

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Evaluación de la efectividad de tratamientos
con biocarbón pirogénico para reducir la
salinidad de suelos agrícolas en El Arenal, valle
de Tambo, Arequipa-2023**

Branco Eduardo Huamani Diaz

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Arequipa, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Juan Mardonio Rivera Medina
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 27 de Diciembre de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE TRATAMIENTOS CON BIOCARBÓN PIROGÉNICO PARA REDUCIR LA SALINIDAD DE SUELOS AGRÍCOLAS EN EL ARENAL VALLE DE TAMBO, AREQUIPA-2023

Autores:

1. Branco Eduardo Huamani Diaz – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 10 SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

AGRADECIMIENTO

A Dios, por brindarme vida y fortaleza para afrontar cada obstáculo que se presentó en mi camino; a mis padres y abuelos, por siempre darme su apoyo incondicional; al Ing. Juan Mardonio Rivera Medina y a la Lic. Wine Mejía Quispe, por su guía, enseñanzas y constante apoyo; y a todos los que fueron parte de esta investigación, así como a quienes me apoyaron desinteresadamente. Los llevaré grabados para siempre en mi memoria y en mi futuro profesional.

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación va dedicado principalmente a mis padres y abuelos, por todo el esfuerzo que realizaron para que pudiera lograr mis metas. Esta tesis es un tributo a su legado y a la eterna admiración que siento por ustedes.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| 1. AGRADECIMIENTO..... | i |
| 2. DEDICATORIA..... | ii |
| 3. ÍNDICE..... | iii |
| 4. ÍNDICE DE FIGURAS..... | vii |
| 5. ÍNDICE DE TABLAS..... | viii |
| 6. RESUMEN | ix |
| 8. ABSTRACT..... | x |
| 9. INTRODUCCIÓN | xi |
| 10. CAPÍTULO I | 1 |
| 11. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO | 1 |
| 1.1. Planteamiento y formulación del problema | 1 |
| 1.1.1 Formulación del problema..... | 1 |
| 1.1.2 Planteamiento del problema | 2 |
| 1.1.2.1 Problema general..... | 2 |
| 1.1.2.2 Problemas específicos | 2 |
| 1.2. Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1 Objetivo general | 3 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.3. Justificación e importancia | 3 |
| 1.3.1 Económica..... | 3 |
| 1.3.2 Ambiental..... | 4 |
| 1.3.3 Social..... | 5 |
| 1.4. Hipótesis | 5 |
| 1.4.1 Hipótesis general | 5 |
| 1.4.2 Hipótesis específicas | 5 |

| | | |
|-------|--|----|
| 1.5. | Operacionalización de variables de estudio | 6 |
| 12. | CAPÍTULO II | 7 |
| 13. | MARCO TEÓRICO..... | 7 |
| 2.1. | Antecedentes de la investigación..... | 7 |
| 2.1.1 | Antecedentes internacionales | 7 |
| 2.1.2 | Antecedentes locales | 10 |
| 2.2. | Bases teóricas..... | 10 |
| 2.2.1 | El suelo..... | 10 |
| 2.2.2 | Propiedades del suelo | 11 |
| 2.2.3 | Propiedades físicas del suelo | 12 |
| 2.2.4 | Propiedades químicas del suelo | 13 |
| 2.2.5 | Suelos afectados por sales | 15 |
| 2.2.6 | Salinidad del suelo | 16 |
| 2.2.7 | Clasificación americana de suelos salinos | 17 |
| 2.2.8 | Biocarbón pirogénico | 18 |
| 2.3. | Bases conceptuales..... | 20 |
| 2.3.1 | Biocarbón pirogénico | 20 |
| 2.3.2 | Suelo | 20 |
| 2.3.3 | Suelo agrícola..... | 20 |
| 2.3.4 | Salinidad..... | 21 |
| 2.3.5 | Suelos salinos | 22 |
| 2.3.6 | Suelos sódicos | 22 |
| 2.3.7 | Suelos salino-sódicos | 22 |
| 14. | CAPITULO III..... | 23 |
| 15. | METODOLOGÍA | 23 |
| 3.1. | Método, tipo o alcance de la investigación..... | 23 |
| 3.1.1 | Tipo de investigación | 23 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.2 | Diseño de investigación..... | 23 |
| 3.1.3 | Nivel de investigación | 23 |
| 3.2. | Materiales y métodos | 23 |
| 3.2.1 | Materiales, insumos y equipos | 23 |
| | Métodos | 26 |
| 3.3. | Técnicas e instrumentos | 27 |
| 3.3.1 | Técnicas | 27 |
| 3.3.2 | Instrumentos..... | 27 |
| 3.4. | Población y Muestra..... | 27 |
| 3.4.1 | Población..... | 27 |
| 3.4.2 | Muestra..... | 29 |
| 3.4.3 | Muestreo..... | 30 |
| 3.5. | Procedimiento | 30 |
| 3.5.1 | Producción de biocarbón pirogénico | 30 |
| 3.5.2 | Muestreo de suelo agrícola del arenal Valle de Tambo | 33 |
| 3.5.3 | Análisis de parámetros fisicoquímicos | 33 |
| 3.5.4 | Tratamiento del suelo con biocarbón pirogénico | 34 |
| 3.5.5 | Procedimientos | 34 |
| 3.5.6 | Diseño experimental Split-Plot..... | 48 |
| 3.6. | Procesamiento y Análisis..... | 50 |
| 16. | CAPÍTULO IV..... | 52 |
| 17. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 52 |
| 4.1. | Resultados de la investigación..... | 52 |
| 4.2. | Discusión de resultados..... | 67 |
| | CONCLUSIONES:..... | 68 |
| | RECOMENDACIONES..... | 69 |
| | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |

| | |
|--|----|
| ANEXOS..... | 74 |
| Panel fotográfico..... | 74 |
| Nota. Muestras verificación en laboratorio. Fuente: Propia. | 75 |
| Nota. Ensayos en laboratorio. Fuente: Propia. | 77 |
| Nota. Verificación de la conductividad eléctrica. Fuente: Propia. | 78 |
| Instrumento de muestreo de suelos | 79 |
| Matriz de consistencia..... | 80 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 Intercambio iónico entre coloides y cationes. | 11 |
| Figura 2 Triángulo de textura del suelo..... | 12 |
| Figura 3 Suelos afectados por salinidad en el continente americano | 15 |
| Figura 4 Interacción de partículas de suelo con sales | 17 |
| Figura 5 Materiales carbonosos pirogénicos | 19 |
| Figura 6 Interacción Biocarbón pirogénico, sales y suelo | 19 |
| Figura 7 Esquema de Causas de Salinización | 21 |
| Figura 8 Materiales de laboratorio | 24 |
| Figura 9 Balanza analítica modelo Henkel de capacidad 1kg..... | 24 |
| Figura 10 Estufa eléctrica estándar | 25 |
| Figura 11 Multiparámetro HANNA MODELO H1991301 | 25 |
| Figura 12 Toma panorámica..... | 28 |
| Figura 13 Mapa de ubicación geográfica | 28 |
| Figura 14 Tabla de muestreo de identificación según área | 29 |
| Figura 15 Diagrama de flujo para producción de biocarbón pirogénico..... | 31 |
| Figura 16 Producción del Biochar..... | 32 |
| Figura 17 Producción del Biochar..... | 32 |
| Figura 18 Extracción de muestra 1 | 35 |
| Figura 19 Extracción de muestra 2..... | 36 |
| Figura 20 Pesado de cada muestra con la incorporación del Biocarbón | 37 |
| Figura 21 Tratamientos con incorporación de 10 %, 20 % y 30 %..... | 37 |
| Figura 22 Horno..... | 39 |
| Figura 23 Identificación de muestras | 40 |
| Figura 24 Pesado de probetas..... | 41 |
| Figura 25 Muestra de suelo con agua | 42 |
| Figura 26 Materiales utilizados | 43 |
| Figura 27 Pesado de muestra..... | 44 |
| Figura 28 Muestra en la Mufla..... | 45 |
| Figura 29 Gráfico de operación experimental | 49 |
| Figura 30 Resumen conductividad eléctrica..... | 57 |
| Figura 31 Resumen de resultados de Ph..... | 61 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Operacionalización de variables | 6 |
| Tabla 2 Grados de salinidad | 17 |
| Tabla 3 Profundidad de muestreo en relación al uso específico | 26 |
| Tabla 4 Datos a recopilar en la producción de biocarbón pirogénico | 33 |
| Tabla 5 Métodos para analizar los parámetros fisicoquímicos | 34 |
| Tabla 6 Análisis de varianza | 49 |
| Tabla 7 Ficha de producción de biochar a base de biomasa vegetal | 53 |
| Tabla 8 Caracterización de suelo | 54 |
| Tabla 9 Ficha de análisis del suelo salino sin dosificaciones del tratamiento | 54 |
| Tabla 10 Relación de conductividad eléctrica con Ph | 55 |
| Tabla 11 Ficha de análisis de suelo salino con Biocarbón pirogénico | 56 |
| Tabla 12 Resumen de resultados de suelo salino con Biocarbón pirogénico | 57 |
| Tabla 13 Prueba de normalidad para Conductividad eléctrica | 59 |
| Tabla 14 Prueba de Wilcoxon para Conductividad eléctrica | 60 |
| Tabla 15 Resumen de los tratamientos respecto al Ph | 60 |
| Tabla 16 Prueba de normalidad para pH | 62 |
| Tabla 17 Prueba de Wilcoxon para pH..... | 63 |
| Tabla 18 Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica día 0 | 64 |
| Tabla 19 Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica día 15 | 64 |
| Tabla 20 Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica día 30 | 65 |
| Tabla 21 Prueba de homogeneidad de varianzas para pH..... | 66 |

RESUMEN

El presente estudio evaluó la efectividad del biocarbón pirógeno para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en El Arenal, Valle de Tambo, Arequipa. El biocarbón se produjo a partir de ramas de eucalipto mediante pirolisis lenta. Se llevaron a cabo pruebas con tres tratamientos diferentes, utilizando proporciones de biocarbón del 10%, 20% y 30%, para determinar su impacto en la salinidad del suelo.

Los resultados mostraron que la adición de biocarbón fue significativamente efectiva en la reducción de la salinidad del suelo. Las muestras tratadas con biocarbón presentaron mejoras notables en la conductividad eléctrica y el pH en comparación con las muestras de control. En particular, se observó una disminución del 12.23% en los valores de conductividad eléctrica en relación con la muestra patrón, lo que indica que el biocarbón ayuda a retener sales y mejora la estructura del suelo, creando un ambiente más propicio para el crecimiento de los cultivos.

El incremento en los valores de pH se atribuye a las propiedades alcalinas del biocarbón, lo que también favorece las condiciones del suelo para ciertos cultivos que requieren ambientes menos ácidos. En conclusión, el biocarbón pirógeno es un método eficaz para reducir la salinidad del suelo, con la mayor reducción de conductividad eléctrica observada en el tratamiento con un 30% de biocarbón, mejorando además los niveles de pH y creando condiciones más adecuadas para la agricultura.

Palabras clave: Biocarbón, salinidad, suelos, conductividad eléctrica.

ABSTRACT

The present study evaluated the effectiveness of pyrogenic Biochar in reducing the salinity of agricultural soils in El Arenal, Tambo Valley, Arequipa. Biochar was produced from eucalyptus branches by slow pyrolysis. Tests were carried out with three different treatments using Biochar proportions of 10%, 20% and 30% to determine its impact on soil salinity.

The results showed that the addition of Biochar was significantly effective in reducing soil salinity. The samples treated with Biochar presented notable improvements in electrical conductivity and pH compared to the control samples. In particular, a 12.23% decrease in electrical conductivity values was observed relative to the standard sample, indicating that Biochar helps retain salts and improves soil structure, creating a more conducive environment for crop growth.

The increase in pH values is attributed to the alkaline properties of Biochar, which also favours soil conditions for certain crops that require less acidic environments. In conclusion, pyrogenic Biochar is an effective method for reducing soil salinity, with the greatest reduction in electrical conductivity observed in the 30% Biochar treatment, also improving pH levels and creating more suitable conditions for agriculture.

Keywords: Biochar, salinity, soil, electrical conductivity.

INTRODUCCIÓN

La salinidad del suelo es un problema significativo que afecta la productividad agrícola, especialmente en regiones áridas y semiáridas como El Arenal, Valle de Tambo, en Arequipa. En ese sentido, el exceso de sales en el suelo puede inhibir el crecimiento de las plantas, reducir los rendimientos de los cultivos y deteriorar la estructura del suelo, lo que lleva a la degradación de tierras agrícolas valiosas. Moya (1).

El Biocarbón, producido a través de la pirolisis de biomasa vegetal, se ha destacado por su capacidad de adsorción de sales, mejora de la estructura del suelo y aumento de la retención de nutrientes. Este estudio se llevó a cabo con el objetivo de evaluar la efectividad de tratamientos con biocarbón pirógeno para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en El Arenal, Valle de Tambo, Arequipa. Se utilizó Biocarbón derivado de la combustión de ramas de eucalipto mediante un proceso de pirolisis lenta, y se realizaron pruebas con diferentes proporciones de **Biocarbón (10%, 20% y 30%)** para determinar su impacto en la salinidad del suelo.

En la presente investigación se desglosan los siguientes capítulos: Capítulo I, Realidad problemática, el cual describe el problema a tratar enfocándonos a nivel internacional, nacional y local sobre salinidad de suelos; Capítulo II, se presenta una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre la salinidad del suelo, sus causas y efectos en la agricultura, así como los métodos tradicionales y modernos de mitigación de salinidad, con un enfoque particular en el uso de Biocarbón; Capítulo III, se describe el diseño experimental Split-Plot, los procedimientos de producción de Biocarbón, la preparación de muestras de suelo y la aplicación de tratamientos. Se detalla el proceso de pirolisis, las proporciones de Biocarbón utilizadas y los métodos de análisis de conductividad eléctrica y pH del suelo; Capítulo IV, se presentan los datos obtenidos de las pruebas de conductividad eléctrica y pH, comparando los resultados entre las muestras control y las tratadas con diferentes proporciones de Biocarbón. Se analiza la efectividad de cada tratamiento en la reducción de la salinidad del suelo además se discuten las posibles razones detrás de los cambios observados en la conductividad eléctrica y el pH, y se evalúan las implicaciones prácticas de los hallazgos. Finalmente, se presentan las principales conclusiones del estudio, resaltando la efectividad del Biocarbón pirógeno en la reducción de la salinidad del suelo y la mejora del pH. Se ofrecen recomendaciones para la aplicación práctica del Biocarbón en suelos agrícolas y se sugieren áreas para investigaciones futuras.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1 Formulación del problema

Scudiero et al. (2) indican que, la salinidad del suelo plantea una preocupación significativa en lo que respecta a la seguridad alimentaria global, este conflicto se agrava cada vez más por la escasez de agua y sequías en zonas áridas y semiáridas, aproximadamente un 20% de 300 millones de ha de terreno que producen alimentos en zonas de cultivo están afectadas por la salinidad, esto implica que los suelos se encuentran afectados por cantidades desbordables de sales producto del riego principalmente en China, India, Pakistán y Estados Unidos.

Las actividades humanas insostenibles principalmente en el desarrollo de la agricultura desestabilizan el estado normal de los sistemas ecológicos ocasionando la degradación ambiental del suelo; uno de los factores principales se relaciona con la salinización de terrenos en regiones caracterizadas por su aridez y semi aridez. Shi et al., (3) La cantidad de sales solubles en el suelo se ve agravada por métodos de cultivo insostenibles y el uso excesivo de productos químicos agrícolas, en el periodo comprendido entre 2014 y 2015, a nivel mundial se aplicaron 181.9 millones de toneladas de fertilizantes químicos. González (4).

América Latina se destaca como uno de los continentes con mayor abundancia de recursos naturales del mundo, abarcando el 23% de las tierras agrícolas y cuenta con el 31% de reservas de agua dulce; sin embargo la conversión de ecosistemas naturales en terrenos agrícolas abarca 600 millones de ha, del cual la mayoría se encuentra afectado por procesos de degradación; un suelo degradado implica mayor liberación de CO₂, implica pérdida de cobertura vegetal ya que la absorción es dificultosa por las sales, también implica el desequilibrio ecológico al disminuir la transpiración y evaporación, la tercera amenaza más importante para la degradación fisiográfica es la salinización y sodificación que es causada por la inadecuada técnica de riego, el cambio del uso de la tierra y la contaminación difusa por actividades de agricultura intensiva. FAO (5).

Los incendios, anualmente impactan alrededor de 4.6 millones de km² de biomasa, lo cual equivale aproximadamente al 4% de la superficie vegetal del planeta, gran parte del carbono liberado durante estos incendios es emitido como CO₂ a la atmósfera; sin embargo, investigaciones recientes indican que hasta un 15% de la biomasa afectada por los incendios se transforma en carbono orgánico pirogénico, también conocido como materia orgánica derivada del fuego, carbón vegetal o carbón

negro, este material posee características particulares, como un alto contenido relativo de carbono, una alta aromaticidad química, además bajo ciertas circunstancias, puede tener diversos impactos positivos en las propiedades del suelo, como la elevación del pH, el incremento en la capacidad de retención de agua, la mejora de la disponibilidad de nutrientes y la retención de contaminantes; por ello emplear el carbón que se ha producido es utilizado intencionalmente como una enmienda del suelo, conocida como biocarbón. Reisser et al., (6).

El territorio del Valle de Tambo se caracteriza por suelos de origen aluvial, y la mayoría de su extensión presenta problemas de salinidad y mal drenaje. Estos suelos reciben agua del río Tambo, la cual es de mala calidad debido a sus altos niveles de salinidad y sodicidad. Algunos indicadores de la calidad del agua del río Tambo reflejan esta situación: la Conductividad Eléctrica (CE) es de 4.5 dS/m, lo que indica una alta salinidad; el contenido de Sodio (Na) es de 450 mg/L, lo que contribuye significativamente a la sodicidad del agua; y la Relación de Adsorción de Sodio (SAR) es de 12, lo que sugiere un riesgo considerable de sodicidad en los suelos irrigados con esta agua. Estos problemas de salinidad y sodicidad en los suelos y en el agua de riego tienen un impacto negativo en la productividad agrícola de la región ANA (7) (8); como respuesta a este problema, se emplea una técnica llamada "lavado de suelos" generalmente a inicios de diciembre y culmina en enero cuando los niveles de salinidad son bajos, también la extracción intensiva de agua del acuífero aluvial del efluente superficial río Tambo a través del bombeo extensivo ha provocado una disminución del nivel freático y una reducción en el caudal del río, ocasionando alteración de sistemas acuáticos, susceptibilidad a intrusiones salinas y escasez de agua. Castillo Fernández et al., (9).

Dado que esta explotación del acuífero aluvial del río Tambo podría tener impactos ambientales negativos, se plantea la investigación para determinar si el carbón pirogénico que ha sido sometido a altas temperaturas en un ambiente de bajo oxígeno, poroso y capaz de retener nutrientes, puede reducir la salinidad en los suelos del Valle de Tambo como una solución más sostenible.

1.1.2 Planteamiento del problema

1.1.2.1 Problema general

¿Cuál es el efecto de tratamientos con biocarbón pirogénico para reducir la salinidad en suelos agrícolas en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa-2023?

1.1.2.2 Problemas específicos

¿Cuáles son las características del Biocarbón obtenido en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa?

¿Cuánto es el nivel de salinidad después del tratamiento de los suelos agrícolas en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa?

¿Cuál es el tratamiento de biocarbón pirogénico más efectivo para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa?

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de tratamientos con biocarbón pirogénico para reducir la salinidad en suelos agrícolas en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa-2023.

1.2.2 Objetivos específicos

Determinar las características del Biocarbón obtenido en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa.

Determinar el nivel de salinidad después del tratamiento de los suelos agrícolas en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa.

Determinar el tratamiento de biocarbón pirogénico más efectivo para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en el Arenal Valle de Tambo, Arequipa.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1 Económica

La presencia de suelos con alto contenido de salinidad en áreas destinadas a la agricultura representa un desafío significativo, ya que la producción de alimentos se ve negativamente afectada en proporción directa a los niveles de salinidad presentes, además, la técnica tradicional empleada para abordar este problema es costosa y demanda grandes cantidades de recursos hídricos, este proceso, a su vez, pone en riesgo la seguridad alimentaria que es un elemento fundamental para la sostenibilidad de la humanidad, por ello emplear métodos innovadores para reducir la salinidad en los suelos no solo preserva la fertilidad del suelo y previene su degradación, sino que también protege las inversiones realizadas en la agricultura, esta innovación no solo conlleva beneficios económicos evidentes como la disminución de los gastos operativos, incremento de los ingresos y resultados de mayor productividad, sino que también representa una actividad económica más

sostenible y rentable en el largo plazo, Castillo Fernández et al., (9). En primer lugar, su disponibilidad y sostenibilidad, ya que el eucalipto es una especie de rápido crecimiento y está ampliamente disponible en muchas regiones, lo que lo convierte en una fuente sostenible de materia prima, esta característica asegura un suministro constante y económico para la producción de biocarbón. En segundo lugar, las propiedades del biocarbón de eucalipto son particularmente beneficiosas, este tipo de biocarbón tiene una estructura porosa y una alta capacidad de adsorción, lo que lo hace eficaz para mejorar la retención de agua y nutrientes en el suelo. Esto es crucial en suelos con problemas de salinidad, donde la retención de agua y nutrientes puede estar comprometida. Por último, la mejora del suelo es otro factor clave. Estudios han demostrado que el biocarbón puede reducir la salinidad del suelo al adsorber sales solubles, mejorar la estructura del suelo y aumentar la actividad microbiana, estas mejoras no solo ayudan a mitigar los efectos negativos de la salinidad, sino que también promueven un entorno más saludable para el crecimiento de los cultivos, cabe resaltar que estos factores hacen que el biocarbón de eucalipto sea una opción viable y efectiva para mitigar la salinidad del suelo en el Valle de Tambo, mejorando así la productividad agrícola en la región. Alcalde (10).

1.3.2 Ambiental

Los suelos de Valle de Tambo presentan problemas por su alto nivel de salinidad y mal drenaje, la técnica convencional de lavado de suelos es utilizada para reducir las sales solubles del suelo, lo que contribuye a la degradación ambiental a través de la dominación del nivel freático y el caudal del río; esta alteración del flujo de agua afecta gravemente a los ecosistemas acuáticos, aumenta la susceptibilidad a la intrusión salina y puede dar lugar a una escasez generalizada de agua, lo que tiene graves consecuencias para la biodiversidad y la calidad del entorno natural, por lo tanto, es de vital importancia explorar opciones más sostenibles y medioambientalmente amigables que fomenten la restauración, preservación de los ecosistemas locales y garanticen la disponibilidad de recursos naturales vitales para las futuras generaciones FAO (5). La salinidad influye en varios parámetros de la Evaluación de la Calidad del Ambiental (ECA) de los suelos. Un aumento en la salinidad se refleja en una mayor Conductividad Eléctrica (CE), lo que indica una mayor concentración de sales disueltas en el suelo. Valores elevados de CE pueden inhibir el crecimiento de las plantas debido a la dificultad para absorber agua. Además, la salinidad afecta la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), un parámetro que mide la proporción de sodio en relación con calcio y magnesio en el suelo. Una RAS alta puede deteriorar la estructura del suelo y reducir su permeabilidad, finalmente, aunque la salinidad no afecta directamente el pH del suelo, puede influir en la disponibilidad de nutrientes y en la actividad microbiana, alterando así el equilibrio del pH.

Asimismo, la presencia de altas concentraciones de sales puede reducir la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo, afectando su capacidad para retener y suministrar nutrientes esenciales a las plantas. Vitor (11).

1.3.3 Social

La salinidad en los suelos agrícolas representa un obstáculo significativo para los agricultores locales, ya que el bajo rendimiento del suelo con relación a la productividad de cultivos es anualmente menor cada año; por lo que la capacidad del sector agricultura para proveer y proporcionar alimentos afecta su calidad de vida y colateralmente de las que dependen de ella, conllevándolos a enfrentas crisis sociales y económica. Estos efectos al trasladarse a la realidad objetiva propician que las comunidades agrícolas no puedan desarrollarse de manera normal como sucede con otra actividad económica favorable;, por ello, experimentar e implementar con el biocarbón pirogénico puede implicar una solución viable y asequible para reducir los niveles de sal en los suelos de estudio del Valle de Tambo. Esto tendría un impacto social en la mejora de sus condiciones de vida, logrando que puedan acceder a los servicios básicos como la educación, alimentación y salud pública. Castillo Fernández et al., (9)

1.4. Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La aplicación del biocarbón pirogénico tiene un efecto significativo en la reducción de la salinidad en los suelos arenal Valle de Tambo, Arequipa.

1.4.2 Hipótesis específicas

- a. El Biocarbón obtenido en el Arenal, Valle de Tambo, Arequipa, presenta características físicas y químicas favorables, incluyendo una alta porosidad, capacidad de adsorción de nutrientes y sales, así como propiedades alcalinas que mejoran la calidad del suelo, donde estas características sean evidentes en el análisis de la superficie específica, la capacidad de retención de agua, el pH y la conductividad eléctrica del Biocarbón
- b. Después de la aplicación del tratamiento con biocarbón pirogénico en los suelos agrícolas del Valle de Tambo, Arequipa, se observará una reducción significativa en la salinidad en comparación con los valores iniciales.

- c. El tratamiento de Biocarbón pirogénico más efectivo para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en El Arenal, Valle de Tambo, Arequipa, es aquel que emplea un 20% de Biocarbón, se espera que este tratamiento resulte en la mayor disminución de la conductividad eléctrica y un aumento significativo en el pH del suelo.

1.5. Operacionalización de variables de estudio

Variable de estudio independiente

Biocarbón pirogénico

Variable de estudio dependiente

Salinidad del suelo

Tabla 1 Operacionalización de variables

| | Definición conceptual | Definición operacional | Dimensiones | Indicadores | Unidad de medida |
|--|---|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Variable independiente: Biocarbón pirogénico | Material carbonoso producto de la combustión controlada de biomasa, con alta concentración de carbono Reisser et al., (6). | Se empleará 1 kg de biomasa eucalipto para someterlos a combustión y obtener el biocarbón. | Características químicas | Carbono total | % |
| | | | | Humedad | % |
| Variable dependiente: Salinidad del suelo | Es la concentración de sales disueltas que dificultan la capacidad de retención de líquidos y modifican la estructura del suelo Castillo Fernández et al., (9). | La salinidad del suelo se evaluará mediante una prueba de concentración inicial y final. | Salinidad | pH | 1-14 |
| | | | | Conductividad eléctrica | dS/cm |
| | | | | Textura | Nominal |
| | | | | Color | Escala |

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Atai et al. (12) En su artículo de investigación, se examinó el potencial de aplicar tres aditivos biológicos (carbón vegetal producido a partir de cáscaras de arroz, carbón vegetal de paja de trigo y compost de hongos usados) para mejorar la descomposición microbiana del petróleo crudo en suelos con alta salinidad. Los resultados mostraron que las adiciones biológicas tuvieron un efecto significativo en la descomposición de los hidrocarburos totales de petróleo (HTP) tanto en condiciones de suelos salinos como no salinos, con un incremento del 67% y 18%, respectivamente. Entre las adiciones biológicas, el carbón de cáscaras de arroz y el compost de hongos fueron los que tuvieron el mayor impacto en la descomposición en suelos salinos, mientras que la paja de trigo, combinada con carbón de cáscaras de arroz y compost de hongos, mostró los efectos más significativos en suelos no salinos. Además, la producción de CO₂, que indica actividad microbiana, fue mayor (56% y 60%) en los tratamientos que combinaron carbón vegetal en suelos no salinos, mientras que, en suelos salinos, el tratamiento con carbón vegetal (50%) fue el que presentó la mayor producción.

Sasmita et al. (13) analizó el impacto de aplicar diferentes cantidades de biocarbón elaborado a partir de cáscaras de palma, agregado al suelo, sobre las emisiones de CO₂ resultantes de la respiración del suelo. El biocarbón de cáscara de palma fue pirolizado a 600 °C durante una hora y luego activado con NaOH. Posteriormente, se añadió al suelo en dosis de 0%, 8%, 10% y 12%, y se incubó durante 10 días. Para cuantificar las emisiones de CO₂ generadas a través de la respiración del suelo, se utilizó el método de titulación ácido-base.

Los resultados mostraron que la incorporación de biocarbón de cáscara de palma en la capa superior del suelo no conduce a una disminución en las emisiones de carbono, pero crea un entorno favorable que aumenta las emisiones de CO₂. El tratamiento con la dosis más alta (12% de biocarbón de cáscara de palma) resultó en la mayor emisión de CO₂, alcanzando 0.03 mgCO₂-C/g de suelo en el segundo día de incubación. Este valor fue un 75% más alto que el observado en el suelo sin adición de biocarbón.

Rolka et al. (14) analizó cómo diferentes cantidades de ceniza de biomasa de madera añadidas al suelo afectan ciertas propiedades del mismo. El sustrato utilizado se caracterizó por su naturaleza

ácida, baja salinidad y un contenido moderado de carbono total. El análisis del suelo después de la cosecha reveló un aumento en el pH y una mejora sustancial en las características de retención del agua del suelo, sin que se produjera un incremento excesivo en la salinidad. Además, se observó un aumento notable en los niveles disponibles de K, P y Mg, siendo los valores más altos alcanzados con la dosis más elevada de ceniza de biomasa de madera: 121.9, 109.3 y 41.33 mg kg⁻¹ de suelo, respectivamente. En cuanto al contenido de metales pesados, se identificaron fluctuaciones significativas en el sustrato, pero no se superaron los límites permisibles para suelos agrícolas. Estos resultados respaldan el potencial fertilizante significativo de la ceniza de biomasa de madera.

Ngoc-Thang et al. (15) examinó el impacto de aplicar biocarbón para optimizar el crecimiento y el desarrollo fisiológico de la caña de azúcar en sus primeras etapas de vida, tanto en condiciones salinas como no salinas. El experimento se llevó a cabo en macetas en invernaderos, donde se aplicaron tres dosis de biocarbón (0, 5 y 10 toneladas por hectárea). Cuatro semanas después del trasplante, las plantas fueron regadas con 300 mL de una solución de NaCl cada dos días durante dos semanas. La salinidad tuvo un impacto significativo en el crecimiento y la fisiología de la especie en estudio. Sin embargo, tras la aplicación de biocarbón, se observaron resultados positivos en el incremento del tamaño de las plantas, el peso seco de los brotes, el aumento del volumen del sistema rizosférico, así como el peso de las raíces. Además, mediante el coeficiente de fluorescencia variable y el contenido de clorofila, se redujo el déficit de saturación de agua y la pérdida relativa de iones en las hojas, tanto en condiciones salinas como no salinas. En consecuencia, la utilización de biocarbón mostró un impacto beneficioso en el crecimiento y la fisiología de la caña de azúcar durante sus primeras etapas, tanto en suelos salinos como no salinos. No obstante, se recomienda realizar más investigaciones para explorar los efectos del biocarbón en diferentes etapas de crecimiento.

Weber et al. (16) investigaron el impacto de la adición de estiércol de ganado alimentado con un 2% de biocarbón y la aplicación de biocarbón en cantidades de 5 o 10 mg por hectárea en un campo agrícola. Se realizaron mediciones de las emisiones de CH₄ y N₂O, y se recolectaron muestras del sustrato para analizar los niveles intercambiables de NPKS, biomasa microbiana, carbono total, nitrógeno total, conductividad eléctrica y pH. Los resultados mostraron una inhibición de hasta el 98,5% en la oxidación de CH₄ en el tratamiento con biocarbón-estiércol + biocarbón (a 5 y 10 mg por hectárea) en comparación con el tratamiento estándar. Se sugiere que el biocarbón presente en el estiércol y en la aplicación de biocarbón pudo haber actuado como un biocida para los metanótrofos, lo que resultó en una reducción de la liberación de CH₄ con el tiempo. No obstante, no se detectaron variaciones sustanciales en las emisiones de óxido nitroso (N₂O) entre las distintas

modalidades de tratamiento. Por lo tanto, las aplicaciones de biocarbón-estírcol resultaron en una mejora en la productividad del grano y un aumento en el contenido de proteínas, en contraste con la utilización exclusiva de materia orgánica. Antecedentes nacionales

Ticona (17) exploró cómo distintas cantidades de biocarbón pueden reducir el nivel de acidez presente en la materia fisiográfica de Tahuaco. Se aplicó un diseño experimental completamente aleatorio con proporciones de biocarbón de 0%, 0.5%, 1%, 2%, 4%, 8% y 16%. Los resultados se describen a continuación: el biocarbón producido a partir de tallos de quinua demostró ser eficaz para reducir las concentraciones responsables de la acidez del sustrato de origen agrícola. La dosis más efectiva resultó ser la T3 (biocarbón al 2%), ya que aumentó el valor de pH en 1.40 unidades, reemplazando completamente la saturación de aluminio intercambiable en el complejo coloidal por otros cationes. Además, aumentó la conductividad eléctrica del suelo en 1.38 dS/cm. El biocarbón no generó un impacto estadísticamente relevante en la saturación intercambiable de calcio, magnesio ni en el contenido de materia orgánica. El material de enmienda, aplicado también, demostró su capacidad neutralizante en lo que respecta a la acidez. Por lo tanto, los tratamientos T3 (con biocarbón al 2%) y T4 (con biocarbón al 4%) obtuvieron los mejores resultados en la capacidad productiva de avena, alcanzando 17.84 y 17.89 toneladas por hectárea, respectivamente.

Zegarra (18) investigó el impacto del biocarbón derivado de las partes internas de los peces y los desechos procedentes de lagunas oxidables para mejorar las características de suelos áridos pertenecientes a la zona de Ancón, los suelos utilizados como muestra presentaban condiciones de sequedad, el experimento consistió en la aplicación de diferentes cantidades de biocarbón como enmienda: 0%, 5%, 10% y 15%. Los hallazgos demostraron que la especie *Solanum multifidum* tuvo un óptimo tiempo de crecimiento y germinación, en relación al estado fisiológico fue bueno principalmente con la aplicación de T2 que asume un 10% de biocarbón como enmienda, siendo este el más notable y considerable significativa, en relación a los análisis sobre parámetros físicos y químicos los suelos demostraron mejorar su absorción de nutrientes necesarios, además de mejorar su capacidad de intercambio entre cationes, demostrando que el biocarbón elaborado por una base biológica en combinación con desechos de lagunas de oxidación es efectivo para tratar suelos áridos.

Asto (19) examinó el impacto elaborado a partir de las excretas de cuy y cáscaras de naranja en las propiedades físicas y químicas de un suelo árido en Los Olivos. se aplicaron distintas cantidades de biocarbón: 0% (como grupo de control), 5% y 10%, la duración del experimento abarcó 3 meses, durante los cuales el suelo no recibió riego durante 11 semanas, seguidas de la aplicación de riego manual. Los resultados revelaron un contenido de humedad inicial del 0.9% y un nivel de pH de 7,

después de aplicar el tratamiento 1 (con un 5% de biocarbón), se logró un aumento en la humedad del suelo, alcanzando un valor final del 3%, en el tratamiento 2 (con un 10% de biocarbón), se alcanzó un nivel de humedad final del 4%, estos datos indican un incremento significativo en el contenido de agua del material fisiográfico, lo cual evidencia una mejora en sus propiedades físicas.

Obregón (20) evaluó el efecto del biocarbón elaborado a partir de biomasa vegetal y animal para reducir los niveles de conductividad eléctrica en suelos de Cañete. Se incorporó biocarbón en proporciones de 0%, 5%, 10% y 15% respectivamente durante un período de 90 días. Las características iniciales del material fisiográfico de estudio mostraron una conductividad eléctrica de 9.4 dS/m, un pH de 8, un contenido de agua del 9% y una textura franco-arenosa.

En relación con la salinidad del suelo, se aplicó el tratamiento T2 con un 5% de biocarbón, logrando una reducción a 7.4 dS/m. Con el tratamiento T3, al aplicar un 10% de biocarbón, se obtuvo el mejor resultado, reduciendo la conductividad eléctrica desde la concentración inicial hasta 3.6 dS/m. La adición de biocarbón en los tratamientos 2 y 3 (5% y 10%, respectivamente) redujo el valor de la conductividad eléctrica a 7 dS/m, mientras que el tratamiento T4, con un 15% de biocarbón, mostró la mayor disminución, alcanzando un pH de 6.2.

En conclusión, la incorporación de biocarbón logra disminuir la conductividad eléctrica, alcanzando niveles de salinidad adecuados para diversos tipos de suelos.

2.1.2 Antecedentes locales

Autoridad Nacional del Agua (21) realizó el primer y único estudio agrológico en el Valle de Tambo, en el que se reporta que el 65% de la extensión está cubierta por suelos normales, seguido por el 15% de suelos salinos y el 6% de suelos salino-sódicos, con un total de 1,424 ha y 558 ha, respectivamente. Las condiciones de salinidad fueron clasificadas como ligeramente salinas (4 a 8 mmhos/cm), que representan el 11.39% con 1,035 ha; fuertemente salinas (8 a 15 mmhos/cm), con el 4% y 415 ha; y muy fuertemente salinas (mayores a 15 mmhos/cm), con el 5% y 531 ha. Los autores recomendaron, para abordar este problema, el lavado por lixiviación, que consiste en aplicar agua de buena calidad sobre el suelo salino. Este proceso debe realizarse asegurando que el nivel freático no se encuentre cerca de la superficie, con el fin de eliminar las sales, evitar su acumulación en las semillas y, en última instancia, obtener un buen rendimiento de los cultivos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 El suelo

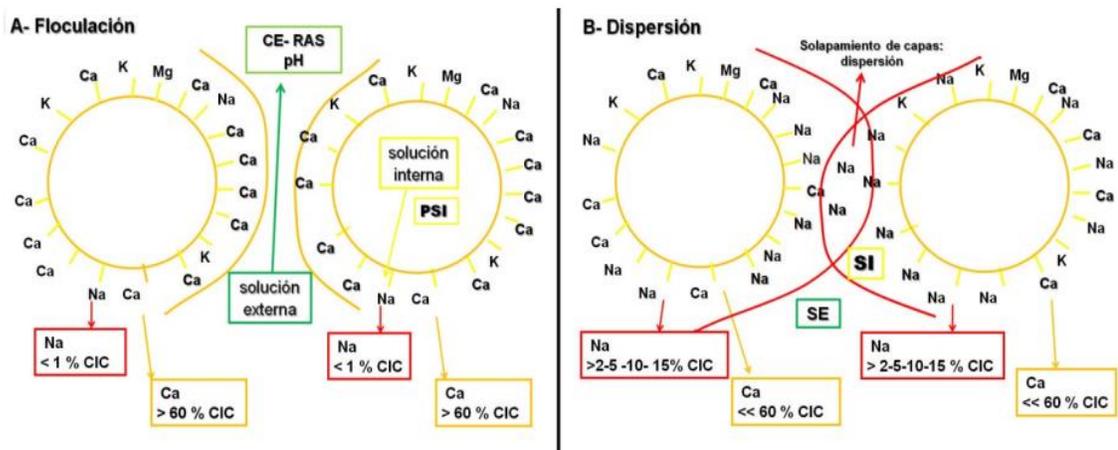
De acuerdo a Burbano-Orjuela (22) el suelo, constituye el medio abiótico del medio como un recurso natural limitado y no apto para regeneración, cumple múltiples funciones ecológicas o medioambientales, como ilustra su influencia en los procesos biogeoquímicos de elementos cruciales para la vida, como C, N, P, etc.; estos elementos son continuamente movidos desde los seres vivos hacia los componentes inanimados del planeta gracias a la energía disponible, no obstante, es ampliamente reconocido que el suelo desempeña un papel fundamental como el entorno natural que posibilita la producción de alimentos y materias primas, elementos vitales para la subsistencia de la sociedad a nivel global.

Los suelos en estado óptimo constituyen la base de ecosistemas y comunidades prósperas, tienen una conexión directa con aspectos fundamentales como la seguridad en el suministro de alimentos y la calidad de agua, así como con la salud humana, la capacidad de adaptación y mitigación en respuesta al cambio climático y la preservación de la biodiversidad son cruciales, por lo tanto, es de suma importancia prevenir la degradación del suelo, la cual puede ser resultado de la erosión, la pérdida de nutrientes y la merma de la integridad ecológica. Miner et al., (23).

2.2.2 Propiedades del suelo

Las características físicas de los suelos tienen una importancia significativa al momento de determinar su aptitud para diversos propósitos a los que se destinan, la calidad física de un suelo tiene un impacto significativo en su firmeza, capacidad de resistencia, facilidad para que las raíces se desarrollen, nivel de oxigenación, eficacia en el drenaje, capacidad para retener agua y nutrientes. Alconada y Lanfranco (24).

Figura 1 Intercambio iónico entre coloides y cationes.



Nota. En el esquema de la izquierda se presenta el suelo flocculado (A) y en el de la derecha dispersado (B), el intercambio iónico entre coloides y cationes en el suelo es un proceso en constante cambio que incide en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y desempeña un papel crucial en la química del suelo y la fertilidad. Fuente: Alconada y Lanfranco, (24).

2.2.3 Propiedades físicas del suelo

a) Textura

Como menciona Cárdenas y Barrios (25) la relación relativa de partículas minerales de diversos tamaños en un suelo se denomina textura del suelo. Estas partículas se dividen en tres categorías principales: arena, limo y arcilla. La capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, así como su permeabilidad y aireación, están influenciadas por su textura.

Figura 2 Triángulo de textura del suelo



Fuente: Extraído de Hang, (26).

b) Estructura

La configuración del suelo hace referencia a la organización de sus componentes agregados o grupos, la estructura tiene un impacto en la circulación de aire y la porosidad del suelo, la estructura del suelo puede ser granular, en bloques, prismática o laminar, dependiendo de la interacción entre las partes constituyentes del suelo y sus procesos físicos y biológicos. FAO, (27).

c) Profundidad

La profundidad del suelo corresponde a la distancia medida desde la superficie del suelo hasta la roca madre o la capa de roca impermeable debajo de la superficie del suelo, en general, una mayor profundidad del suelo brinda un espacio adicional para el crecimiento de las raíces de las plantas, permitiéndoles acceder a agua y nutrientes. Cárdenas & Barrios, (25).

d) Color

El tono del suelo es una característica física que puede suministrar información sobre la composición del material orgánico presente en la materia fisiográfica, este sustrato representa una variedad de colores, que varían desde tonalidades oscuras hasta claras, dependiendo de la concentración de materia orgánica y minerales presentes. FAO, (27).

2.2.4 Propiedades químicas del suelo

a) pH

La acidez o alcalinidad del suelo se determina mediante el pH, que es una medida que clasifica si el suelo es ácido, neutral o alcalino (básico), el pH se evalúa en una escala que se extiende desde 0 hasta 14, siendo 7 considerado como punto neutro, si los valores son inferiores a 7, denotan acidez, mientras que valores por encima de 7 señalan alcalinidad (Cremona y Enríquez, 2020). Los suelos con un pH entre 6.0 y 6.5 son ligeramente ácidos; en este rango, la mayoría de los nutrientes están disponibles para las plantas, lo que favorece su absorción y el crecimiento saludable de los cultivos. Los suelos con un pH entre 6.5 y 7.0 son considerados neutros. Este rango es óptimo para la disponibilidad de nutrientes esenciales y para la actividad microbiana beneficiosa, que son cruciales para la salud del suelo y el desarrollo de las plantas. Finalmente, los suelos con un pH entre 7.0 y 7.5 son ligeramente alcalinos; aunque son menos ácidos, la mayoría de los cultivos todavía pueden crecer bien en este rango (Arconada, 28).

b) Conductividad eléctrica (salinidad)

La conductividad eléctrica del suelo determina la capacidad del suelo para llevar a cabo la conducción de electricidad y es comúnmente utilizada como indicador de la salinidad del suelo, los suelos salinos contienen una alta concentración de sales disueltas, tales como cloruros, sulfatos y carbonatos, la conductividad eléctrica se expresa en unidades de decisiemens por metro (dS/m) o milisiemens por centímetro (mS/cm) Cremona y Enríquez, (29). El rango de valores de conductividad eléctrica (CE) para una buena calidad de suelos, especialmente en términos de salinidad para la mayoría de los cultivos, es el siguiente:

- Los suelos con una CE entre 0 y 2 dS/m se consideran de baja salinidad, adecuados para la mayoría de los cultivos. En este rango, los problemas de salinidad son poco probables y el crecimiento de las plantas no se ve afectado.
- Cuando la CE se encuentra entre 2 y 4 dS/m, los suelos presentan una salinidad moderada. En este caso, algunos cultivos sensibles a la salinidad pueden experimentar estrés y una reducción en el crecimiento.
- Una CE entre 4 y 8 dS/m indica suelos con alta salinidad. En estos suelos, solo los cultivos tolerantes a la sal pueden crecer adecuadamente. La mayoría de los cultivos experimentarán estrés y una disminución significativa en la productividad.
- Los suelos con una CE superior a 8 dS/m presentan una salinidad muy alta. La mayoría de los cultivos no pueden crecer en estas condiciones debido al estrés salino extremo.

Para mantener una buena calidad de suelos y asegurar una alta productividad agrícola, es ideal que la conductividad eléctrica se mantenga por debajo de 2 dS/m. Cuando la CE excede este valor, es importante implementar prácticas de manejo adecuadas para reducir la salinidad del suelo y minimizar el impacto negativo en los cultivos. Meneses (30).

c) **Materia orgánica**

La materia orgánica, que se encuentra en la composición química del suelo, incluye sustancias o componentes de origen orgánico en proceso de descomposición, como los residuos de plantas y animales. Esta materia orgánica influye directamente en la calidad y la estructura del suelo, además de actuar como una reserva de carbono, contribuyendo a su fertilidad. Bueno Buevas y Fernández Lizarazo, (31). Valores Referenciales de Materia Orgánica en el Suelo:

- **< 1%:** Indica un bajo contenido de materia orgánica, resultando en suelos pobres en nutrientes y con una estructura deficiente.
- **1% - 3%:** Representa un contenido moderado de materia orgánica, suficiente para mantener una fertilidad razonable y una estructura del suelo adecuada para muchos cultivos.
- **3% - 6%:** Denota un alto contenido de materia orgánica, lo que resulta en suelos muy fértiles con una excelente estructura, y una alta capacidad de retención de agua y nutrientes.

- **6%:** Señala un contenido muy alto de materia orgánica, generalmente encontrado en suelos específicos como los de zonas de humedales.

La presencia adecuada de materia orgánica en el suelo no solo mejora su estructura y la retención de agua, sino que también incrementa la actividad biológica del suelo, promoviendo un entorno más saludable para el crecimiento de las plantas. Esto es esencial para mantener la productividad agrícola y la sostenibilidad del ecosistema del suelo. Veiras y Soto (32).

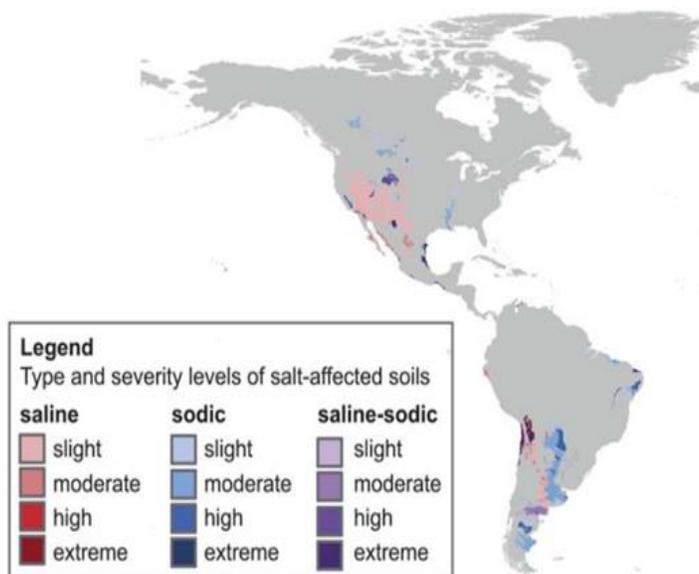
d) Capacidad de intercambio catiónico

Capacidad de la materia fisiográfica para retener y liberar cationes, conocidos generalmente como el C, Mg, K y Na; una CIC alta indica que el suelo puede retener más cationes y es fundamental para comprender cómo se retienen y ponen a disposición los nutrientes en el suelo. Bueno Buevas y Fernández Lizarazo, (31).

2.2.5 Suelos afectados por sales

Según Alconada y Lanfranco (24), la investigación sobre la formación de suelos influidos por la presencia de sales, que comenzó con la escuela rusa en el siglo XX, y los criterios utilizados para clasificar los suelos halomórficos basados en su origen, contenido y tipos de sales, han generado diferentes opiniones y debates.

Figura 3 Suelos afectados por salinidad en el continente americano



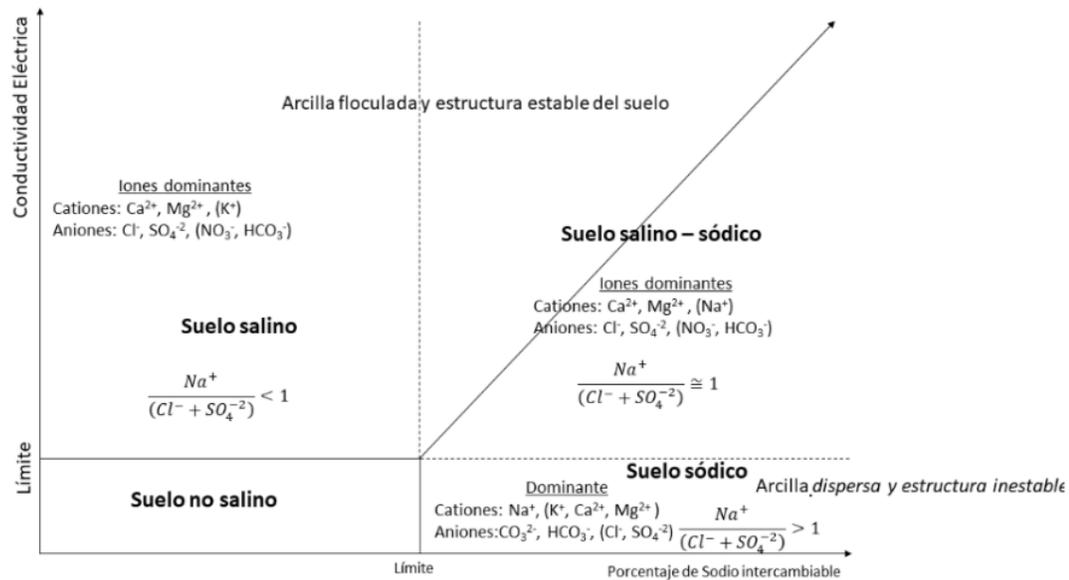
Nota. América del Sur principalmente está afectado por la salinidad y sodicidad en un rango moderado a extremo. Fuente: Adaptación de Wicke et al., (33).

La salinidad es un fenómeno en el cual el suelo acumula una concentración excesiva de sales más solubles que el sulfato de calcio. En términos generales, estas sales están compuestas principalmente por cloruros y sulfatos de sodio y magnesio. Cuando se mide la conductividad eléctrica en una muestra saturada de suelo a una temperatura de 25°C, los valores superan los 4 dS/m. Además, el porcentaje de sodio intercambiable es inferior al 15%. Estos valores afectan la presión osmótica, lo que tiene un impacto directo sobre la vegetación y consecuencias significativas en el crecimiento de la mayoría de los cultivos y otras plantas que no poseen adaptaciones especializadas (Mata-Fernández, 34).

2.2.6 Salinidad del suelo

Según Aguirre Hernández (35), la conductividad eléctrica se emplea de manera habitual para evaluar la salinidad en el suelo, esta medida se fundamenta en la velocidad con la que una corriente eléctrica atraviesa una solución salina, y esta velocidad está vinculada a la cantidad de sales presente en la solución, para medirla, se utiliza un dispositivo llamado conductímetro, y las mediciones se realizan a una temperatura estándar de 25°C; antes, la conductividad eléctrica se expresaba en unidades de "mmhos/cm", pero en la actualidad se usa más comúnmente la unidad "dS/m" (decisiemens por metro), y ambas medidas son equivalentes (1 mmhos/cm es igual a 1 dS/m).

Figura 4 Interacción de partículas de suelo con sales



Nota. Las partículas del suelo, tienen cargas positivas o negativas eléctricas en su superficie, los iones en las sales, como el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , son atraídos o repelidos, en suelos salinos, los cationes como el sodio pueden desplazar a los otros cationes en el intercambio catiónico, lo que lleva a problemas de sodificación del suelo, cuando se agrega agua al suelo, las sales presentes pueden disolverse en el agua y convertirse en iones. Fuente: Extraído de Omuto et al., (36).

2.2.7 Clasificación americana de suelos salinos

Para identificar si un suelo tiene una cantidad elevada de salinidad, se han propuesto diversos límites arbitrarios. En términos generales, se considera que cuando la concentración de sales en el suelo supera el 1%, las plantas comienzan a experimentar efectos adversos. No obstante, el laboratorio de salinidad de los Estados Unidos ha establecido un umbral de 4 dS/m como el punto a partir del cual la salinidad comienza a afectar negativamente a las plantas. En términos prácticos, esto significa que cuando la conductividad eléctrica del suelo supera los 4 dS/m, la presencia de sales puede perjudicar el crecimiento y desarrollo de las plantas. Montico, (37).

Tabla 2 Grados de salinidad

| Cantidad de sales solubles (dS/m) | Clasificación |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 0-2 | Masa fisiográfica normal |
| 2-4 | Masa fisiográfica ligeramente salina |
| 4-8 | Masa fisiográfica salina |

| | |
|------|---|
| 8-16 | Masa fisiográfica fuertemente salina |
| > 16 | Masa fisiográfica extremadamente salina |

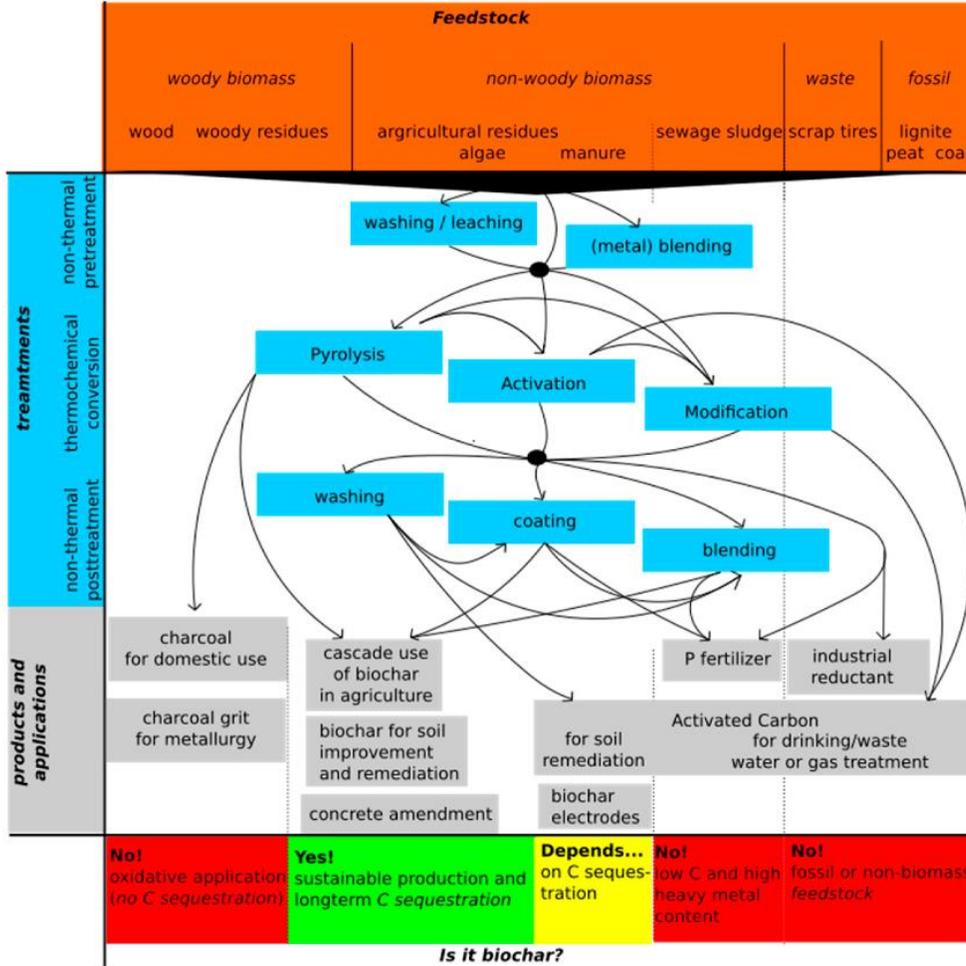
Nota. 1 mmhos/cm = 1 dS/m. Fuente: Adaptación en base a la Ces del laboratorio de salinidad de los Estados Unidos.

2.2.8 Biocarbón pirogénico

De acuerdo con Hagemann et al. (38), en 2015 definieron el término “biocarbón pirogénico” como los materiales compuestos principalmente de carbono, producto de procesos térmicos y químicos. En este contexto, la materia prima proviene de la biomasa, que es materia orgánica originada tanto de fuentes vegetales como animales. El proceso de formación de estos materiales comienza con la biomasa, que se convierte en carbón a través de un proceso geológico llamado carbonización. En el camino hacia la formación del carbón, existen etapas intermedias, como la turba y el lignito. Sin embargo, el biocarbón, el carbón vegetal y el carbón activado son productos de procesos termoquímicos, y se considera biocarbón pirogénico aunque no compartan similitudes en términos de composición elemental y enlaces químicos.

El biocarbón es un material derivado de la carbonización de la biomasa y tiene diversos usos. Originalmente, la discusión sobre el biocarbón se centraba en su aplicación directa en la agricultura, especialmente en suelos pobres, para mejorar la productividad agrícola. Sin embargo, con el tiempo, se ha reconocido que el biocarbón tiene múltiples usos y beneficios en diferentes áreas. Gou et al., (39)

Figura 5 Materiales carbonosos pirogénicos



Nota. En la figura, el color naranja representa las materias primas que se utilizan para producir biocarbón pirogénico, como la biomasa, el color azul representa los tratamientos y procesos involucrados en la producción como la carbonización o pirólisis, el color gris muestra las diversas aplicaciones que abarcan desde la mejora del suelo hasta su uso en tecnologías avanzadas. Fuente: Extraído de Hagemann et al., (38).

O'Connor et al. (40) sustenta que los suelos agrícolas están compuestos por partículas minerales, materia orgánica y espacios vacíos. Cuando el suelo se satura con sales, se ve comprometida su capacidad para retener tanto agua como nutrientes. Sin embargo, al interactuar con el biocarbón, un material carbonoso producido mediante la carbonización de biomasa, cuya estructura porosa le permite retener agua y nutrientes, se puede proporcionar refugio a microorganismos beneficiosos y estabilizar la materia orgánica en el suelo. Aunque el biocarbón no elimina las sales, puede

contribuir a mitigar los impactos negativos de estas al mejorar la estructura del suelo y su capacidad de retención de agua.

Figura 6 Interacción Biocarbón pirogénico, sales y suelo



Fuente: Extraído de Osman et al., (41).

2.3. Bases conceptuales

2.3.1 Biocarbón pirogénico

Material de carbono producido mediante pirólisis de biomasa, que posee características porosas y beneficiosas para el suelo, la utilización de biocarbón proporciona oportunidades para mejorar la fertilidad del suelo y la gestión de nutrientes y la mitigación del cambio climático. Reisser et al., (6).

2.3.2 Suelo

Capa compleja y dinámica de la corteza terrestre que sustenta la vida vegetal y animal, proporciona nutrientes esenciales, retiene y filtra el agua, y desempeña un papel fundamental en los ecosistemas y la producción de alimentos. Alcalde Aparicio, (10).

2.3.3 Suelo agrícola

El suelo agrícola es una subcategoría del suelo que ha sido modificado y gestionado para apoyar la producción de cultivos agrícolas, se caracteriza por su capacidad para proporcionar los nutrientes,

el drenaje y la retención de agua necesarios para el crecimiento saludable de los cultivos. Ticona (17).

2.3.4 Salinidad

Esta propiedad se refiere a la presencia de una concentración elevada de sales solubles, como cloruro de sodio, sulfato de sodio y carbonato de sodio, en el suelo. Estas sales pueden acumularse debido a varios factores, como el riego con agua salina, la evaporación del agua en zonas áridas y semiáridas, la presencia de sales en los fertilizantes y la insuficiencia de un sistema de drenaje adecuado. Visconti y De Paz, (42).

Figura 7 Esquema de Causas de Salinización



Nota. Este esquema muestra cómo diferentes factores contribuyen a la salinización del suelo, afectando negativamente la productividad agrícola y la salud del suelo en el Valle de Tambo, extraído de Paz et al., (43).

Causas de la Salinización

- **Irrigación con Agua de Mala Calidad:** El agua del río Tambo tiene altos niveles de salinidad y sodicidad, con indicadores de calidad como una Conductividad Eléctrica (CE) de 4.5 dS/m y un contenido de Sodio (Na) de 450 mg/L.

- **Mal Drenaje:** La estructura deficiente del suelo y la falta de un adecuado sistema de drenaje conducen a la acumulación de sales en la zona de raíces.
- **Evaporación Alta:** Las altas tasas de evaporación en el clima árido del Valle de Tambo concentran las sales en la superficie del suelo.
- **Uso de Fertilizantes:** El uso excesivo de fertilizantes químicos puede aumentar la concentración de sales en el suelo. Paz et al., (43).

2.3.5 Suelos salinos

Suelos que albergan una cantidad considerable de sales que se disuelven en el terreno, las sustancias involucradas principalmente son el cloruro de sodio, sulfato de sodio y carbonato de sodio y diversos iones. Mata-Fernandez et al., (34).

2.3.6 Suelos sódicos

Suelos que poseen una cantidad elevada de sodio intercambiable en proporción a otros cationes, como el calcio y el magnesio, llevando a la creación de conglomerados dispersos, lo que afecta adversamente la retención de humedad y la oxigenación. Mata-Fernandez et al., (34).

2.3.7 Suelos salino-sódicos

Los terrenos salino-sódicos abarcan tanto sales que pueden disolverse como un nivel elevado de sodio intercambiable, resulta ser complejo en lo que respecta a la configuración del suelo. Mata-Fernandez et al., (34).

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método, tipo o alcance de la investigación

3.1.1 Tipo de investigación

En la presente investigación, el tipo de investigación fue aplicado ya que, según Hernández et al. (44) este tipo de estudio se enfoca en proporcionar soluciones prácticas y aplicables al problema de una realidad objetiva, es el caso de reducir la salinidad en suelos agrícolas del arenal Valle Tambo aplicando biocarbón pirogénico como alternativa para mejorar la calidad de suelos.

3.1.2 Diseño de investigación

En la presente investigación, el diseño de investigación fue experimental, ya que Hernández et al. (44) sustenta que los estudios de este tipo son los que manipulan una variable para realizar el análisis de datos, en el contexto del estudio se evaluará la eficacia de biocarbón pirogénico en la disminución de salinidad de los suelos.

3.1.3 Nivel de investigación

En la presente investigación el nivel de investigación fue explicativo, de acuerdo al alcance de investigación La Madriz (45) menciona que se centran en explicar los factores que contribuyen a un fenómeno y sus resultados, por ello se quiere explicar si el uso del biocarbón pirogénico tiene un efecto en la reducción de la salinidad de suelos agrícolas del arenal Valle de Tambo.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1 Materiales, insumos y equipos

Los materiales para la fase de campo son:

- Bolsas herméticas 50x60 cm de 120 micrones
- Lampa mediana
- Pico mediano
- Cubeta de plástico de 20 litros
- Panel de polietileno de baja densidad 30x30 cm
- Cilindro de aluminio de 20 litros

- Tamiz N° 10" y N° 20"
- Tabla de Munsell
- Triangulo textural
- Cinta métrica de 50 m

Los materiales para la fase de laboratorio son:

Figura 8 Materiales de laboratorio



Los insumos para el estudio experimental son:

- Agua destilada 10 litros

Los equipos a utilizar son:

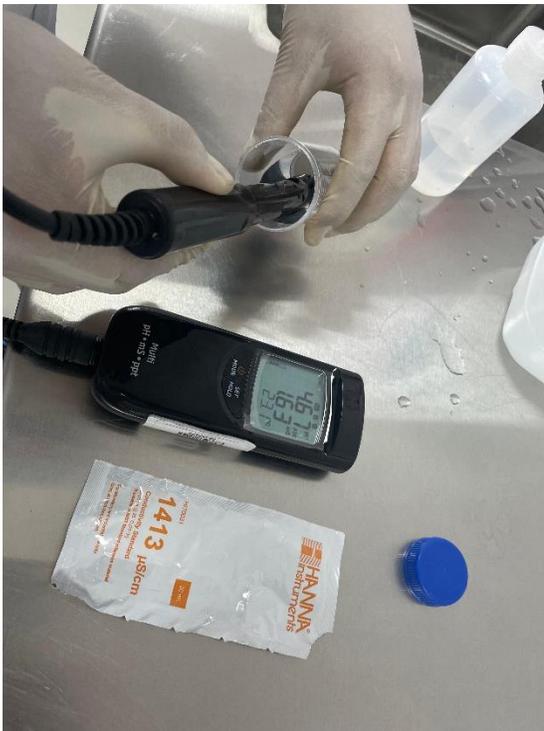
Figura 9 Balanza analítica modelo Henkel de capacidad 1kg



Figura 10 Estufa eléctrica estándar



Figura 11 Multiparámetro HANNA MODELO H1991301



Métodos

El método para obtener las muestras de suelo de Valle de Tambo se basará en la Guía para el Muestreo de suelos en el marco del decreto supremo N° 002-2013-MINAM, estándares de calidad ambiental (ECA) para el muestreo de suelos establecida por el MINAM (46); se empleará el tipo de muestreo de identificación (MI), ya que este tiene como finalidad investigar la concentración de componentes que indican la presencia de contaminación. Para ello, se demostró, mediante un análisis de laboratorio inicial, la existencia de sales solubles en parámetros no aceptables en los suelos del Arenal Valle de Tambo, determinándose 9 puntos de muestreo según la guía mencionada.

La técnica de muestreo se sustenta en el documento nacional del MINAM (46), donde para muestras superficiales se emplea el método del cuarteo, que significa partir la muestra en cuatro cuadrantes para tomar solo 1/4 de la muestra general, en el caso de Valle de Tambo la profundidad de muestreo según uso del suelo se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 3 Profundidad de muestreo con relación al uso específico

| Uso de suelo | Profundidad de muestreo (cm) |
|--|-------------------------------------|
| Suelo agrícola | 0-30 30-60 |
| Suelo de parques, residencial | 0-10 10-30 |
| Suelo extractivo, industrial, comercial | 0-10 |

Fuente: Recopilado del marco D.S. N°002-2013 del MINAM.

La profundidad superficial generalmente abarca desde la superficie del suelo hasta unos 30 cm, aunque puede extenderse hasta 50 cm en ciertos casos. La capa superficial del suelo es fundamental para la fertilidad agrícola, la estabilidad estructural en construcciones y el mantenimiento de ecosistemas saludables ANA (7)

Para la producción del biocarbón, se utilizó el método planteado donde se evidencia que la pirólisis lenta ofrece un mayor rendimiento en comparación con el pirólisis rápido; el pirólisis lento de acuerdo a Puentes Escobar y Rodríguez Carlosama (47) se lleva a cabo a temperaturas más bajas y durante un período de tiempo más prolongado, lo que permite que la biomasa permanezca en contacto por más tiempo. Esta prolongada interacción favorece las reacciones de recombinación de las moléculas de alquitrán, que consisten en su unión para formar moléculas más grandes y complejas.

3.3. Técnicas e instrumentos

3.3.1 Técnicas

Las técnicas que se emplearon en la investigación fueron la recolección de datos, observación directa y experimental, ya que este tipo de técnicas permiten analizar los resultados concretos y comportamiento del fenómeno.

3.3.2 Instrumentos

Se emplearon fichas técnicas:

- Ficha de producción de biocarbón
- Ficha de análisis inicial y final del suelo
- Ficha de tratamientos

Los instrumentos fueron validados por la calificación de expertos y el análisis alfa de Cronbach para determinar la confiabilidad.

3.4. Población y Muestra

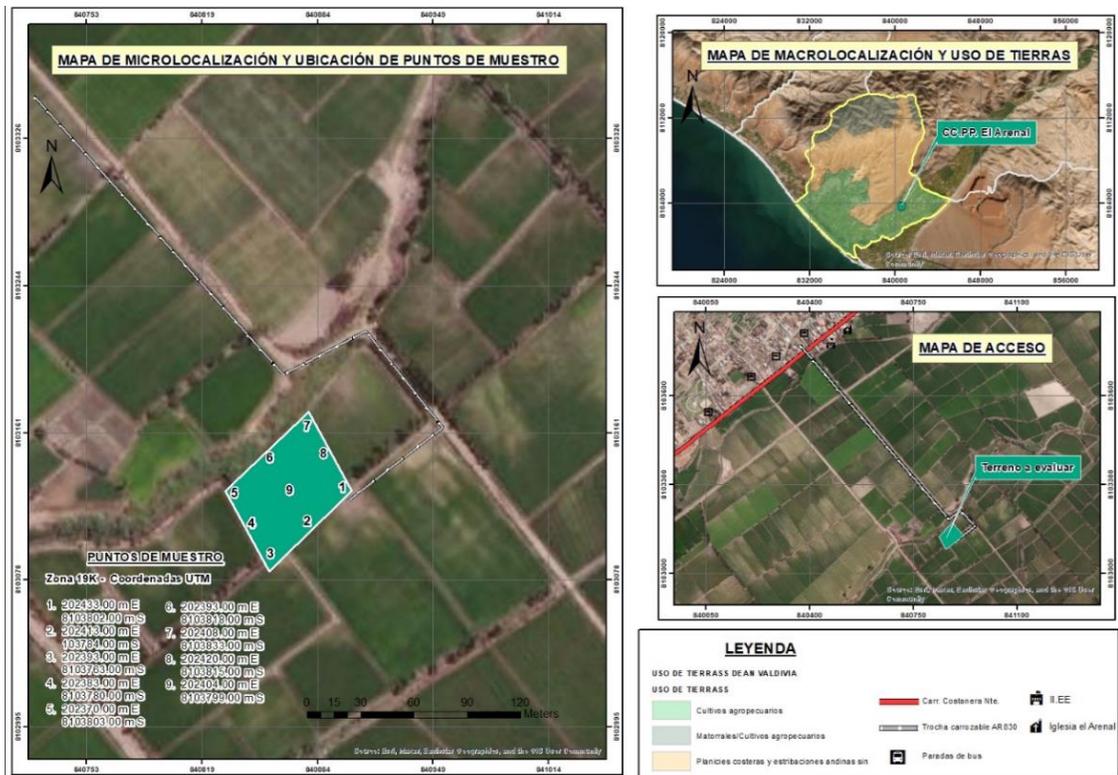
3.4.1 Población

La población está representada por la extensión de terreno dedicada a la agricultura, con cultivos de dos tipos definidos por temporada: uno denominado "alta", donde se siembra únicamente arroz, y otro conocido como "baja", donde se cultivan generalmente ajos, cebolla, entre otros. El campo agrícola está delimitado por un total de 0.60 ha en el Arenal Valle de Tambo, provincia de Islay, departamento de Arequipa.

Figura 12 Toma panorámica



Figura 13 Mapa de ubicación geográfica



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4 *Tabla de coordenadas de la ubicación*

| Puntos de muestreo | Coordenada Este | Coordenada Norte |
|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| Punto N°1 | 202433.00 m E | 8103802.00 m S |
| Punto N°2 | 202413.00 m E | 8103784.00 m S |
| Punto N°3 | 202393.00 m E | 8103763.00 m S |
| Punto N°4 | 202383.00 m E | 8103780.00 m S |
| Punto N°5 | 202370.00 m E | 8103803.00 m S |
| Punto N°6 | 202393.00 m E | 8103818.00 m S |
| Punto N°7 | 202408.00 m E | 8103833.00 m S |
| Punto N°8 | 202420.00 m E | 8103815.00 m S |
| Punto N°9 | 202404.00 m E | 8103799.00 m S |

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Muestra

La muestra de material fisiográfico se recolectará a partir de puntos de muestreo, de acuerdo a la normativa del MINAM, (46), en el proceso de muestreo de identificación, se requieren un mínimo de 9 puntos de muestreo para una superficie potencial de 1 hectárea.

Figura 14 *Tabla de muestreo de identificación según área*

| ÁREA DE POTENCIAL INTERÉS (HA) | PUNTOS DE MUESTREO EN TOTAL |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| 0,1 | 4 |
| 0,5 | 6 |
| 1 | 9 |
| 2 | 15 |
| 3 | 19 |
| 4 | 21 |
| 5 | 23 |
| 10 | 30 |
| 15 | 33 |
| 20 | 36 |
| 25 | 38 |
| 30 | 40 |
| 40 | 42 |
| 50 | 44 |
| 100 | 50 |

Nota: Extraído del MINAM, donde la metodología de muestreo utilizada por el Ministerio del Ambiente (MINAM) establece que, para un área potencial de interés de 1 hectárea, se determinan 9 puntos de muestreo. Esto permite lograr una representatividad espacial, ya que al dividir 1 hectárea en 9 puntos de muestreo se cubre de manera más representativa la variabilidad espacial del área, asegurando que se consideren diferentes microambientes dentro de la hectárea.

3.4.3 Muestreo

El muestreo es simple y al azar, ya que para obtener las muestras se delimitará un área para recolectar material fisiográfico en 9 puntos.

3.5. Procedimiento

3.5.1 Producción de biocarbón pirogénico

La metodología para la producción de biocarbón pirogénico está estandarizada en el Perú por Lefebvre et al. (48). Sin embargo, para carbonizar la biomasa, se empleó el método de pirolisis lenta, y se deben seguir los siguientes procedimientos.

Producción de Biomasa a Carbono en Eucalipto según Sarangano y Tenenpaguay (49):

1. Relación Biomasa-Carbono:

Generalmente, se estima que aproximadamente el 50% de la biomasa seca de los árboles es carbono. Esto significa que, si tienes 1 tonelada de biomasa seca, alrededor de 0.5 toneladas serían carbono.

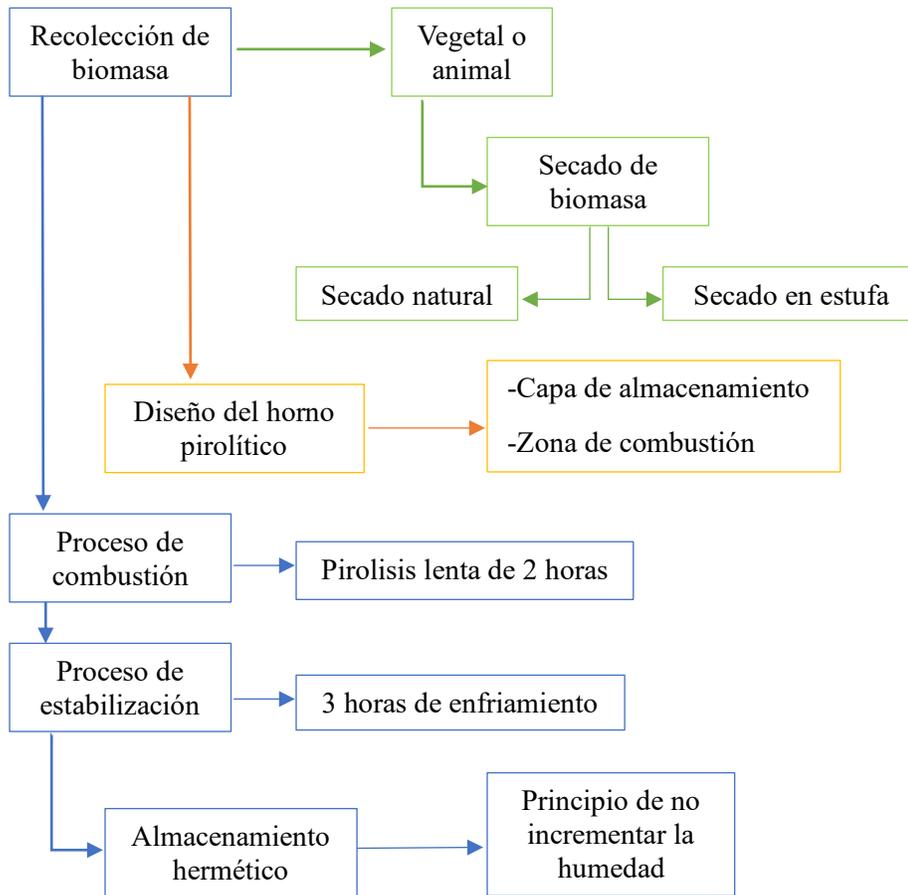
2. Factores que Afectan la Producción de Biomasa y Carbono:

Especie de Eucalipto: Existen varias especies de eucalipto, y cada una tiene diferentes tasas de crecimiento y producción de biomasa.

Condiciones de Crecimiento: Factores como el tipo de suelo, disponibilidad de agua, clima, y prácticas de manejo (fertilización, riego) influyen en la producción de biomasa.

Edad del Árbol: Los árboles jóvenes tienden a tener tasas de crecimiento más rápidas y, por lo tanto, pueden acumular biomasa más rápidamente en comparación con árboles más viejos.

Figura 15 Diagrama de flujo para producción de biocarbón pirogénico



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16 Producción del Biochar



Figura 17 Producción del Biochar



Tabla 5 Datos a recopilar en la producción de biocarbón pirogénico

| Condiciones climáticas | Materia prima |
|-------------------------------|----------------------|
| Fecha | Biomasa |
| Temperatura ambiental (°C) | Entrada (kg) |
| Humedad ambiental (%) | Salida (kg) |

Fuente: Elaboración propia.

3.5.2 Muestreo de suelo agrícola del arenal Valle de Tambo

Se interpreto el suelo por su uso de acuerdo a lo establecido por el MINAM (46).

- Se delimito el área de estudio en formato kmz, empleando Google Earth, teniendo en cuenta los siguientes criterios:
 1. Características Geográficas y Topográficas
 2. Biodiversidad
 3. Uso del Suelo
 4. Factores Socioeconómicos
 5. Datos Climáticos
 6. Accesibilidad
 7. Amenazas y Riesgos
- Se determinaron los puntos de muestreo de identificación, según el área y metodología del MINAM, 9 puntos de muestreo.
- Se realizo un tamizaje de las muestras de suelo en el tamiz número 20 y tamiz número 10.
- Se acondiciono y transportaron las muestras a laboratorio para su evaluación inicial.

3.5.3 Análisis de parámetros fisicoquímicos

Tabla 6 *Métodos para analizar los parámetros fisicoquímicos*

| Insumo | Metodología | Parámetro | Unidad |
|---------------|--------------------|-------------------------|---------------|
| | Kjeldahl | Carbono total | % |
| Biocarbón | Gravimetría | Humedad | % |
| pirogénico | Mallas Tyler | Tamaño de partículas | mm |
| | Potenciometría | pH | 1-14 |
| Masa | Electrométrico | Conductividad eléctrica | dS/m |
| fisiográfica | Triangulo textural | Textura | Escala |
| | Tabla Munsell | Color | Escala |

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Tratamiento del suelo con biocarbón pirogénico

- Se realizó el pesaje total del biocarbón.
- Se mezclaron las muestras de suelo con el porcentaje agregado de biocarbón 10%, 20% y 30%.
- Se distribuyeron los tratamientos según un diseño experimental.
- Se acondicionó el tratamiento de biocarbón en las cámaras fabricadas.
- Se monitoreó constantemente por 2 meses para obtener los resultados.

3.5.5 Procedimientos

3.5.1 Preparación de muestras con tratamiento

Para la preparación de las muestras, primero se extrajeron las muestras de los 9 puntos determinados.

Luego, se utilizaron envases de plástico con una capacidad de 500 ml. En cada envase, se pesaron 300 gramos de muestra para cada repetición.

Se añadió biocarbón en proporciones de 10%, 20% y 30% a cada muestra, de acuerdo con el número de tratamiento correspondiente. Esto resultó en pesos finales de 330 gramos, 360 gramos y 390 gramos para cada envase, respectivamente.

Posteriormente, se mezclaron las muestras de suelo con el biocarbón añadido, asegurando una integración homogénea del tratamiento en cada muestra. Finalmente, cada envase fue rotulado adecuadamente, diferenciando claramente el número de tratamiento y la repetición correspondiente.

Figura 18 Extracción de muestra 1



Figura 19 Extracción de muestra 2



Figura 20 Pesado de cada muestra con la incorporación del Biocarbón



Figura 21 Tratamientos con incorporación de 10 %, 20 % y 30 %



3.5.2 Caracterización del suelo

Textura de suelo: Se determinó la textura de suelo en base a la densidad aparente del suelo.

$$\rho a = \frac{msfse}{Vt}$$

Donde:

ρa = densidad aparente

msfse= masa de suelo fina seca a la estufa

Vt= Volumen total

Equipos

- Balanza analítica De precisión de 0.01 g
- Horno A 105 °C por 24H
- Materiales
- Muestra de suelo (MSFSE)
- Latas cilíndricas
- Probeta 100 ml
- Varilla de vidrio gruesa de 30 cm de largo
- Espátula De aluminio
- Papel kraf En pliego
- Agua destilada pH neutro 50 ml

Procedimiento

1. Pesar la lata (26.4g) y agregar masa de suelo hasta llenar la lata (131.4g), por lo tanto, la masa de suelo es de 105g.
2. Llevar al horno por 24h a 105° C

Figura 22 Horno



3. Pesar nuevamente y pesar (127.5g) y restar el peso de la lata obteniendo la muestra de msfse 101.1g (1)
4. Colocar las muestras en la probeta, identificándola.

Figura 23 Identificación de muestras



5. Dejar caer la probeta sobre el tampón de jebe 10 veces desde una altura de 5 cm. Anotar el volumen final de la muestra en la línea (2).
6. Calcular la densidad aparente, dividiendo los datos de las líneas 1 (masa de suelo) entre los datos de la Línea 2 (volumen del suelo)

$$pa = \frac{101.1g}{65cm^3}$$

$$pa = 1.56 \text{ g/cm}^3$$

3.5.3 Densidad real – método del Picnómetro

Equipos

- Balanza analítica De precisión de 0.01 g
- Materiales
- 2 probeta 100 ml
- Espátula De aluminio
- Reactivos
- Agua destilada pH neutro 50 ml

Procedimiento

1. Pesar la muestra se suelo 40g (p1)
2. Pesar la probeta con el agua 100ml y determinar el peso total 217.2g (p2)

Figura 24 Pesado de probetas



3. Agregar la muestra de suelo a la probeta con el agua y pesar; 241.3g (p3)

Figura 25 Muestra de suelo con agua



4. Posterior a ello se realizó el cálculo para determinar el volumen desplazado que se obtiene en base al peso del agua desplazado que se realiza con la siguiente formula:

$$vd = p2 - (p3 - p1)$$

$$vd = 217.2 - (241.3 - 40)$$

$$vd = 15.9$$

5. Finalmente calculamos la densidad real del suelo

$$dr = \frac{m}{v}$$

$$dr = \frac{40g}{15.9cm^3}$$

$$dr = 2.52 \text{ g/cm}^3$$

3.5.4 Materia orgánica

Equipos

- Mufla a 450° por 24h
- Balanza analítica De precisión de 0.01 g
- Guantes anticolor
- Materiales
- Crisol de porcelana
- Espátula de aluminio
- Pinzas metálicas

Figura 26 Materiales utilizados



Procedimiento

1. Primero se pesa el crisol de porcelana 22.9 g (pe)

Figura 27 Pesado de muestra



2. Se agregaron los 10g de muestra de suelo en el crisol (pi), luego se programó la mufla a 450° por 24h y finalmente se introduce el crisol a la mufla por 24h.

Figura 28 Muestra en la Mufla



3. Pasadas las 24h retirar la muestra de suelo con ayuda del guante termino y las pinzas, se pesó el crisol con la muestra de suelo 32.5g (pf)
4. Finalmente calcular por diferencia de pesos la cantidad de materia orgánica carbonizada

$$MO = \left(\frac{pi - (pf - pe)}{pi} \right) x 100$$

$$MO = \left(\frac{10 - (32.5 - 22.9)}{10} \right) x 100$$

$$MO = \left(\frac{10 - 9.6}{10} \right) x 100$$

$$MO = (0.04)x100$$

$$MO = 4\%$$

3.5.5 Humedad gravimétrica

$$Hg = \left(\frac{pi - pf}{pi} \right) x 100$$

Equipos

- Balanza analítica De precisión de 0.01 g
- Horno A 105 °C por 24H
- Materiales
- Muestra de suelo 105g
- Envase de porcelana

Procedimiento

1. Pesar los 105g de muestra de suelo (pi)
2. Llevarlo al horno por 24H a 105°
3. Pesar nuevamente la msfse 101.1g (pf)

$$Hg = \left(\frac{105 - 101.1}{105} \right) x 100$$

$$Hg = (0.037)x100$$

$$Hg = 3.71\%$$

3.5.6 Conductividad eléctrica y pH

Equipos

- Multiparámetro HANNA H1991301
- Balanza analítica De precisión de 0.01 g
- Materiales
- 5 probetas de 100ml
- 5 vasos de precipitado de 100ml

- Tamiz N°20
- 2 varillas de vidrio
- 1 espátula de aluminio
- 2 pizetas
- Muestras de suelo con los diferentes tratamientos
- Muestra de suelo control sin tratamiento
- Agua destilada pH neutro
- Soluciones Buffer HANNA pH 7.01 - HI70031
- Soluciones Buffer HANNA 1413 μ S/cm - HI70031

Procedimiento

1. Se inició usando las soluciones buffer pH 7.01 y 1413 μ S/cm para verificar la calibración del equipo (multiparámetro) y asegurar la veracidad de los resultados obtenidos.
2. Se realizó una relación 2:1.
3. Se tamizaron las muestras de las diferentes repeticiones con el tratamiento.
4. Se pesaron 40 g de muestra de suelo tamizado y se colocaron en los diferentes vasos de precipitados.
5. Se midieron 80 ml de agua destilada en las probetas.
6. Se añadieron los 80 ml de agua destilada en los vasos de precipitados con la muestra de suelo y se comenzó a mover con la varilla de vidrio durante 10 a 15 minutos por vaso.
7. Se dejó reposar las muestras durante aproximadamente 5 minutos para que las sales solubles se establezcan en la parte superior del vaso de precipitados.
8. Se pasó el líquido estabilizado a las probetas para proceder con la medición.
9. Se procedió a medir la conductividad eléctrica y el pH con el multiparámetro y se anotaron los resultados.

3.5.6 Diseño experimental Split-Plot

El diseño experimental será un diseño simple al azar, la asignación aleatoria de tratamientos ayuda a eliminar cualquier sesgo o influencia no deseada en los resultados, el diseño al azar ayuda a manejar la variabilidad estadística que puede surgir en los datos experimentales (Arias Gonzales, 2018). Los tratamientos para experimentación son:

Ensayo control: 0 % de biocarbón pirogénico + 300 g de suelo salino (control)

T1: 10 % de biocarbón pirogénico + 300 g de suelo salino

T2: 20 % de biocarbón pirogénico + 300 g de suelo salino

T3: 30 % de biocarbón pirogénico + 300 g de suelo salino

El número de repeticiones por cada tratamiento se calculó aplicando una ecuación en función a los grados de libertad y número de tratamientos, para el estudio se realizarán cinco repeticiones por cada tratamiento:

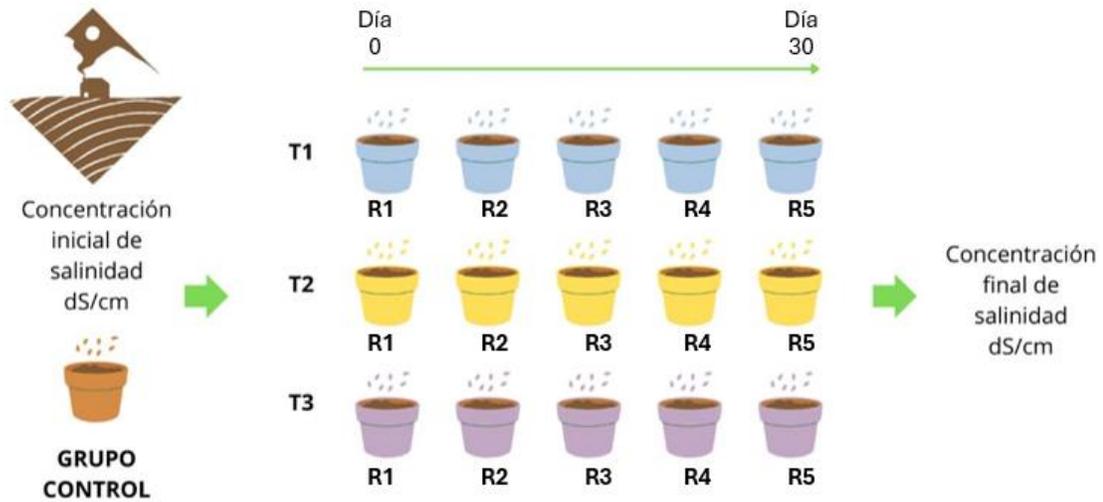
$$gl = t \times (r - 1)$$

$$12 = 3 \times (r - 1)$$

$$5 = r$$

Las unidades experimentales se definen por el producto de los tratamientos y repeticiones con un total de 15, serán sometidas a tratamientos con biocarbón pirogénico en un periodo de 30 días.

Figura 29 Grafico de operación experimental



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza (ANOVA) se empleará para determinar si existen diferencias significativas entre los tratamientos en lo que respecta a la variable de interés (concentración de salinidad en el suelo), se expresa en la siguiente tabla y con los supuestos estadísticos.

La prueba de hipótesis se compone de:

H_0 : El biocarbón pirogénico no influye en la reducción de la salinidad de los suelos agrícolas de Valle de Tambo.

H_a : El biocarbón pirogénico influye en la reducción de la salinidad de los suelos agrícolas de Valle de Tambo.

Tabla 7 Análisis de varianza

| Salinidad | | | | | |
|------------------|-------------------|----|------------------|---|------|
| | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. |
| Entre grupos | | | | | 0.00 |
| Dentro de grupos | | | | | |
| Total | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

La norma se fundamenta en el nivel de significancia, si el nivel de significancia es igual o menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula en favor de la hipótesis alternativa, por otro lado, cuando el nivel de significancia supera 0.05, se acepta la hipótesis nula en lugar de la hipótesis alternativa.

3.6. Procesamiento y Análisis

Para la evaluación y análisis de datos se evaluará la distribución normal de datos, seguido de un análisis de varianza, asimismo se aplicará estadística descriptiva e inferencial para plasmar los resultados extraídos del software IBM SPSS y Microsoft Excel.

Prueba de Normalidad: Según (50) la prueba de normalidad se utiliza para determinar si un conjunto de datos sigue una distribución normal. La distribución normal es una suposición común en muchos análisis estadísticos, y verificar esta suposición es un paso importante antes de aplicar ciertos métodos estadísticos.

Prueba de Shapiro-Wilk:

- Es una de las pruebas más potentes para evaluar la normalidad.
- El estadístico de la prueba W de Shapiro-Wilk es tal que valores cercanos a 1 indican una distribución normal.
- Se utiliza para conjuntos de datos pequeños y medianos.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S):

- Compara la distribución de la muestra con una distribución normal estándar.
- Menos potente que la prueba de Shapiro-Wilk, especialmente para tamaños de muestra pequeños.

Prueba de Anderson-Darling:

- Una modificación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov que da más peso a los extremos de la distribución.
- Adecuada para detectar desviaciones en los extremos de la distribución.

Prueba de Lilliefors:

- Una adaptación de la prueba K-S que no requiere conocer de antemano los parámetros de la distribución normal.

- Útil para muestras de tamaño moderado.

Interpretación:

Si el p-valor es menor que el nivel de significancia (típicamente 0.05), se rechaza la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal.

Prueba de Wilcoxon: La prueba de Wilcoxon se utiliza para comparar dos muestras emparejadas o relacionadas cuando no se puede asumir que las diferencias entre las dos muestras son normalmente distribuidas. Existen dos versiones principales:

Prueba de Signos de Wilcoxon (Prueba de Wilcoxon para muestras pareadas):

- Compara dos muestras relacionadas, como las mediciones antes y después de un tratamiento en los mismos individuos.
- Es una alternativa no paramétrica a la prueba t de muestras pareadas.

Prueba de Rango con Signo de Wilcoxon:

- Similar a la prueba de signos, pero tiene en cuenta no solo la dirección de las diferencias (signo) sino también la magnitud de las diferencias.
- Más potente que la prueba de signos de Wilcoxon.

Aplicaciones:

- Comparación de medidas repetidas (antes y después de un tratamiento).
- Comparación de dos grupos relacionados.

Procedimiento para la Prueba de Rango con Signo de Wilcoxon:

- Calcular las diferencias entre pares de observaciones.
- Ordenar las diferencias absolutas y asignarles rangos.
- Sumar los rangos de las diferencias positivas y negativas por separado.
- El estadístico de la prueba es el menor de las dos sumas.
- Comparar el estadístico de la prueba con un valor crítico de la tabla de Wilcoxon o calcular el p-valor.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados de la investigación

Biochar

Cantidad de Biocarbón obtenido:

El 14 de enero de 2024 se llevó a cabo en Sachaca, Arequipa, el proceso de obtención de biocarbón vegetal. La producción se basó en biomasa vegetal, específicamente ramas de eucalipto, las cuales fueron secadas de forma natural. El peso total de la biomasa vegetal utilizada fue de 28.9 kg.

Para este proceso, se acondicionó un cilindro que fue utilizado como horno artesanal. Se seleccionó un área apartada para llevar a cabo la combustión de la biomasa vegetal, asegurando las condiciones necesarias para un proceso seguro y controlado. La combustión se realizó mediante pirolisis lenta, comenzando a las 5:36 a. m. y finalizando a las 7:36 a. m., con una duración total de 2 horas.

Una vez finalizado el proceso de combustión, el biocarbón obtenido fue enfriado durante 5 horas. Posteriormente, se procedió a recoger el biocarbón, el cual fue embolsado herméticamente para su posterior pesaje. El peso final del biocarbón fue de 6.856 kg, lo que resultó en un rendimiento de combustión del 23.723%.

Características físicas y químicas del biochar según Zegarra (2015)

Para determinar la calidad del biocarbón, se realizaron análisis de humedad, pH y color en laboratorio. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Humedad: 22.61%
- pH: 11.66
- Color: código 10 YR 3/1, que corresponde a un gris muy oscuro (very dark gray).

Tabla 8 *Ficha de producción de biochar a base de biomasa vegetal*

| Ficha de producción de biochar a base de biomasa vegetal | | | |
|---|-----------------------------|------------------------|------------------|
| Evaluador | Branco Eduardo Huamani Diaz | | |
| Fecha | 14/01/2024 | Lugar | Sachaca Arequipa |
| Peso inicial Biomasa (kg) | 28.9 | | |
| Tipo de horno | Artesanal | | |
| Hora de Inicio | 5:36 a. m. | Hora de termino | 7:36 a. m. |
| Peso de biochar (kg) | 6.856 | | |
| Rendimiento de combustión (%) | 23.72 | | |
| % Humedad | 22.61 | | |
| pH (1-14) | 11.66 | | |

Análisis: Se obtuvo un peso de biochar de 6.856 kg, este resultado refleja un rendimiento de combustión del 23.72%, lo que indica la eficiencia del proceso de conversión de biomasa en biochar, donde este rendimiento puede considerarse bajo, lo cual es común en hornos artesanales debido a la falta de control preciso sobre las condiciones de combustión.

El biochar producido presenta un contenido de humedad del 22.61%, lo cual es un dato relevante, ya que la humedad residual puede afectar tanto el almacenamiento como la aplicación del biochar. Un contenido de humedad más bajo sería deseable para ciertos usos del biochar. El pH del biochar resultante es de 11.66, lo que indica que es altamente alcalino. Este alto pH puede tener implicaciones importantes para su aplicación en suelos, especialmente en aquellos que son ácidos, ya que podría ayudar a neutralizar la acidez del suelo y mejorar sus propiedades químicas.

Resultados de la caracterización del suelo

Tabla 9 *Caracterización de suelo*

| Caracterización de suelo | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------|------------|
| Investigador | Branco E. Huamani Diaz | Fecha | 25/01/2024 |
| Densidad Aparente | 1.038 | | |
| Textura de suelo | Arcilloso | | |
| Humedad gravimétrica | 3.85 | | |
| Color | Ligh yeloowish brow - (10YR 6/4) | | |
| Densidad Real | 2.515 | | |

Análisis: El suelo caracterizado es arcilloso, con una densidad aparente baja que sugiere buena porosidad, aunque su baja humedad gravimétrica podría indicar la necesidad de mejorar su capacidad de retención de agua. El color marrón amarillento claro y la densidad real apuntan a un suelo con características minerales típicas. Así, manejar adecuadamente este tipo de suelo implica considerar prácticas que mejoren su estructura y capacidad de retención de agua, como la incorporación de materia orgánica y técnicas de cultivo que prevengan la compactación y la erosión.

Resultados de las características químicas de suelo sin tratamiento

La ficha de análisis del suelo salino sin dosificaciones del tratamiento con biocarbón pirogénico al 0% (Código: T0R0) proporciona una visión de las propiedades del suelo a lo largo del tiempo durante un período de experimentación que abarca desde el 24 de enero de 2024 hasta el 21 de febrero de 2024.

Tabla 10 *Ficha de análisis del suelo salino sin dosificaciones del tratamiento*

| <i>Ficha de análisis del suelo salino sin dosificaciones del tratamiento</i> | | | |
|---|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| <i>Investigador</i> | <i>Branco Huamani Diaz</i> | <i>Fecha inicio</i> | <i>24/01/2024</i> |
| <i>Tratamiento</i> | <i>Tratamiento N°0</i> | <i>Fecha fin</i> | <i>21/02/2024</i> |

Biocarbón pirogénico al 0%

| Código: TOR0 | Días de la experimentación | | |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| | 24/01/2024 | 7/02/2024 | 21/02/2024 |
| Conductividad eléctrica | 11.08 | 11.17 | 11.04 |
| pH | 8.18 | 8.55 | 8.25 |

Análisis: La conductividad eléctrica, que mide la salinidad del suelo, muestra una ligera variación a lo largo del período de experimentación. Inicialmente, la CE es de 11.08 dS/m, aumenta levemente a 11.17 dS/m a mediados del período, y luego disminuye a 11.04 dS/m al final. Estos valores indican que el suelo es salino y que la salinidad se mantiene relativamente constante durante el experimento, con solo pequeñas fluctuaciones.

El pH del suelo presenta un comportamiento similar, comenzando en 8.18, aumentando a 8.55 y luego disminuyendo a 8.25. Estos valores indican que el suelo es alcalino, y el aumento intermedio podría estar relacionado con cambios en la composición química del suelo o en las condiciones ambientales, mientras que la disminución posterior sugiere una leve estabilización.

Así, tanto la conductividad eléctrica como el pH del suelo indican que el suelo mantiene características salinas y alcalinas a lo largo del período de experimentación, con solo pequeñas fluctuaciones en los valores medidos.

Tabla 11 Relación de conductividad eléctrica con Ph

| pH del Suelo | Conductividad Eléctrica (dS/m) | Interpretación |
|---------------------|---------------------------------------|---|
| < 5.5 | < 0.5 | Suelo ácido y baja salinidad |
| 5.5 - 6.5 | 0.5 - 1.0 | Suelo ligeramente ácido |
| 6.5 - 7.5 | 1.0 - 2.0 | Suelo neutro a ligeramente alcalino |
| 7.5 - 8.5 | 2.0 - 4.0 | Suelo moderadamente alcalino |
| > 8.5 | > 4.0 | Suelo altamente alcalino y alta salinidad |

Nota. Extraído de Ramírez et al. (2020)

Resultados de las características químicas de suelo con tratamiento

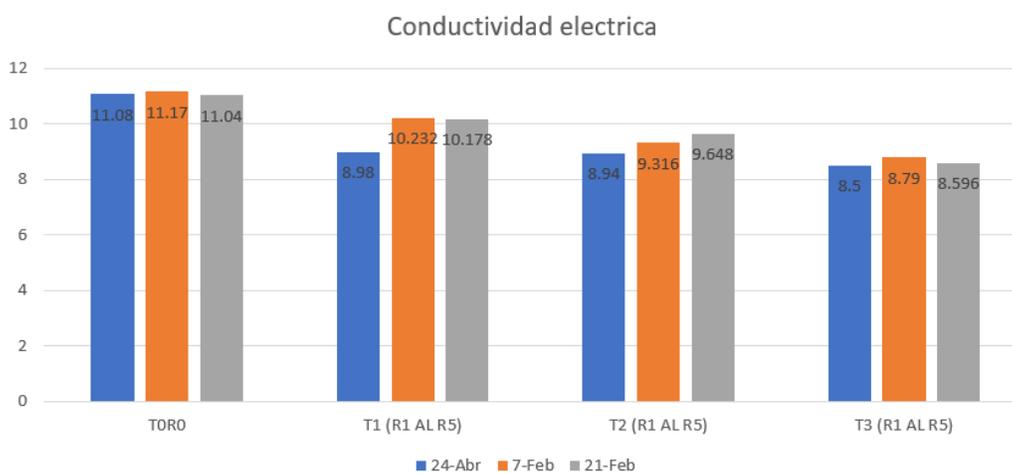
Tabla 12 *Ficha de análisis de suelo salino con Biocarbón pirogénico*

| Dosis | Repeticiones | 24/01/2024 | 07/02/2024 | 21/02/2024 |
|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0% | T0R0 | 11.08 | 11.17 | 11.04 |
| Al 10% | T1R1 | 9.5 | 10.05 | 10.73 |
| | T1R2 | 8.8 | 9.91 | 10.3 |
| | T1R3 | 8.9 | 10.34 | 9.74 |
| | T1R4 | 8.7 | 10.47 | 10.02 |
| | T1R5 | 9 | 10.39 | 10.1 |
| Al 20% | T2R1 | 9 | 9.88 | 9.55 |
| | T2R2 | 8.9 | 9.5 | 9.35 |
| | T2R3 | 9.1 | 9.95 | 9.53 |
| | T2R4 | 8.8 | 9.37 | 9.74 |
| | T2R5 | 8.9 | 8.88 | 10.07 |
| Al 30% | T3R1 | 8.6 | 8.99 | 8.59 |
| | T3R2 | 8.7 | 8.59 | 8.35 |
| | T3R3 | 8.4 | 8.91 | 8.83 |
| | T3R4 | 8.3 | 8.97 | 8.52 |
| | T3R5 | 8.5 | 8.49 | 8.69 |

Tabla 13 Resumen de resultados de suelo salino con Biocarbón pirogénico

| Conductividad Eléctrica | T0R0 | T1(R1-R5) | T2 (R1-R5) | T3 (R1-R5) |
|--------------------------------|--------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 24-Ene | 11.08 | 8.98 | 8.94 | 8.5 |
| 7-Feb | 11.17 | 10.232 | 9.316 | 8.79 |
| 21-Feb | 11.04 | 10.178 | 9.648 | 8.596 |

Figura 30 Resumen conductividad eléctrica



Análisis: La conductividad eléctrica en el tratamiento TOR0 (sin tratamiento) se mantiene alta y relativamente constante, con valores ligeramente superiores a 11 dS/m. Esto indica que el suelo es altamente salino y la salinidad permanece estable a lo largo del período de estudio.

En el tratamiento T1, la conductividad eléctrica (CE) aumenta de 8.98 dS/m a 10.232 dS/m entre enero y febrero, y luego disminuye ligeramente a 10.178 dS/m al final del período. Aunque la CE es menor que en TOR0, el aumento observado sugiere que este tratamiento podría estar influyendo en la salinidad, posiblemente debido a la lixiviación de sales o cambios en las condiciones ambientales.

En el tratamiento T2, la CE muestra un incremento desde 8.94 dS/m hasta 9.316 dS/m, seguido por un ligero aumento a 9.648 dS/m. Aunque la salinidad es más baja en comparación con TOR0 y T1, los cambios en la CE sugieren cierta estabilización, pero con una tendencia a aumentar, lo que indica la persistente presencia de sales.

El tratamiento T3 presenta los valores más bajos de CE entre todos los tratamientos, comenzando en 8.5 dS/m, aumentando a 8.79 dS/m y luego disminuyendo ligeramente a 8.596 dS/m. Estos valores indican una menor salinidad y una mayor efectividad en la reducción de la salinidad del suelo en comparación con los otros tratamientos. Este tratamiento es el más efectivo para reducir y estabilizar la salinidad del suelo, manteniendo los valores de CE más bajos entre todos los tratamientos.

Prueba de Hipótesis

Conductividad eléctrica

1.- Prueba de normalidad para Conductividad eléctrica – Salinidad

Ho: Los datos presentan características de una población normal

H1: Los datos no presentan características de una población normal

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor $< 0,05$; se rechaza Ho y se acepta H1.

Tabla 14 Prueba de normalidad para Conductividad eléctrica

| | Shapiro-Wilk | | |
|---------------------------------|--------------|----|------|
| | Estadístico | Gf | Sig. |
| Conductividad eléctrica Antes | ,880 | 15 | ,048 |
| Conductividad eléctrica Después | ,824 | 15 | ,008 |

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

Dado que el valor de p es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula (H_0), lo que indica que los datos de conductividad eléctrica antes y después de la implementación del tratamiento no siguen una distribución normal.

Por lo tanto, para evaluar la eficiencia del tratamiento, se debe aplicar la prueba no paramétrica de Wilcoxon.

2.- Prueba de Wilcoxon para Conductividad eléctrica

H_0 : La aplicación el tratamiento con biocarbón pirogénico no reduce la conductividad eléctrica

H_1 : La aplicación el tratamiento con biocarbón pirogénico reduce la conductividad eléctrica

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor $< 0,05$; se rechaza H_0 y se acepta H_1 .

Tabla 15 Prueba de Wilcoxon para Conductividad eléctrica

| Hipótesis nula | Prueba | Sig. | Decisión |
|---|---|------|----------------------------|
| La mediana de diferencias entre Conductividad eléctrica Antes y Conductividad eléctrica Después es igual a 0. | Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas | ,001 | Rechace la hipótesis nula. |

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: Tomado de SPSS v 26.

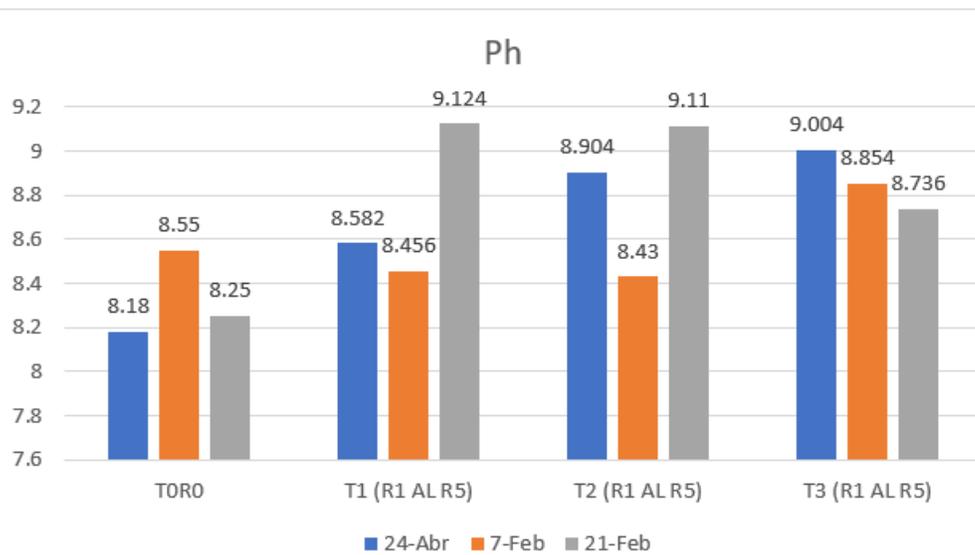
Resultado /Conclusión

En la tabla se evidenció que los resultados alcanzaron un valor de p de 0.001 (significativo), lo que indica que, dado que $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Esto sugiere un contraste significativo en la conductividad eléctrica antes y después de la aplicación del tratamiento con biocarbón pirogénico, lo que indica que el tratamiento permite reducir la conductividad eléctrica en las muestras de suelo evaluadas.

Tabla 16 Resumen de los tratamientos respecto al Ph

| Ph | T0R0 | T1 (R1 AL R5) | T2 (R1 AL R5) | T3 (R1 AL R5) |
|--------|------|---------------|---------------|---------------|
| 24-Ene | 8.18 | 8.582 | 8.904 | 9.004 |
| 7-Feb | 8.55 | 8.456 | 8.43 | 8.854 |
| 21-Feb | 8.25 | 9.124 | 9.11 | 8.736 |

Figura 31 Resumen de resultados de Ph



Análisis: TOR0 muestra consistentemente los valores más altos de conductividad eléctrica en todas las fechas, lo que sugiere que esta condición podría tener factores que aumentan la conductividad. En cambio, las condiciones T1, T2 y T3 generalmente muestran valores más bajos, los cuales disminuyen gradualmente. Esto indica que el suelo sin tratamiento se mantiene ligeramente alcalino, con fluctuaciones menores en su alcalinidad.

pH: Se observa una tendencia notable en la que los valores de pH son más altos (más alcalinos) en las condiciones T1, T2 y T3, en comparación con TOR0. La variación en el pH sugiere que las condiciones de tratamiento (T1, T2 y T3) influyen en el pH, llevándolo hacia niveles más alcalinos, aunque con algunas fluctuaciones entre las diferentes fechas de medición.

- TOR0: El pH del control se mantiene en el rango alcalino con ligeras variaciones, indicando que el suelo sin tratamiento permanece relativamente estable en términos de alcalinidad.
- T1: Este tratamiento muestra un comportamiento variable con un aumento significativo del pH al final del período, lo que podría sugerir una acumulación de alcalinidad o la influencia de procesos químicos específicos.
- T2: Similar a T1, el pH en T2 también varía, disminuyendo inicialmente y luego aumentando significativamente, lo que puede requerir un ajuste en el tratamiento para estabilizar el pH.

- T3: Este tratamiento es el más efectivo en la reducción del pH, con una tendencia a estabilizarse en un rango ligeramente más bajo que los otros tratamientos, lo que sugiere una mejora en la neutralización de la alcalinidad.

Estas observaciones sugieren que las condiciones etiquetadas como T1, T2 y T3 tienen un impacto considerable tanto en la conductividad eléctrica como en los niveles de pH. Según las tablas y gráficos, el tratamiento más efectivo es el tercero, con un 30% de incorporación de biocarbón pirogénico.

pH

1.- Prueba de normalidad para pH

Ho: Los datos presentan características de una población normal

H1: Los datos no presentan características de una población normal

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor < 0,05; se rechaza Ho y se acepta H1.

Tabla 17 Prueba de normalidad para pH

| | Shapiro-Wilk | | |
|------------|--------------|----|------|
| | Estadístico | gl | Sig. |
| pH Antes | ,899 | 15 | ,093 |
| pH Después | ,840 | 15 | ,013 |

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

Dado que el valor de p es menor que 0.05 para el pH después del tratamiento, se rechaza la hipótesis nula (Ho). Esto significa que los datos de la conductividad eléctrica después de la implementación del tratamiento no siguen una distribución normal.

Por lo tanto, para evaluar la eficiencia del tratamiento, se debe aplicar la prueba no paramétrica de Wilcoxon.

2.- Prueba de normalidad para pH

Ho: La aplicación el tratamiento con biocarbón pirogénico no reduce el pH

H1: La aplicación el tratamiento con biocarbón pirogénico reduce el pH

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor $< 0,05$; se rechaza H_0 y se acepta H_1 .

Tabla 18 Prueba de Wilcoxon para pH

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig. | Decisión |
|-----------|---|---|------|----------------------------|
| pH | La mediana de diferencias entre pH Antes y pH Después es igual a 0. | Prueba de rangos con signo de Wilcoxon para muestras relacionadas | ,001 | Rechace la hipótesis nula. |

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

En la tabla se evidenció que los resultados alcanzaron un valor de p de 0.001 (significativo), lo que indica que, dado que $p < 0.05$, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Esto significa que existe un contraste significativo entre el pH antes y después de la aplicación del tratamiento con biocarbón pirogénico, lo que sugiere que el tratamiento permite reducir el pH en las muestras de suelo evaluadas.

Análisis de resultados con relación a los tratamientos

- **Nivel de Salinidad Inicial:** Alto, con una CE alrededor de 11 dS/m en el tratamiento control.
- **Nivel de Salinidad Post-Tratamiento:** Reducción observada en todos los tratamientos con biocarbón pirogénico, con T3 mostrando la mayor y más estable reducción.
- **Tratamiento Más Efectivo:** T3, que redujo y estabilizó la salinidad del suelo de manera más efectiva que T1 y T2.

Conductividad eléctrica

Resultados al día 24/01/24.

Planteamiento 1.

1.- Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica

Ho: Se asumen que las varianzas son iguales

H1: Se asumen que las varianzas no son iguales

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor $< 0,05$; se rechaza Ho y se acepta H1.

Tabla 19 Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica día 0

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-------|------|
| 2,958 | 2 | 12 | ,090 |
| 1,254 | 2 | 12 | ,320 |
| 1,254 | 2 | 7,129 | ,341 |
| 2,851 | 2 | 12 | ,097 |

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

Como la significancia o p-valor mayor de 0,05 entonces se acepta la Ho, es decir que las varianzas son iguales en el primer día de tratamiento.

Resultados al día 7/02/2024

1.- Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica

Ho: Se asumen que las varianzas son iguales

H1: Se asumen que las varianzas no son iguales

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor $< 0,05$; se rechaza Ho y se acepta H1.

Tabla 20 Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica día 15

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|------------------------------|------------|------------|-------------|
| 1,916 | 2 | 12 | ,190 |
| ,820 | 2 | 12 | ,464 |
| ,820 | 2 | 6,465 | ,482 |
| 1,869 | 2 | 12 | ,197 |

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

Como la significancia o p-valor mayor de 0,05 entonces se acepta la Ho, es decir que las varianzas son iguales en el día 15 de tratamiento.

Resultados al día 21/02/2024.

1.- Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica

Ho: Se asumen que las varianzas son iguales

H1: Se asumen que las varianzas no son iguales

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor < 0,05; se rechaza Ho y se acepta H1.

Tabla 21 Prueba de homogeneidad de varianzas para Conductividad eléctrica día 30

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|------------------------------|------------|------------|-------------|
| 1,383 | 2 | 12 | ,288 |
| 1,309 | 2 | 12 | ,306 |
| 1,309 | 2 | 6,138 | ,336 |
| 1,412 | 2 | 12 | ,281 |

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

Como la significancia o p-valor mayor de 0,05 entonces se acepta la Ho, es decir que las varianzas son iguales en el día 30 de tratamiento.

Resultados pH

1.- Prueba de homogeneidad de varianzas para pH

Ho: Se asumen que las varianzas son iguales

H1: Se asumen que las varianzas no son iguales

Regla de decisión

Se plantea que una significancia (sig.) o p-valor $< 0,05$; se rechaza Ho y se acepta H1.

Tabla 22 Prueba de homogeneidad de varianzas para pH

| Estadístico de Levene | gl1 | gl2 | Sig. |
|-----------------------|-----|-------|------|
| 3,833 | 2 | 12 | ,052 |
| 1,522 | 2 | 12 | ,258 |
| 1,522 | 2 | 7,782 | ,277 |
| 3,655 | 2 | 12 | ,058 |

Nota: Tomado de SPSS v 26.

Resultado /Conclusión

Como la significancia o p-valor mayor de 0,05 entonces se acepta la Ho, es decir que las varianzas son iguales.

4.2. Discusión de resultados

Los tratamientos con biocarbón mostraron una notable reducción en los valores de conductividad eléctrica del suelo. Específicamente, el tratamiento con un 30% de biocarbón resultó en la mayor disminución de la salinidad, reduciendo los valores de conductividad eléctrica de 11.17 dS/m (control) a un rango de entre 8.5 y 8.79 dS/m. Este resultado es consistente con las observaciones de Ngoc-Thang et al. (15), quienes encontraron que el biocarbón puede reducir la salinidad del suelo mediante la adsorción de iones salinos y la mejora de la capacidad de retención de agua del suelo.

Además de reducir la salinidad, los tratamientos con biocarbón también provocaron un incremento en el pH del suelo. Los valores de pH para los suelos tratados con biocarbón oscilaron entre 8.456 y 9.124, en comparación con el rango de 8.18 a 8.55 para el control. Estos resultados son coherentes con los estudios de Ticona (17), quien reportó que el biocarbón puede aumentar el pH del suelo debido a su naturaleza alcalina, lo cual es beneficioso para la neutralización de suelos ácidos y la mejora de la disponibilidad de nutrientes.

La reducción de la salinidad del suelo y el aumento del pH pueden atribuirse a varias propiedades fisicoquímicas del biocarbón. El biocarbón tiene una alta capacidad de adsorción debido a su estructura porosa, lo que permite retener iones salinos y mejorar la estructura del suelo (Atai et al., 12). Además, su capacidad para aumentar el pH del suelo puede ayudar a neutralizar la acidez, creando un ambiente más favorable para el crecimiento de las plantas. El biocarbón pirogénico muestra un gran potencial para la mejora de suelos salinos en el Valle de Tambo, Arequipa. La implementación de esta tecnología podría ser una solución efectiva y sostenible para los problemas de salinidad del suelo, mejorando así la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental en la región.

CONCLUSIONES:

- La aplicación de biocarbón pirogénico mostró una reducción significativa del 48% en la salinidad del suelo en las 9 muestras. Esta reducción es esencial para mejorar la calidad del suelo y su capacidad para soportar cultivos. El biocarbón pirogénico no solo redujo la salinidad, sino que también mejoró otras propiedades del suelo, como la retención de agua y la estructura del suelo, lo que puede contribuir a un aumento en el rendimiento de los cultivos. Los tratamientos con biocarbón pirogénico resultaron en una disminución notable de la salinidad del suelo. Las parcelas tratadas con biocarbón mostraron valores de conductividad eléctrica reducidos, siendo el tratamiento con un 30% de biocarbón el que presentó los mayores beneficios. El biocarbón mejoró la capacidad del suelo para adsorber y retener sales, reduciendo así su disponibilidad en la solución del suelo.
- La evaluación inicial de la salinidad del suelo, medida como conductividad eléctrica (CE), indicó niveles altos de salinidad en el tratamiento control (T0R0), con valores alrededor de 11 dS/m. Esto establece un punto de referencia importante para comparar la efectividad de los tratamientos con biocarbón pirogénico.
- Los datos post-tratamiento muestran que todos los tratamientos con biocarbón pirogénico (T1, T2 y T3) lograron reducir la salinidad del suelo en comparación con el control. En particular, el tratamiento T3 presentó la mayor reducción en la conductividad eléctrica, con valores que disminuyeron hasta 8.5 dS/m en la primera medición y se estabilizaron alrededor de 8.6 dS/m. Los tratamientos T1 y T2 también redujeron la salinidad, pero con fluctuaciones más notables y menos efectividad en comparación con T3.
- El tratamiento T3 (R1 al R5) fue el más efectivo en la reducción de la salinidad del suelo. Desde la primera medición, T3 mostró los valores más bajos de CE y una tendencia a estabilizarse en un nivel significativamente menor que los otros tratamientos. Esto sugiere que T3 es el tratamiento óptimo para reducir la salinidad en los suelos agrícolas del arenal Valle de Tambo.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios adicionales para evaluar los efectos a largo plazo del biocarbón en la salud del suelo y la productividad de los cultivos.
- Promover la investigación y el desarrollo de biocarbón a partir de diferentes tipos de biomasa para optimizar su efectividad en distintos contextos agrícolas.
- Complementar el tratamiento con otras prácticas de manejo de suelos, como la incorporación de materia orgánica y la mejora del drenaje.
- Se recomienda implementar el uso de biocarbón pirogénico en las prácticas agrícolas del Valle de Tambo, especialmente en áreas con problemas de salinidad.
- Asegurar que la fuente de biomasa sea renovable y no compita con otros usos esenciales, como la alimentación o el hábitat natural.
- Fomentar programas de capacitación para los agricultores sobre la producción y aplicación de biocarbón pirogénico para maximizar sus beneficios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *Estudio geológico del domo salino de Añana para su posible utilización como almacenamiento de energía.* **Moya, J.** 2018.
2. *Moving forward on remote sensing of soil salinity at regional scale.* . **Scudiero, E., y otros.** 2016, *Frontiers in Environmental Science.*
3. *Improving the monitoring of root zone soil salinity under vegetation cover conditions by combining canopy spectral information and crop growth parameters.* . **Shi, X., y otros.** 2023, *Frontiers Plant Science.*
4. *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes. Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile.* **Gonzales, P.** 2019.
5. *Estado mundial del recurso suelo. In Organización de las Naciones Unidas.* **FAO.** 2016.
6. *Pyrogenic carbon in soils: A literature-based inventory and a global estimation of its content in soil organic carbon and stocks.* **Reisser, M., y otros.** 2016.
7. *ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD AFIANZAMIENTO HIDRICO DEL VALLE TAMBO.* **ANA.** 2005.
8. *Estudio Hidrogeológico en la cuenca Río Tambo.* **INGEMMET.** 2012.
9. *Valle de Tambo-Islay: Territorio, agua y derechos locales en riesgo con la minería a tajo abierto. In Red Muqui, Red de Propuesta y Acción.* **Castillo, M., Chávez, M. y Gallardo, M.** 2011.
10. *Impulso y difusión de la ciencia del suelo en el 2015, año internacional de los suelos.* **Alcalde, S.** 3, s.l. : Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra, 2015, Vol. 23.
11. **Vitor, A.** “*REDUCCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE CADMIO HACIA LA PLANTA UTILIZANDO SUSTANCIAS HÚMICAS EN SUELOS AGRÍCOLAS CONTAMINADOS*”. 2018.
12. *Efficacy of bioadmixtures in reducing the influence of salinity on the bioremediation of oil-contaminated soil. Science of the Total Environment.* **Atai, E., y otros.** 2023.
13. *Effect of the addition of palm oil shell biochar on carbon dioxide emissions in topsoil.* **SasmitaA., Septianda, U. y Elystia, S.** 2023.

14. *Wood Biomass Ash (WBA) from the Heat Production Process as a Mineral Amendment for Improving Selected Soil Properties.* **Rolka, E., y otros.** 2023.
15. *Biochar Improved Sugarcane Growth and Physiology under Salinity Stress.* . **Ngoc, V., y otros.** 2023, Applied Sciences.
16. *Amendments Alter CH₄ Oxidation in a Gray Luvisol.* *Land*, 12(1353). **Weber, T., y otros.** 2023.
17. *Eficiencia de diferentes dosis de biochar para remediar la acidificación del suelo agrícola, en invernadero, Puno.* **Ticona, B.** 2022, Universidad Privada San Carlos.
18. *Uso de biocrabón elaborado con viseras de epscados y lodos de lagunas de oxidación para el mejoramiento de suelos áridos del distrito de Ancón-Lima.* **Zegarra, S.** 2015, UCV.
19. *Efecto del biocarbón a base de excretas de cuy y cáscara de naranja en las propiedades físicas y químicas de los suelos áridos - Los Olivos.* **Asto, E.** s.l. : Universidad Cesar Vallejo, 2017.
20. *Disminución de la salinidad de suelos aplicando biochar a base de biomasa animal y vegetal en Cañete, 2019.* **Obregón, G.** 9, s.l. : Universidad Cesar Vallejo, 2019, Vol. 53.
21. *Estudio agrológico detallado del Valle de Tambo-Arequipa.* In *Ministerio de Agricultura. Autoridad del Agua* . 1971.
22. *El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria.* **Burbano, H.** s.l. : Revista de Ciencias Agrícolas, 2016.
23. *Soil health management practices and crop productivity.* *Agricultural and Environmental Letters.* **Miner, G., y otros.** 2020.
24. *Suelo en el paisaje: Condiciones de abastecimiento.* **Alconada , M. y Lanfranco, J.** 2020, Universidad Nacional de La Plata.
25. *El suelo, clasificación y sus propiedades.* **Cárdenas, J. y Barrios, M.** 2020.
26. *Propiedades físicas de los suelos.* **Hang, S.** 2014.
27. *Propiedades físicas del suelo.* *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura.* **FAO.** 2021.
28. **Arconada, M.** *El suelo saludable y su importancia vital: entendiendo la base de todo jardín y huerto.* 2021.

29. *Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: el pH y la conductividad eléctrica.* **Cremona, M. y Enríquez, A.** s.l. : Presencia, 2020.
30. **Meneses, D.** *Aplicación de la espectroscopía de reflectancia difusa (NIR) en el estudio de la conductividad eléctrica del suelo.* s.l. : Universidad Nacional de Colombia, 2022.
31. *La capacidad de intercambio catiónico del suelo: una bóveda de nutrición clave en la producción de alimentos. Ámbito Investigativo.* **Bueno, R. y Fernández, J.** 2019.
32. *La conflictividad de las plantaciones de eucalipto en España (y Portugal).* **Veiras, X. y Soto, M.** 2020.
33. *The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. Energy and Environmental Science.* **Wicke, B., y otros.** 2011.
34. *Dinámica de la salinidad en los suelos. Revista Digital Del Departamento El Hombre y Su Ambiente.* **Mata-Fernández, I., y otros.** 2014, págs. 26-35.
35. *El Manejo de la conductividad eléctrica en fertirriego.* **Aguirre, A.** 2009, Centro de Investigación en Química Aplicada.
36. *Mapeo de suelos afectados por salinidad - Manual técnico. In Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.* **Omuto, C., y otros.** 2021.
37. *Principios para el manejo de situaciones con suelos salinos y alcalinos.* **Montico, S.** 2019, Universidad Nacional de Rosario.
38. *Activated carbon, biochar and charcoal: Linkages and synergies across pyrogenic carbon's ABCs. Water (Switzerland).* **Hagemann, N., y otros.** 2018.
39. *Biochar-Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations. Frontiers in Environmental Science, 8(October).* **Guo, M., Song, W. y Tian, J.** 2020.
40. *Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: A review of in situ field trials. Science of the Total Environment, 619–620, 815–826.* **O'Connor, D., y otros.** 2018.
41. *Biochar for agronomy, animal farming, anaerobic digestion, composting, water treatment, soil remediation, construction, energy storage, and carbon sequestration: a review. In Environmental Chemistry Letters.* **Osman, A., y otros.** 4, 2022, Vol. 20.
42. *Cómo conocer la salinidad del suelo mediante medidas de conductividad eléctrica. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias.* **Visconti, F. y De La Paz, J.** 2018.

43. *Effect of soil soluble salts on crop reflectances and their implications in experimental design.* **Paz, F., Palacios, L. y Ramirez, C.** 2018.
44. *Hernández, A., y otros.* 2018.
45. *La Madriz, J. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. ACTUACIÓN HUMANA ORIENTADA AL CONOCIMIENTO DE LA REALIDAD OBSERVABLE.* s.l. : CIDE, 2019.
46. *Guía para el muestreo de suelos.* **MINAM.** s.l. : Ministerio del ambiente, 2014, Vol. 72.
47. *Impacto del biocarbón en el suelo agrícola. Avances Investigación En Ingeniería.* **Puentes, T. y Rodriguez, A.** s.l. : 18, 2021, Vol. 2.
48. *Producción y utilización de biocarbón.* Wake Forest University. **Lefebvre, D., y otros.** 2018.
49. *Producción de Biomasa a Carbono en Eucalipto.* **Sarangano , F. y Tenenpaguay, W.** 2020.
50. *PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN PROCESOS PRODUCTIVOS: ANDERSONDARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y DARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV.* **Tapia, C. y Zevallos , K.** 2021.

ANEXOS

Panel fotográfico



Nota. (A) Área de terreno con características superficiales de aridez, sin embargo, se presencia el crecimiento de vegetación. (B) Residuos de herbicidas agrícolas en el área de estudio. Fuente: Propia.



Nota. Muestras verificación en laboratorio. Fuente: Propia.



Nota. Ensayos en laboratorio. Fuente: Propia.



Nota. Ensayos en laboratorio. Fuente: Propia.



Nota. Verificación de la conductividad eléctrica. Fuente: Propia.

Instrumento de muestreo de suelos

| DATOS GENERALES: | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|----------------|----------------|----------------|------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|--|
| Nombre del sitio en estudio: | El arenal | | | | Departamento: | Arequipa | | | | |
| Uso principal: | Agricultura | | | | Provincia: | Islay | | | | |
| Razón social: | | | | | Dirección del predio: | Av. Principal S/N | | | | |
| DATOS DEL PUNTO DE MUESTREO: | | | | | | | | | | |
| Nombre del punto de muestreo: | El Arenal 001 | | | | Operador: | Branco Eduardo Huamani Diaz | | | | |
| Descripción | Terreno sin árido sin agricultura | | | | Coordenadas: | AM 01 | 202433.00 m E | 8103802.00 m S | | |
| Temperatura (°C): | 25° | | | | | AM 02 | 202413.00 m E | 8103784.00 m S | | |
| Técnica de muestreo: | Muestreo de Identificación (MI) | | | | | AM 03 | 202393.00 m E | 8103763.00 m S | | |
| | | | | | | AM 04 | 202383.00 m E | 8103780.00 m S | | |
| | | | | | | AM 05 | 202370.00 m E | 8103803.00 m S | | |
| | | | | | | AM 06 | 202393.00 m E | 8103818.00 m S | | |
| | | | | | | AM 07 | 202408.00 m E | 8103833.00 m S | | |
| | | | | | | AM 08 | 202420.00 m E | 8103815.00 m S | | |
| | | | | | | AM 09 | 202404.00 m E | 8103799.00 m S | | |
| Profundidad final: | 45cm | | | | Precipitación: | 0 mm | | | | |
| DATOS DE LAS MUESTRAS: | | | | | | | | | | |
| Clave de la muestra: | AM 01 | AM 02 | AM 03 | AM 04 | AM 05 | AM 06 | AM 07 | AM 08 | AM 09 | |
| Fecha: | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | 21/01/2024 | |
| Hora: | 10:30 am | 10:35 am | 10:40 am | 10:45 am | 10:50 am | 10:55 am | 11:00 | 11:05 | 11:10 | |
| Profundidad desde (cm): | 30 | 31 | 33 | 30 | 33 | 36 | 39 | 34 | 33 | |
| Profundidad hasta (cm): | 35 | 37 | 40 | 45 | 38 | 41 | 44 | 42 | 39 | |
| Características organolépticas: | | | | | | | | | | |
| Color | Café oscuro | Café claro | Café oscuro | Café oscuro | Café oscuro | Café oscuro | Café oscuro | Café claro | Café claro | |
| Olor: | Inoloro | Inoloro | Inoloro | Inoloro | Sulfurado | Sulfurado | Sulfurado | Inoloro | Estiércol | |
| Textura: | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | Franco arenoso | |
| Humedad: | Seco | Semiseco | Seco | Seco | Húmedo | Húmedo | Húmedo | Seco | Semiseco | |
| Cantidad de muestra: | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | 1kg ≈ | |
| Medida de conservación: | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | Bolsa Ziploc | |
| Tipo de muestra: | Simple | Simple | Simple | Simple | Simple | Simple | Simple | Simple | Simple | |
| Observaciones | <ol style="list-style-type: none"> Se pudo observar en campo, que en las zonas de los puntos AM 05, AM 06 Y AM 07 se tiene una humedad constante, debido a la proximidad de un canal de regadío. Se pudo observar también presencia de envases vacíos de pesticidas y herbicidas en el contorno del terreno. La zona del terreno es denominada por los agricultores como "la hoyada" ya que estos terrenos presentan salitre en el suelo y no son muy buenos para la siembra. Por otro lado, se pudo observar que los terrenos de esta zona están entubados para ayudar a bajar la presencia de salitre en estos. | | | | | | | | | |

Matriz de consistencia

| PROBLEMA | OBJETIVOS | VARIABLES | DIMENSIONES | METODOLOGÍA |
|---|---|--|--|---|
| General | General | | | |
| ¿Cuál es el efecto de tratamientos con biocarbón pirogénico para reducir la salinidad en suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa-2023? | Evaluar el efecto de tratamientos con biocarbón pirogénico para reducir la salinidad en suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa-2023. | Independiente: Biocarbón pirogénico | Características químicas | Enfoque: Cuantitativo |
| | | | | Tipo: Aplicado |
| | | | | Nivel: Explicativo |
| | | | | Diseño: Experimental – 3T - 15 UE |
| | | | Características físicas | Población: Suelos agrícolas del arenal Valle de Tambo |
| ¿Cuánto es el nivel de salinidad inicial de los suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa? | Determinar el nivel de salinidad inicial de los suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa. | | | Muestreo: 9 puntos de muestreo |
| ¿Cuánto es el nivel de salinidad después del tratamiento de los suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa? | Determinar el nivel de salinidad después del tratamiento de los suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa. | Dependiente: Salinidad del suelo | Características físicas y químicas iniciales | Técnica: Observación y experimentación |
| | | | | Instrumento: Ficha de producción de biocarbón, cadena de custodia |
| | | | | |
| ¿Cuál es el tratamiento de biocarbón pirogénico más efectivo para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa? | Determinar el tratamiento de biocarbón pirogénico más efectivo para reducir la salinidad de los suelos agrícolas en el arenal Valle de Tambo, Arequipa. | | Características físicas y químicas finales | Análisis: Estadística experimental con IBM SPSS prueba de ANOVA. |