: AREQUIPA

ENSAYO SOLICITADO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PRODUCTO: SUELO

CANTIDAD DE MUESTRA: 01

FECHA DE RECEPCIÓN: Miércoles, 15 de octubre de 2025

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES: BOLSA ZIPLOCK

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: Lunes, 24 de noviembre de 2025

REFERENCIA: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

PROCEDENCIA: B₁ - PARQUE INDUSTRIAL RIO SECO.

CÓDIGO DE MUESTRA: 32920

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 2



UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

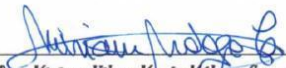
INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 26412-25

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
Cromo	ppm	268,68	Método Absorción Atómica.
OBSERVACIONES:			

Página 2 de 2

Emitido en Arequipa, el 24 de noviembre de 2025.


Dra. Miriam Vilma María Málaga Cornejo
Coordinadora(e) del Laboratorio
RCQP - 259




Lic. Quím. Fredy Agustín Valdivia Peña
Químico Responsable
RCQP - 842

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE: 26413-25

CLIENTE: CAROLINA LUCERO MENDOZA SANIS
NANCY ELIZABETH QUISPE CAYO.

DIRECCIÓN: AREQUIPA

ENSAYO SOLICITADO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PRODUCTO: SUELO

CANTIDAD DE MUESTRA: 01

FECHA DE RECEPCIÓN: Miércoles, 15 de octubre de 2025

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES: BOLSA ZIPLOCK

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: Lunes, 24 de noviembre de 2025

REFERENCIA: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

PROCEDENCIA: B₂ - PARQUE INDUSTRIAL RIO SECO.

CÓDIGO DE MUESTRA: 32921

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 2

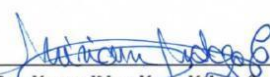
INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 26413-25

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
Cromo	ppm	262,23	Método Absorción Atómica.
OBSERVACIONES:			

Página 2 de 2

Emitido en Arequipa, el 24 de noviembre de 2025.


Dra. Miriam Vilva-Maria Malaga Cornejo
Coordinadora(e) del Laboratorio
RCQP - 259




Ltc. Quím. Fredy Agustín Valdivia Peña
Químico Responsable
RCQP - 842

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE: 26414-25

CLIENTE: CAROLINA LUCERO MENDOZA SANIS
NANCY ELIZABETH QUISPE CAYO.

DIRECCIÓN: AREQUIPA

ENSAYO SOLICITADO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PRODUCTO: SUELO

CANTIDAD DE MUESTRA: 01

FECHA DE RECEPCIÓN: Miércoles, 15 de octubre de 2025

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES: BOLSA ZIPLOCK

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: Lunes, 24 de noviembre de 2025

REFERENCIA: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

PROCEDENCIA: B₃ - PARQUE INDUSTRIAL RIO SECO.

CÓDIGO DE MUESTRA: 32922

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 2

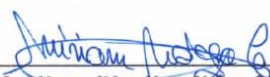
INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 26414-25

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
Cromo	ppm	190,13	Método Absorción Atómica.
OBSERVACIONES:			

Página 2 de 2

Emitido en Arequipa, el 24 de noviembre de 2025.


Dra. Miriam Vilva María Málaga Cornejo
Coordinadora(e) del Laboratorio
RCQP - 259




Lic. Quím. Fredy Agustín Valdivia Peña
Químico Responsable
RCQP - 842