

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ciencias de la Vida

Impacto de tratamientos con lodos residuales (biosólidos) sobre el rendimiento de maíz y parámetros agronómicos de la pitahaya para el aprovechamiento agrícola en suelos degradados

VIDA-462

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniería Agrícola y Biológica

Presentado por:

Enrique José García Arana

Guayaquil - Ecuador

2025

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi madre, Kelly Arana Echeverría, y a mi padre, Pedro García Monserrate, por su amor incondicional, guía y apoyo constante en cada etapa de mi formación académica, así como a mis hermanas, Mayte y Kelly, quienes con su ejemplo, compañía y apoyo hicieron que cada desafío fuera más llevadero y motivador, siendo un pilar fundamental en mi camino académico.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a Dios, por brindarme fortaleza, guía y sabiduría para culminar este proyecto. Asimismo, agradezco a mi familia, cuyo apoyo constante y ejemplo de esfuerzo me han acompañado en todo momento.

Quiero expresar mi gratitud a mis amigos José, Carlos y Rachel, quienes con su compañía y consejos hicieron más llevadero este proceso.

Agradezco al PhD. Eduardo Chávez por la oportunidad, confianza y guía brindadas; así como al MSc. Byron Moyano del Pezo por su apoyo técnico durante el desarrollo de este proyecto.

De manera especial, agradezco a Camila, quien fue un apoyo fundamental durante esta etapa, brindándome su ayuda, ánimo y comprensión, contribuyendo significativamente a la culminación de este proyecto

Declaración Expresa

Yo, Enrique Jose Garcia Arana, acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor del proyecto de graduación corresponderá al autor, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 4 de febrero del 2026.

Enrique García Arana

Evaluadores

María Isabelita Jiménez Feijó, PhD

Profesor de Materia Integradora

Eduardo Francisco Chávez

Navarrete, PhD

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto evalúa el aprovechamiento de biosólidos, provenientes del tratamiento de aguas residuales, como enmienda edáfica para suelos de baja fertilidad. El objetivo de este trabajo fue generar información técnica que respalde el uso de estos bioinsumos como una práctica agronómica sostenible. Las pruebas se realizaron en los cultivos de maíz (*Zea mays*) y pitahaya (*Hylocereus spp.*) en la Granja Experimental Agroproductiva (GEA) de la ESPOL. La investigación se justifica por la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado a la disposición final de los biosólidos y por su potencial como fuente de nutrientes y materia orgánica. El estudio se desarrolló mediante un ensayo de campo, aplicando diferentes dosis de biosólidos. Se evaluaron variables agronómicas del maíz en tres ciclos productivos, así como el crecimiento vegetativo inicial de la pitahaya. Para el cultivo de maíz, los resultados mostraron que los tratamientos con aplicación de biosólidos presentaron incrementos en la altura de planta, la biomasa, el rendimiento y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. En el cultivo de pitahaya, en los tratamientos con dosis más elevadas se observó un mayor porcentaje de plantas que alcanzaron una altura de 1,50 m y estuvieron listas para el tutoreo. Asimismo, los tratamientos evaluados no evidenciaron contaminación del suelo ni de los cultivos por metales pesados. Se concluye que los biosólidos representan una alternativa viable y sostenible para mejorar las condiciones del suelo en sistemas agrícolas de baja fertilidad.

Palabras clave: biosólidos, enmienda edáfica, fertilidad del suelo, agricultura sostenible.

Abstract

This study evaluates the use of biosolids, derived from wastewater treatment, as a soil amendment for low-fertility soils. The objective of this research was to generate technical information supporting the use of these bioinputs as a sustainable agronomic practice. Field trials were conducted with maize (*Zea mays*) and pitahaya (*Hylocereus spp.*) crops at the Experimental Agroproductive Farm (GEA) of ESPOL. The research is justified by the need to reduce the environmental impact associated with the final disposal of biosolids and by their potential as a source of nutrients and organic matter. The study was carried out through a field experiment applying different biosolid doses. Agronomic variables of maize were evaluated over three production cycles, as well as the initial vegetative growth of pitahaya. In maize, treatments with biosolid application showed increases in plant height, biomass, yield, and nutrient availability in the soil. In pitahaya, higher biosolid doses resulted in a greater percentage of plants reaching a height of 1.50 m and being ready for trellising. Additionally, the evaluated treatments did not show soil or crop contamination by heavy metals. It is concluded that biosolids represent a viable and sustainable alternative to improve soil conditions in low-fertility agricultural systems.

Keywords: biosolids, soil amendment, soil fertility, sustainable agriculture.

Índice general

Resumen	III
Abstract	IV
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VII
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	4
1.3 Justificación del Problema	5
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
1.5 Marco teórico	8
1.5.1 Lodos residuales y su aprovechamiento agrícola	8
1.5.2 Efectos de los biosólidos en las propiedades del suelo	8
1.5.3 Fertilidad del suelo como base de la productividad agrícola	9
1.5.4 Uso de biosólidos en cultivos agrícolas	10
1.5.5 Variables agronómicas y fisiológicas de cultivos: Maíz y Pitahaya	11
1.5.6 Aporte de nutrientes esenciales (N, P y K) provenientes de biosólidos	13
1.5.7 Consideraciones ambientales	13
1.5.8 Perspectiva agronómica sostenible	14
1.5.9 Potenciales efectos negativos de la aplicación de los biosólidos	15
Capítulo 2	17
2. Metodología	18
2.1 Diseño del estudio	18
2.2 Área de estudio y distribución de las unidades experimentales	1G
2.2.1 Área de estudio	19
2.2.2 Distribución de unidades experimentales.....	20
2.3 Preparación de suelo y labores de campo	23
2.4 Tratamientos	24
2.4.1 Maíz	24

2.4.2 Pitahaya	25
2.5 Variables agronómicas evaluadas.....	26
2.5.1 Maíz	26
2.5.2 Pitahaya	26
2.6 Análisis estadístico	27
Capítulo 3	28
3. Resultados.....	2G
3.1 Caracterización fisicoquímica de los biosólidos	2G
3.2 Evaluación agronómica del cultivo de maíz afectada por la aplicación de dosis incrementales de biosólidos	31
3.2.1 Altura total de la planta.....	31
3.2.2 Biomasa.....	34
3.2.3 Rendimiento	38
3.3 Impacto de la aplicación de biosólidos en el pH y la salinidad del suelo durante los tratamientos y ciclos de cultivo	41
3.4 Efecto de la aplicación de los biosólidos en el desarrollo agronómico de la pitahaya.....	44
3.4.1 Análisis de crecimiento vegetativo por textura de suelo.....	44
Capítulo 4	4C
4.1 Conclusiones y recomendaciones	47
4.1.1 Conclusiones.....	47
4.1.2 Recomendaciones	48
Referencias.....	4G

Abreviaturas

Ha	Hectárea
T	Tonelada
t/ha	Toneladas por hectárea
T	Tratamiento

Simbología

Δ	Diferencia entre tratamientos
mm	Milímetro
ml	Mililitro
mg	Miligramo
L	Litro
g	Gramo
pH	Potencial de hidrógeno

Índice de figuras

Figura 1. Localización de la granja agrícola experimental dentro del campus de ESPOL _____	19
Figura 2 Ubicación específica del área de estudio dentro de la granja agrícola experimental de ESPOL _____	20
Figura 3. Distribución espacial de plots del cultivo de maíz en el área específica de estudio _	21
Figura 4 Imagen representativa de la subparcela establecida para la toma de datos _____	22
Figura 5 Distribución espacial de las plantas de pitahaya en el área específica de estudio ____	22
Figura 6 Efecto de las dosis de biosólidos sobre la altura del maíz en el Ciclo 3 _____	31
Figura 7 Altura promedio de planta en función de los tratamientos y ciclos de cultivo _____	34
Figura 8 Efecto de las dosis de biosólidos sobre la Biomasa del maíz en el Ciclo 3 _____	35
Figura 9 Biomasa promedio en función de los tratamientos y ciclos de cultivo _____	37
Figura 10 Efecto de las dosis de biosólidos sobre el rendimiento de cultivo en el Ciclo 3____	38
Figura 11 Rendimiento promedio en función de los tratamientos y ciclos de cultivo_____	40
Figura 12 Evolución del pH del suelo a través de los ciclos de cultivo _____	42
Figura 13 Variación de la salinidad del suelo a lo largo de los ciclos de cultivo _____	42
Figura 14 Variabilidad del porcentaje de plantas que alcanzaron el tutor por tratamiento ____	44
Figura 15 Variabilidad del porcentaje de plantas que alcanzaron el tutor por área_____	45

Índice de tablas

Tabla 1 Distribución de fertilización aplicada dentro del ensayo _____	23
Tabla 2 Dosis por hectárea del maíz _____	24
Tabla 3 Dosis por parcela de la pitahaya _____	25
Tabla 4 Caracterización fisicoquímica de los lodos residuales _____	30
Tabla 5 Altura total promedio por tratamiento de la planta dentro de los ciclos _____	32
Tabla 6 Biomasa promedio por tratamiento de la planta dentro de los ciclos _____	36
Tabla 7 Rendimiento promedio por tratamiento de la planta dentro de los ciclos _____	39
Tabla 8 Variación de pH y salinidad por tratamiento en los ciclos iniciales _____	41
Tabla 9 Análisis de textura de suelo _____	45

Capítulo 1

1.1 Introducción

Dentro de los últimos años se ha incrementado el uso de prácticas sostenibles con el medio ambiente; una de estas es el tratamiento de aguas residuales, especialmente en zonas urbanas, el cual genera lodos residuales que posteriormente son sometidos a tratamientos de estabilización mediante procesos de fermentación aeróbica y/o anaeróbica, el resultado de esta práctica se denomina biosólidos (Rodríguez González et al., 2024).

Es de suma importancia que este tipo de materiales reciba un tratamiento adecuado, ya que de esta manera se puede reducir el riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente. No obstante, el manejo inadecuado de los biosólidos ha generado diversos problemas de carácter ambiental, asociados principalmente a la acumulación progresiva de estos residuos y a la limitada disponibilidad de sitios técnicamente adecuados para su disposición final, lo que incrementa el riesgo de contaminación de suelo y agua (CONAGUA, 2018). En la actualidad se considera que estos residuos pueden ser aprovechados de una manera más sostenible, evitando así, la contaminación causada por su mal disposición. De acuerdo con Marchuk et al. (2023), este tipo de materiales pueden utilizarse de forma segura dentro del sector agrícola, siempre que cumplan con criterios de inocuidad.

A través de los años, las prácticas más utilizadas para el manejo de los biosólidos han sido la incineración y su disposición en botaderos o rellenos sanitarios, alternativas que presentan limitaciones ambientales debido a la volatilización de carbono orgánico, como CO₂, y lixiviación de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Ramírez et al. 2017). Además, este tipo de prácticas limita el aprovechamiento de los nutrientes presentes en los biosólidos, los cuales podrían ser reincorporados al suelo con fines agrícolas. Como lo menciona Sharma et al. (2017), este tipo de manejo provoca una pérdida de elementos que pueden ser útiles para mejorar la fertilidad del suelo. Debido a esto, en los últimos años se ha comenzado a considerar

su uso como abonos orgánicos, gracias a que contienen nutrientes esenciales para los cultivos como nitrógeno, fósforo y materia orgánica, necesarios para el crecimiento y buen desarrollo de las plantas (Kumar et al., 2017).

En un contexto internacional, el uso de biosólidos dentro de diferentes rubros, especialmente en la agricultura, ya se ha implementado de forma habitual, dentro de la Unión Europea, aproximadamente el 35 % de los biosólidos generados son utilizados en el sector agrícola (Comisión Europea, 2010).

En los Estados Unidos, el uso agrícola de los lodos residuales alcanza cerca del 60 % del total producido (EPA, 2018). En el caso de Australia, este aprovechamiento ha aumentado progresivamente, pasando de valores cercanos al 70 % hasta aproximadamente un 83 % entre 2019 y 2021, según lo reportado por Marchuk et al. (2023).

En la agricultura, la incorporación de residuos orgánicos como enmiendas al suelo ha demostrado contribuir a la mejora de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, favoreciendo la fertilidad y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos (Abarzúa Torres, 2022; Villarroel Valderrama, 2023). Estas enmiendas, al aportar materia orgánica y nutrientes esenciales, ayudan a incrementar la actividad microbiana y la capacidad de retención de agua, lo que apoya un crecimiento vegetal más saludable (Abarzúa Torres, 2022).

En Ecuador, la expansión progresiva de los sistemas de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas ha dado lugar a la generación constante de biosólidos. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos, hasta el año 2019 se registraban al menos 123 plantas de tratamiento de aguas residuales distribuidas en distintos municipios del país (INEC, 2019).

El presente estudio evaluó el uso de biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Guayaquil como enmienda orgánica en suelos con características poco aptas para la agricultura, o, de baja fertilidad. Se analizaron los cambios en las propiedades físicas del suelo y su efecto sobre el desarrollo de los cultivos de maíz (*Zea mays L.*) y pitahaya (*Hylocereus spp.*). Los resultados obtenidos aportaron información técnica relevante para el aprovechamiento de estos residuos, orientada a promover prácticas agrícolas sostenibles y a reducir los impactos ambientales asociados a la disposición final de los lodos residuales.

1.2 Descripción del problema

El tratamiento de aguas residuales genera como subproducto lodos residuales, cuya gestión representa un desafío ambiental debido a los grandes volúmenes producidos, a las limitaciones existentes para su disposición final y a las malas prácticas de manejo, como la incineración de este residuo. Mediante procesos de estabilización y tratamiento, estos lodos residuales pueden transformarse en biosólidos, materiales que, al cumplir determinados criterios de calidad, pueden ser aprovechados en actividades agrícolas. El manejo inadecuado de estos materiales puede ocasionar impactos negativos, tales como la saturación de rellenos sanitarios y la pérdida de un recurso con potencial valor agronómico.

En el contexto ecuatoriano, si bien una parte significativa de los municipios que recolectan aguas residuales cuenta con plantas de tratamiento, el aprovechamiento agrícola de los biosólidos generados es aún nulo. De acuerdo con datos de la Agencia de Regulación y Control del Agua (ARCA, 2024), el 74,4 % de los municipios dispone de al menos una planta de tratamiento, sin embargo, los lodos producidos son destinados mayoritariamente a rellenos sanitarios, sin que se evalúe su uso potencial en otros ámbitos productivos.

Esta situación se observa en la ciudad de Guayaquil, donde la Planta de Tratamiento Las Esclusas procesa las aguas residuales generadas por más de un millón de habitantes y cuenta con una línea específica para el tratamiento de lodos. A pesar de ello, los biosólidos obtenidos son actualmente depositados en el relleno sanitario, lo que evidencia una brecha entre su generación y su posible aprovechamiento como enmienda orgánica.

A nivel técnico, la principal limitación para el uso de biosólidos radica en la escasa información local que permita evaluar su comportamiento en el suelo y su efecto sobre el desarrollo de cultivos agrícolas bajo condiciones tropicales. En otros países y regiones con características similares se han reportado resultados favorables en la mejora de las propiedades del suelo y del rendimiento de los cultivos mediante su aplicación controlada; sin embargo, en Ecuador esta información es limitada. Por lo tanto, el problema abordado en este estudio es susceptible de observación, medición y análisis mediante la evaluación de las propiedades físicas del suelo y del desarrollo de cultivos, lo que permite generar información técnica que sustente decisiones orientadas a un manejo sostenible de los biosólidos.

1.3 Justificación del Problema

La generación de información técnica sobre el uso de biosólidos como enmienda orgánica es fundamental para apoyar la toma de decisiones en la gestión de residuos y en la producción agrícola sostenible. En el contexto ecuatoriano, la falta de estudios locales que evalúen el comportamiento de estos materiales en suelos agrícolas limita su aprovechamiento y mantiene prácticas de disposición final que no consideran su potencial agronómico.

Desde el punto de vista técnico, esta investigación permite evaluar el efecto de los biosólidos sobre el desarrollo de cultivos, aportando datos que pueden servir como referencia para futuras aplicaciones precautelando la salud de la población y la preservación del suelo.

Esta información es clave para establecer criterios de uso seguro y eficiente, adaptados a las condiciones edafoclimáticas locales.

En el ámbito ambiental, los resultados del estudio contribuyen a la búsqueda de alternativas sostenibles para el manejo de lodos residuales, promoviendo su valorización en lugar de su disposición final en rellenos sanitarios. Esto favorece la reducción de presiones sobre los rellenos sanitarios y se alinea con los principios de la economía circular y la gestión integral de residuos.

Adicionalmente, desde una perspectiva económica, el uso de biosólidos representa una opción potencial para reducir la dependencia de fertilizantes químicos, cuyos costos han mostrado una tendencia creciente en el país. Esta alternativa puede beneficiar especialmente a pequeños y medianos productores agrícolas, al ofrecer insumos de origen local y menor costo.

Por lo tanto, la presente investigación se justifica en la necesidad de generar conocimiento técnico que respalde el uso responsable de biosólidos en sistemas agrícolas, contribuyendo al desarrollo de prácticas más sostenibles y a una gestión más eficiente de los residuos urbanos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Aprovechar los lodos residuales (biosólidos) como alternativa para el mejoramiento de suelos de baja fertilidad e incremento productivo de cultivos de interés agrícola de forma sostenible y amigable para el medio ambiente, reduciendo la dependencia de insumos de alto costo, como los fertilizantes.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar mediante parámetros físicos y químicos la calidad de los biosólidos utilizados en la aplicación de los tratamientos.
2. Evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos en diferentes dosis sobre las características agronómicas del maíz (*Zea mays L.*) y pitahaya (*Hylocereus spp.*).
3. Analizar la información obtenida en ciclos de maíz previos para determinar el efecto en la producción del cultivo de diferentes dosis de biosólidos a través del tiempo.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Lodos residuales y su aprovechamiento agrícola

Los lodos residuales, comúnmente conocidos como biosólidos, se generan durante el tratamiento de aguas residuales de origen urbano o industrial, proceso en el cual la materia orgánica y los nutrientes presentes en el agua son estabilizados mediante métodos biológicos o fisicoquímicos. Una vez tratados, estos materiales pueden utilizarse como abono o enmienda orgánica, debido a su contenido de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y micronutrientes que resultan necesarios para el desarrollo adecuado de las plantas (Amorim Júnior et al., 2021). De esta manera, los biosólidos dejan de ser considerados únicamente como un desecho y pasan a representar una alternativa de aprovechamiento con enfoque sostenible en la agricultura, asociada a los principios de la economía circular y a la reducción de impactos ambientales derivados de su disposición en vertederos.

El uso agrícola de los biosólidos permite mejorar las condiciones del suelo, facilitar el reciclaje de nutrientes y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. En Ecuador y en otros países de América Latina, esta alternativa ha cobrado mayor importancia debido al incremento en el costo de los fertilizantes sintéticos y a la degradación progresiva de los suelos agrícolas. Estudios desarrollados en Brasil y México han evidenciado que la aplicación de lodos residuales puede incrementar la fertilidad del suelo, mejorar la capacidad de retención de agua y estimular la actividad microbiana (Moraes et al., 2020).

1.5.2 Efectos de los biosólidos en las propiedades del suelo

La incorporación de biosólidos al suelo genera cambios favorables en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, principalmente debido al aporte de materia orgánica. Desde el punto de vista físico, su aplicación contribuye a mejorar la estructura del suelo y la formación de agregados, lo que reduce la compactación y facilita la infiltración de agua. Un estudio

realizado en Chile por Sepúlveda-Varas et al. (2011), mostró que la aplicación de biosólidos en suelos degradados incrementó la respiración del suelo y la estabilidad de los agregados, además de mejorar la disponibilidad de fósforo. Estas condiciones favorecen el desarrollo del sistema radicular y permiten una mayor tolerancia de las plantas frente a períodos de estrés hídrico.

En cuanto a las propiedades químicas, los biosólidos aportan macronutrientes como nitrógeno, fósforo, calcio y magnesio, así como micronutrientes entre los que destacan el zinc y el hierro. Investigaciones realizadas en suelos agrícolas del centro de México demostraron que el uso de biosólidos incrementó el nitrógeno total y el fósforo disponible, logrando un mejor balance nutricional en cultivos de maíz (Pineda et al., 2022).

Desde el punto de vista biológico, la incorporación de biosólidos al suelo ha demostrado efectos positivos sobre las poblaciones microbianas del suelo y los procesos biológicos asociados a la fertilidad. Estudios recientes muestran que la aplicación prolongada de biosólidos puede aumentar la biomasa y la respiración microbiana, así como favorecer la mineralización del nitrógeno y otros nutrientes esenciales, lo cual se traduce en una mayor actividad metabólica del microbioma edáfico y una mejor funcionalidad del ecosistema del suelo (Morgan et al, 2024).

1.5.3 Fertilidad del suelo como base de la productividad agrícola

La fertilidad del suelo constituye uno de los principales factores que determinan la productividad agrícola, ya que define la capacidad del suelo para proporcionar nutrientes, agua, oxígeno y un ambiente físico adecuado para el desarrollo radicular. Un suelo fértil se caracteriza por presentar una estructura estable, buena disponibilidad de nutrientes y una elevada actividad biológica.

En América Latina, muchos suelos agrícolas presentan limitaciones asociadas a bajos contenidos de materia orgánica, alta acidez o problemas de compactación, lo que convierte a la fertilidad en un factor crítico para mantener la estabilidad de los rendimientos. De acuerdo con estudios realizados por la FAO en la región andina, los suelos con mayor contenido de materia orgánica y una estructura adecuada muestran mejoras significativas en la retención de agua, el crecimiento radicular y la eficiencia en el uso de nutrientes, lo que se traduce en una mayor productividad agrícola (FAO, 2020).

1.5.4 Uso de biosólidos en cultivos agrícolas

El uso de biosólidos en cultivos como maíz, caña de azúcar y pitahaya ha mostrado resultados favorables tanto en el rendimiento como en la calidad del suelo. En Europa, Koutroubas et al. (2023) reportaron que la aplicación de dosis entre 20 y 80 Mg ha⁻¹ de biosólidos en maíz permitió obtener rendimientos similares o superiores a los logrados con fertilización mineral, además de mejorar la eficiencia en el uso del nitrógeno. En América Latina, estudios como el de Cortés-Tello y Jaramillo-López (2020) evidenciaron incrementos significativos en la biomasa de maíz al combinar biosólidos con ceniza de carbón y procesos de fermentación tipo Bokashi, sin detectar acumulación de metales pesados en las plantas.

En cultivos tropicales de alto valor, como la pitahaya, el aporte de materia orgánica resulta fundamental para mantener la estructura del suelo y conservar la humedad, especialmente en zonas con períodos secos prolongados. Investigaciones recientes en suelos tropicales han demostrado que los biosólidos mejoran la retención de agua, aumentan la disponibilidad de fósforo y favorecen la formación de micorrizas, lo que se refleja en un desarrollo más vigoroso de las plantas (Martínez Durán et al., 2023). En el caso de las hortalizas, se ha observado que los biosólidos pueden sustituir parcialmente a los fertilizantes

químicos sin afectar la productividad ni la calidad de los productos (Collivignarelli et al., 2019).

1.5.5 Variables agronómicas y fisiológicas de cultivos: Maíz y Pitahaya

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor relevancia a nivel mundial debido a su papel en la seguridad alimentaria, la producción de forraje y la industria agroalimentaria. La evaluación agronómica del maíz se sustenta en variables de crecimiento y productividad que permiten interpretar su respuesta frente a diferentes condiciones de manejo, fertilización y ambiente. Entre las variables más empleadas destacan la altura total de la planta, la biomasa aérea acumulada y el rendimiento final, ya que reflejan el desempeño fisiológico, la eficiencia en el uso de recursos y la capacidad productiva del cultivo (Zhang et al., 2022; Assefa et al., 2020).

La altura total de la planta constituye un indicador morfológico del vigor vegetativo y del estado nutricional. Esta variable está estrechamente relacionada con la disponibilidad de nitrógeno, la densidad de siembra y las condiciones hídricas, factores que influyen directamente en la elongación del tallo y expansión foliar. Estudios recientes indican que una mayor altura puede asociarse con mayor intercepción de radiación y acumulación de biomasa; sin embargo, no siempre se traduce en mayor rendimiento, ya que este depende de la eficiencia en la partición de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos (Tokatlidis & Koutroubas, 2020; Ciampitti & Vyn, 2021).

La biomasa en base a materia seca por planta que incluye hojas, tallos y estructuras reproductivas según la etapa fenológica representa la acumulación neta de carbono fijado mediante fotosíntesis. Su determinación en materia seca es fundamental para reducir la variabilidad asociada al contenido hídrico y permitir comparaciones precisas entre tratamientos. Investigaciones recientes destacan que la acumulación de biomasa está directamente vinculada

con la eficiencia en el uso de nitrógeno, la duración del área foliar activa y la radiación interceptada durante el ciclo del cultivo (Zhang et al., 2022; Assefa et al., 2020).

El rendimiento en maíz, generalmente expresado en toneladas por hectárea, es el principal indicador productivo y resulta de la interacción entre número de plantas, número de granos por mazorca y peso individual del grano. Las fases de floración y llenado de grano son particularmente sensibles al estrés hídrico y nutricional, condiciones que pueden limitar la partición de asimilados hacia el grano. Estudios recientes confirman que la relación entre biomasa acumulada y eficiencia de partición es determinante para explicar variaciones en el rendimiento bajo diferentes estrategias de manejo (Ciampitti & Vyn, 2021; Grassini et al., 2021).

Por otra parte, la pitahaya (*Hylocereus spp.*) especie perteneciente a la familia Cactaceae, ha incrementado su importancia comercial en regiones tropicales y subtropicales debido a su alto valor nutricional y demanda en mercados internacionales. Se caracteriza por presentar metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), lo que le confiere alta eficiencia en el uso del agua y adaptación a condiciones de estrés hídrico (Ortiz-Hernández & Carrillo-Salazar, 2021). En esta especie, el crecimiento vegetativo se evalúa mediante variables como longitud y número de cladodios, emisión de brotes y vigor estructural. Investigaciones recientes señalan que el desarrollo adecuado de cladodios maduros es fundamental para la inducción floral y la productividad, ya que las estructuras reproductivas emergen en segmentos fisiológicamente desarrollados (Le Bellec et al., 2020; Ortiz-Hernández & Carrillo-Salazar, 2021). Asimismo, un manejo adecuado de poda y nutrición favorece la aireación, la captación de luz y la formación de estructuras reproductivas, impactando directamente en el rendimiento del cultivo.

1.5.6 Aporte de nutrientes esenciales (N, P y K) provenientes de biosólidos

Los biosólidos representan una fuente importante de macronutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio. El nitrógeno se encuentra mayormente en formas orgánicas y amoniacales, liberándose de manera gradual durante el proceso de mineralización, lo que permite una nutrición sostenida a lo largo del ciclo del cultivo. Estudios realizados en suelos agrícolas de México han señalado que entre el 20 % y el 40 % del nitrógeno total contenido en los biosólidos se mineraliza durante el primer año, dependiendo de factores como la temperatura y el tipo de tratamiento aplicado (Pineda et al., 2022).

El fósforo presente en los biosólidos suele encontrarse en formas disponibles para las plantas, especialmente en suelos ácidos como los de la región costera del Ecuador, donde su aplicación puede mejorar notablemente los niveles de fósforo aprovechable. Investigaciones desarrolladas en Brasil han reportado incrementos significativos en la disponibilidad de este nutriente en suelos tratados con biosólidos, incluso superiores a los obtenidos con fertilizantes convencionales (da Silva et al., 2020).

Aunque el potasio se encuentra en menores concentraciones, su aporte contribuye a cubrir parte de los requerimientos de los cultivos y a mejorar el balance nutricional del suelo. En sistemas productivos de maíz y frutales tropicales, este aporte complementario favorece procesos como el llenado de frutos, la regulación del movimiento de agua en la planta y la calidad final de la cosecha.

1.5.7 Consideraciones ambientales

El uso agrícola de biosólidos puede implicar riesgos si no se realiza bajo un manejo adecuado, debido a la posible presencia de metales pesados, patógenos o compuestos orgánicos

persistentes. Por esta razón, es fundamental contar con normativas que regulen su composición, tratamiento, dosis de aplicación y monitoreo. En Europa y Estados Unidos, la legislación establece límites estrictos para elementos como cadmio (Cd), plomo (Pb), zinc (Zn) y mercurio (Hg), además de exigir análisis microbiológicos periódicos para garantizar la inocuidad del material (Collivignarelli et al., 2019). En América Latina, aunque las regulaciones aún son limitadas, países como Brasil y Chile han desarrollado lineamientos técnicos orientados a un aprovechamiento seguro de los biosólidos.

En Ecuador, el potencial de uso agrícola de los biosólidos generados en plantas de tratamiento como Las Esclusas en Guayaquil es considerable; sin embargo, se requieren pruebas de campo que evalúe su efecto en distintos tipos de suelos, cultivos y épocas del año. La aplicación controlada de estos materiales permitiría reducir la cantidad de residuos enviados a rellenos sanitarios y consecuentemente la contaminación del aire y agua.

1.5.8 Perspectiva agronómica sostenible

El aprovechamiento de biosólidos representa una alternativa relevante para fortalecer la sostenibilidad agrícola, especialmente en sistemas productivos que enfrentan limitaciones económicas o ambientales. Al incorporar residuos urbanos tratados como los biosólidos, dentro del ciclo agrícola, se promueve un uso más eficiente de los recursos y se reduce la dependencia de insumos externos. Además, los biosólidos contribuyen a la recuperación de suelos degradados, incrementan el contenido de materia orgánica y mejoran la resistencia de los sistemas de cultivo frente al cambio climático. En países como Ecuador, donde muchos suelos presentan baja fertilidad natural y problemas de erosión, el uso responsable de biosólidos puede convertirse en una herramienta clave para mejorar la capacidad productiva del suelo a largo plazo.

1.5.9 Potenciales efectos negativos de la aplicación de los biosólidos

Aunque la aplicación de biosólidos en suelos agrícolas ofrece beneficios agronómicos, también plantea riesgos ambientales y sanitarios que deben ser evaluados y gestionados antes de su utilización. Los biosólidos pueden contener contaminantes químicos persistentes, tales como metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos y sustancias emergentes como las sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS), las cuales presentan una alta resistencia a la degradación y capacidad de acumulación en suelos y plantas (McDonough et al., 2022). Estudios recientes han documentado que los biosólidos y sus productos derivados pueden contener PFAS, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) y metales pesados, con potencial de migrar hacia el suelo, cuerpos de agua y la cadena alimentaria cuando no se aplican bajo criterios técnicos adecuados (Bourioug et al., 2020; Li et al., 2023).

La presencia de PFAS en biosólidos ha generado una creciente preocupación a nivel internacional, debido a que estas sustancias, conocidas como “*forever chemicals*”, persisten en el ambiente y han sido asociadas con efectos adversos en la salud humana y animal, incluso a bajos niveles de exposición (McDonough et al., 2022). En respuesta a esta problemática, organismos reguladores como la U.S. Environmental Protection Agency (EPA) han desarrollado lineamientos y marcos de gestión orientados a la identificación, monitoreo y reducción del riesgo asociado a la aplicación de biosólidos que contienen PFAS en suelos agrícolas (U.S. EPA, 2023).

Otro aspecto crítico relacionado con el uso de biosólidos es la acumulación de metales pesados, como Zn, cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) y Pb. Investigaciones recientes indican que estos elementos pueden presentar distintos grados de biodisponibilidad, ser absorbidos por los cultivos y acumularse en los tejidos vegetales, lo que podría representar un riesgo para la salud humana a través del consumo de alimentos contaminados (Tytła, 2019; Bourioug et al., 2020).

Adicionalmente, la aplicación reiterada o en altas dosis de biosólidos puede favorecer la diseminación de genes de resistencia a antibióticos y a metales, alterando la estructura y funcionalidad de las comunidades microbianas del suelo y generando efectos ecológicos no deseados (Christou et al., 2019; Cytryn, 2020).

Finalmente, estudios recientes han señalado que el uso de biosólidos puede contribuir a la incorporación de microplásticos en suelos agrícolas, resultando en concentraciones superiores a las observadas en suelos no enmendados. La acumulación de estas partículas sintéticas puede afectar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, con posibles implicaciones a largo plazo para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Li et al., 2023).

Capítulo 2

2. Metodología

2.1 Diseño del estudio

El presente proyecto correspondió a un estudio de campo con aleatorización parcial, en el cual los tratamientos se aplicaron en parcelas cuyo orden de ubicación fue asignado al azar, mientras que la dosis específica de cada tratamiento ya estaba predefinida según un código establecido, desarrollado bajo un diseño comparativo entre tratamientos, con el objetivo de evaluar el efecto de biosólidos como enmienda orgánica alternativa en los cultivos de maíz (*Zea mays*) y pitahaya (*Hylocereus* spp.). El ensayo se llevó a cabo en condiciones de producción dentro de las instalaciones del campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), en la provincia del Guayas, lo que permitió analizar la respuesta de ambos cultivos en un contexto agronómico representativo de la zona.

En el cultivo de maíz se evaluaron tres ciclos productivos consecutivos, en los cuales se aplicaron los mismos tratamientos. No obstante, el presente estudio se enfocó específicamente en el análisis del ciclo productivo 3, mientras que la información correspondiente a los ciclos anteriores fue utilizada como base para evaluar el impacto de los tratamientos a lo largo del tiempo. En cada ciclo se incluyó un tratamiento control sin aplicación de biosólidos y seis tratamientos con diferentes dosis o frecuencias de aplicación.

Por su parte, el estudio en pitahaya se centró en evaluar la respuesta de crecimiento inicial del cultivo ante la aplicación de distintas dosis de biosólidos, diferenciando tratamientos con y sin fertilización mineral. Durante el periodo de evaluación se registraron parámetros de crecimiento vegetativo, particularmente el número de plantas que alcanzaron la altura del tutor (1,50 m) considerado un indicador

preliminar del vigor del cultivo durante la etapa de establecimiento y de su respuesta a la incorporación de biosólidos.

2.2 Área de estudio y distribución de las unidades experimentales

2.2.1 Área de estudio

El área de estudio se localizó en la Granja Experimental Agrícola (GEA) dentro de la ESPOL, con una superficie aproximada de 1,4 ha (Figura 1). Dentro de este predio se establecieron dos cultivos: maíz, distribuido en dos lotes con extensiones de 0,17 ha y 0,34 ha, y pitahaya con una superficie de 0,64 ha (Figura 2). El predio contaba con un sistema de drenaje previamente establecido, el cual permitió un adecuado manejo del encharcamiento.

Figura 1.

Localización de la granja agrícola experimental dentro del campus de ESPOL.



Figura 2

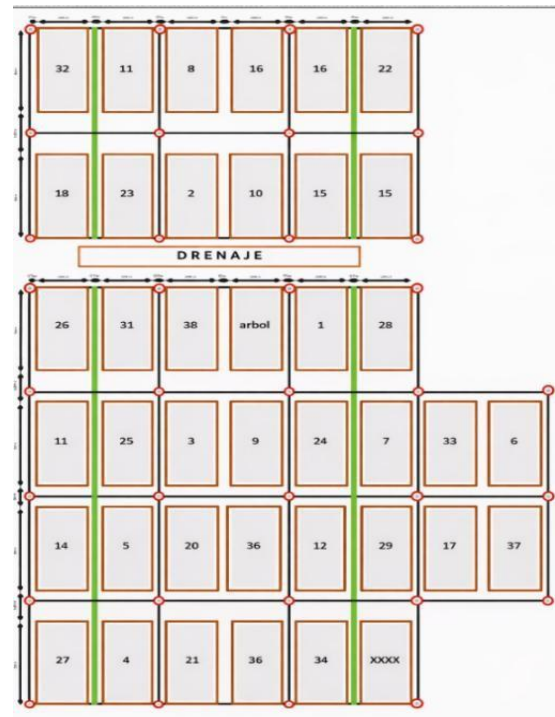
Ubicación específica del área de estudio dentro de la granja agrícola experimental de ESPOL.

**2.2.2 Distribución de unidades experimentales**

Para el cultivo de maíz se dispusieron 38 parcelas (plots), cada una con un área de 66 m². El establecimiento del cultivo se realizó con un distanciamiento de 0,80 m entre calles y 0,20 m entre plantas, lo que permitió sembrar aproximadamente 420 plantas por parcela. La mayoría de los tratamientos contó con seis repeticiones, mientras que aquellos con dos aplicaciones anuales de lodos se trabajaron con cuatro repeticiones. (Figura 3).

Figura 3.

Distribución espacial de plots del cultivo de maíz en el área específica de estudio

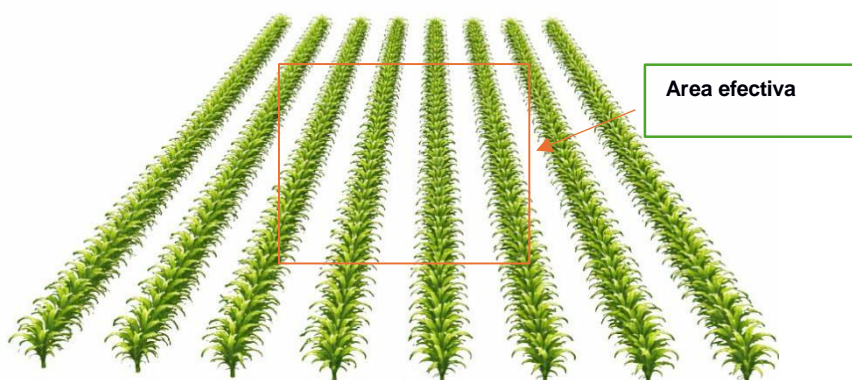


Nota: Imagen facilitada por el laboratorio de suelos ESPOL

Cada plot estuvo conformado por siete columnas de plantas; para la toma de datos, se seleccionaron únicamente las filas centrales, específicamente la tercera, cuarta y quinta fila, con el fin de evitar efectos de borde. Las mediciones se realizaron en plantas ubicadas en la parte media de cada plot, asegurando que siempre se trabajara con tres filas internas (área de interés) (Figura 4).

Figura 4

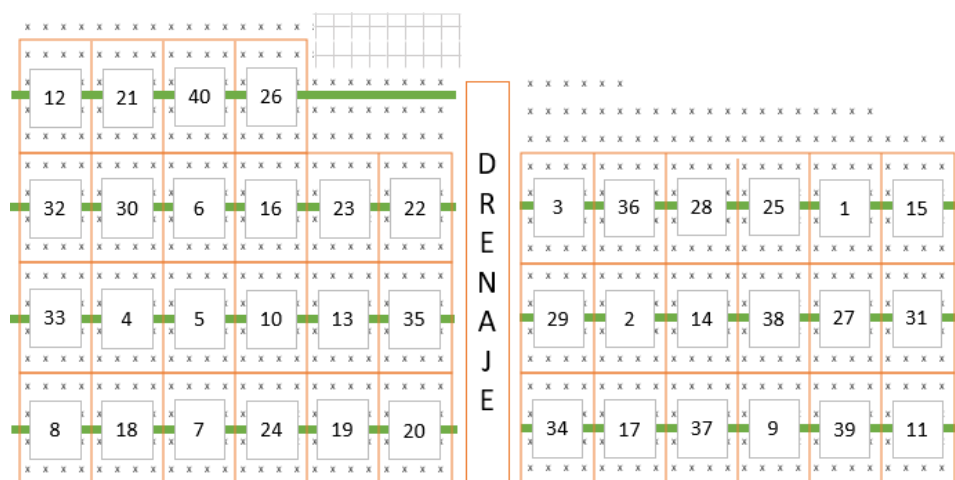
Imagen representativa de la subparcela establecida para la toma de datos



En el caso del cultivo de pitahaya, la disposición del cultivo se estableció con un marco de plantación de 4×2 m, correspondiente a la distancia entre tutores. Cada tratamiento y su respectiva repetición se distribuyeron en unidades experimentales con forma rectangular, con dimensiones aproximadas de 16 m de ancho por 8 m de largo (16×8 m) (Figura 5), cabe recalcar que, por cada tutor, existían dos plantas de pitahaya, dando como resultado 32 plantas por repetición

Figura 5

Distribución espacial de las plantas de pitahaya en el área específica de estudio



Nota: Imagen facilitada por el laboratorio de suelos ESPOL

Para la toma de datos dentro de la pitahaya se consideraron todas las plantas establecidas por tutor correspondientes a cada tratamiento, excluyéndose únicamente aquellas inexistentes o que presentaron mortalidad durante el periodo de evaluación.

2.3 Preparación de suelo y labores de campo

Previo al establecimiento del cultivo de maíz, se realizó la aplicación de biosólidos en cada parcela correspondiente; el material fue transportado desde el punto de recepción hasta las parcelas con apoyo de maquinaria tipo *bobcat* y, posteriormente, distribuido de forma manual para garantizar una aplicación homogénea sobre la superficie del suelo. Una vez realizada esta distribución, los biosólidos fueron incorporados al suelo mediante labores de labranza agrícola utilizando un tractor acoplado a una rastra.

Al establecerse el cultivo, se efectuaron las labores agronómicas habituales. El riego se realizó mediante un sistema de aspersion y se aplicaron fertilizaciones fraccionadas en todas las parcelas, utilizando fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio como urea, DAP y KCl, en diferentes momentos del ciclo (Tabla 3).

Tabla 1.

Distribución de fertilización aplicada al cultivo de maíz

Producto	Total (kg/área)	kg/ensayo					
		1ra aplicación		2da aplicación		3ra aplicación	
UREA	60,94	30%	18,28	40%	24,38	30%	18,28
DAP	57,60	100%	57,60	0%	0,00	0%	0,00
KCL	76,29	40%	30,52	60%	45,77	0%	0,00

Nota. Fertilización aplicada para el manejo nutricional de maíz por el laboratorio de suelos ESPOL

Finalmente, cuando fue necesario, se realizaron labores de control fitosanitario, incluyendo aplicaciones de herbicidas e insecticidas destinadas al manejo de malezas y plagas comunes en la zona, particularmente gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*)

En el cultivo de pitahaya, previo al establecimiento de las plantas, se realizó la instalación de los tutores, los cuales presentaron una altura aproximada de 1,50 metros y cumplieron la función de soporte para el crecimiento del cultivo. Posteriormente, se aplicaron los biosólidos en las unidades experimentales correspondientes. Asimismo, el manejo hídrico se efectuó mediante un sistema de riego por goteo, el cual resulta adecuado para cultivos perennes. Finalmente, las labores de manejo se centraron en el monitoreo del desarrollo vegetativo, manteniendo los tratamientos con y sin fertilización de acuerdo con el diseño experimental.

2.4 Tratamientos

2.4.1 Maíz

En el cultivo de maíz se establecieron siete tratamientos (T0–T6), los cuales se diferenciaron por la dosis de lodos residuales aplicados por hectárea y por la frecuencia de aplicación a lo largo del año. (Tabla 1).

Tabla 2

Dosis por hectárea del maíz

Tratamiento	Dosis (T(seco)/ha)	Aplicaciones por año	Rango de códigos
T0 (control)	0 ton/Ha	0	1 – 6
T1	18 ton/Ha	1	7 – 12
T2	36 ton/Ha	1	13 – 18
T3	54 ton/Ha	1	19 – 24
T4	72 ton/Ha	1	25 – 30
T5	18 ton/Ha	2	31 – 34
T6	36 ton/Ha	2	35 – 38

2.4.2 Pitahaya

En el cultivo de pitahaya se establecieron diez tratamientos (T0–T9), diferenciados por la aplicación o no de fertilización con lodos residuales y por la dosis aplicada por hectárea. Los tratamientos con fertilización correspondieron a dosis de 0, 18, 36, 54 y 72 t ha⁻¹ (base seca), mientras que los tratamientos sin fertilización incluyeron las mismas dosis como referencia experimental. Cada tratamiento fue identificado mediante una codificación numérica que integró tratamiento y repetición, facilitando el control de las unidades experimentales (Tabla 2).

Tabla 3

Dosis por parcela de la pitahaya

Tratamiento	Fertilización	Dosis (t ha⁻¹, base seca)	Rango de códigos
T0	Sí	0	1 – 6
T1	Sí	18	7 – 10
T2	Sí	36	11 – 13
T3	Sí	54	14 – 17
T4	Sí	72	18 – 20
T5	No	0	21 – 24
T6	No	18	25 – 28
T7	No	36	29 – 32
T8	No	54	33 – 36
T9	No	72	37 – 40

2.5 Variables agronómicas evaluadas

2.5.1 Maíz

En el cultivo de maíz se evaluaron diferentes variables agronómicas, las cuales se registraron de forma sistemática en los tres ciclos. En primer lugar, se midió la altura de planta, definida como la distancia desde la base del tallo, a nivel del suelo, hasta el punto más alto de la planta. Esta variable se determinó utilizando una cinta métrica, seleccionando plantas establecidas dentro de cada parcela efectiva de estudio.

La biomasa del cultivo de maíz se evaluó como un indicador del crecimiento y acumulación de materia seca de las plantas, para esto se consideró el peso de las hojas, de la flor y del tallo de la planta de maíz.

El rendimiento del cultivo de maíz se determinó con base en la producción obtenida por unidad de superficie. Para este fin, se cuantificó el peso del grano cosechado, diferenciando entre grano húmedo y grano seco, calculando primero el rendimiento por planta y posteriormente extrapolando estos valores a hectárea, expresando los resultados en toneladas por hectárea (ton/ha).

En conjunto, estas variables permitieron describir de manera integral el comportamiento del cultivo de maíz bajo los distintos tratamientos con lodos residuales y comparar no solo el desempeño dentro de un mismo ciclo, sino también la evolución de la respuesta entre los tres ciclos evaluados.

2.5.2 Pitahaya

En el caso de la pitahaya, debido a la naturaleza perenne del cultivo y al estado de desarrollo observado durante el periodo de estudio, se priorizó la evaluación de variables asociadas al crecimiento vegetativo. Para ello, se registró el número de plantas que lograron llegar hasta el tutor dentro de cada tratamiento, expresando los resultados como un porcentaje respecto al total de plantas evaluadas. Este indicador fue utilizado

como una medida del vigor y del establecimiento inicial del cultivo, permitiendo comparar la respuesta de la pitahaya bajo los distintos manejos con lodos residuales y/o fertilizantes.

2.6 Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos se realizó utilizando el software R. En primer lugar, los datos colectados fueron organizados por tratamiento y se calcularon los estadísticos descriptivos correspondientes, incluyendo el promedio y la desviación estándar de cada variable evaluada. Posteriormente, con los datos correspondientes al ciclo 3, se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) de manera independiente para cada variable, con el objetivo de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos.

Una vez identificadas posibles diferencias estadísticas mediante el ANOVA, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Dunnett, tomando como referencia el tratamiento control, con el propósito de identificar específicamente los tratamientos que presentaron diferencias significativas con y sin la aplicación de los biosólidos.

Adicionalmente, se efectuó un análisis comparativo entre ciclos de cultivo (ciclo 1, ciclo 2 y ciclo 3), mediante el cálculo de las diferencias entre los valores registrados en cada ciclo, lo que permitió evaluar la evolución de las variables medidas a lo largo del tiempo y analizar su comportamiento entre ciclos consecutivos.

Capítulo 3

3. Resultados

3.1 Caracterización fisicoquímica de los biosólidos

Los biosólidos evaluados presentaron contenidos elevados de materia orgánica, con un valor promedio de $40,4 \pm 6,81$ %, lo cual indica un alto potencial como enmienda orgánica del suelo. En comparación con el contenido promedio de materia orgánica reportado para la mayoría de los suelos agrícolas de la Costa de Ecuador, que generalmente es inferior al 2 %, estos valores son considerablemente superiores, lo que sugiere una alta capacidad para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incluyendo la estructura, la retención de humedad y la actividad microbiana. INIAP. (2006)

El contenido de carbono orgánico ($23,5 \pm 3,96$ %) y nitrógeno total ($3,21 \pm 0,43$ %), junto con una relación C: N baja ($7,29 \pm 0,33$), indica que la materia orgánica presente es fácilmente mineralizable, favoreciendo una rápida disponibilidad de N para los cultivos. (Brady & Weil, 2016). Este comportamiento es particularmente ventajoso en sistemas agrícolas intensivos, donde se requiere una liberación eficiente de nutrientes durante las etapas iniciales del crecimiento del cultivo.

El pH promedio de los biosólidos puede considerarse como neutro ($6,76 \pm 0,27$) en química de suelos, adecuado para la mayoría de los cultivos agrícolas y compatible con la actividad microbiana del suelo. Asimismo, la alta capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE: $81,3 \pm 3,57$ cmol kg⁻¹) refleja una elevada capacidad del material para retener y liberar nutrientes, contribuyendo a una mayor eficiencia en la fertilización. (Havlin et al, 2014)

No obstante, los valores de conductividad eléctrica ($5,57 \pm 0,46$ mS cm⁻¹) y salinidad ($3,03 \pm 0,27$ psu) sugieren que el lodo presenta una carga salina moderada, por lo que su aplicación debe realizarse de manera controlada, considerando dosis adecuadas y

características del suelo receptor, con el fin de evitar posibles efectos negativos por salinización, especialmente en suelos de baja capacidad de drenaje.

Tabla 4

Caracterización fisicoquímica de los lodos residuales valores promedios y desviación estandar por cada parámetro.

Parámetro	Promedio	± DE
Humedad (%)	72.00	0.00
pH	6.76	0.27
EC (mS cm ⁻¹)	5.57	0.46
Salinidad (psu)	3.03	0.27
CICe (cmol kg ⁻¹)	81.3	3.57
nitrógeno (%)	3.21	0.43
Carbono (%)	23.5	3.96
Relación carbono/nitrógeno	7.29	0.33
Materia orgánica (%)	40.4	6.81

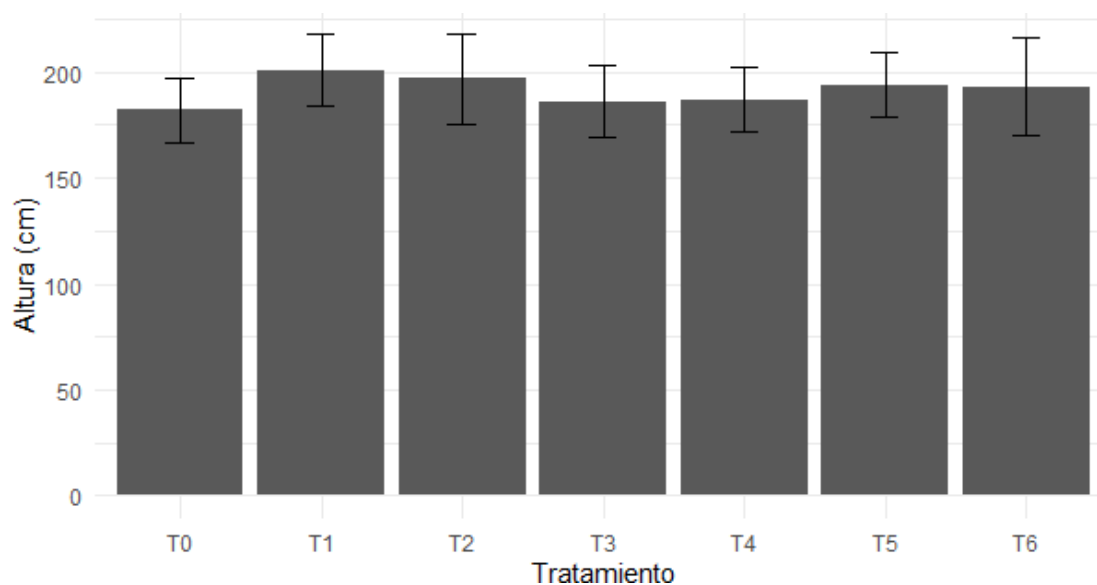
3.2 Evaluación agronómica del cultivo de maíz afectada por la aplicación de dosis incrementales de biosólidos

3.2.1 Altura total de la planta

Dentro del Ciclo 3, el análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para la altura de las plantas de maíz ($F = 5,856$; $p = 1,1 \times 10^{-5}$), indicando que la aplicación de biosólidos afectó el desarrollo vegetativo del cultivo. Como se observa en la Figura 6, las diferencias entre tratamientos se reflejan en los mayores valores promedio de altura registrados en las dosis intermedias, en comparación con el tratamiento control. La prueba de Dunnett mostró que las dosis de 18 t/ha (una y dos aplicaciones) y 36 t/ha (una aplicación) lograron incrementos significativos en altura respecto al control, mientras que las dosis más altas de 54 t/ha y 72 t/ha, así como la dosis de 36 t/ha aplicada dos veces, no generaron diferencias significativas. Este comportamiento indica que aumentar la dosis más allá de 36 t/ha/año puede ser poco positiva para el crecimiento del cultivo.

Figura 6

Efecto de las dosis de biosólidos sobre la altura del maíz en el Ciclo 3



Por otro lado, dentro de la tabla 5, se observa que las dosis de 18 t/ha y 36 t/ha (una aplicación) son las que logran alturas promedio superiores al control (0 t/ha) en el Ciclo 3. Específicamente, el control alcanzó $182 \pm 15,4$ cm, mientras que la dosis de 18 t/ha alcanzó $201 \pm 16,8$ cm, demostrando que esta dosis estimuló de manera más notable el crecimiento vegetativo del maíz. En contraste, la dosis más alta de 72 t/ha presentó la menor altura promedio, lo que sugiere que la aplicación excesiva de biosólidos puede afectar negativamente la elongación de los tallos y el vigor de la planta, probablemente debido a la acumulación de sales y estrés osmótico.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Gargiulo et al. (2023), quienes evaluaron los efectos de diferentes tasas de lodos residuales sobre maíz en ensayos de campo. Estos autores encontraron que dosis moderadas favorecieron el crecimiento vegetativo y la eficiencia en el uso de nitrógeno, mientras que dosis elevadas no generaron mejoras adicionales significativas

Tabla 5

Altura total promedio por tratamiento de la planta dentro de los ciclos

Tratamiento	Altura promedio (cm) C1	Altura promedio (cm) C2	Altura promedio (cm) C3	Diferencia C2/C1	Diferencia C2/C3	Diferencia C1/C3
T0	171	197	184	26,8	-13,8	13,0
T1	177	214	205	37,3	-8,7	28,6
T2	172	207	198	34,5	-8,4	26,2
T3	176	210	194	34,5	-16,6	17,9
T4	168	213	188	44,7	-25,4	19,3
T5	162	204	197	42,2	-7,2	35,1
T6	181	214	193	33,0	-20,8	12,2

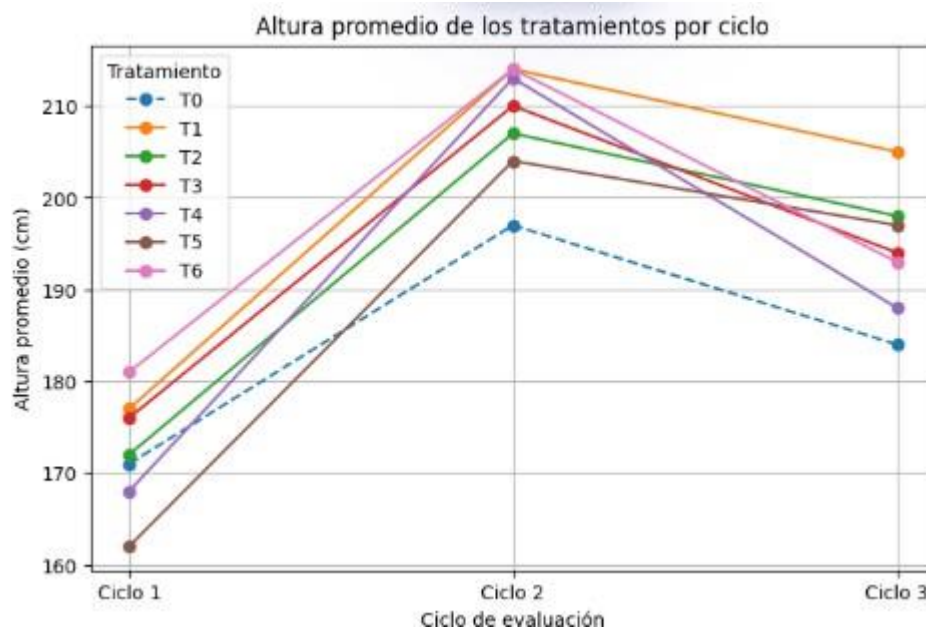
Promedio	172	209	194	36,1	-14,4	21,7
----------	-----	-----	-----	------	-------	------

Al comparar los tres ciclos de producción (Figura 7), se observa un patrón general de respuesta en la altura de la planta de maíz: del Ciclo 1 al Ciclo 2 se registró un aumento de la altura promedio en todas las dosis, incluido el control, lo que sugiere que las condiciones de manejo agronómico y ambientales durante el segundo ciclo de siembra favorecieron la elongación del tallo y el desarrollo vegetativo.

En contraste, del Ciclo 2 al Ciclo 3 se presentó una ligera disminución de altura (en promedio, 14,4 cm), lo cual puede asociarse con factores climáticos específicos (por ejemplo, variaciones en temperatura, estrés hídrico o eventos ambientales adversos) que limitaron temporalmente la elongación de la planta, afectando la respuesta vegetativa incluso en el control, sin aplicación de los biosólidos. Al comparar el Ciclo 3 respecto al Ciclo 1, todas las dosis muestran un incremento de altura, lo que confirma que las aplicaciones de lodos residuales favorecieron el crecimiento vegetativo en los ciclos evaluados, aunque la respuesta fue más marcada con dosis moderadas (por ejemplo, 18 t/ha y 36 t/ha) que con dosis elevadas.

Figura 7

Altura promedio de maíz, en función de los tratamientos y ciclos de cultivo



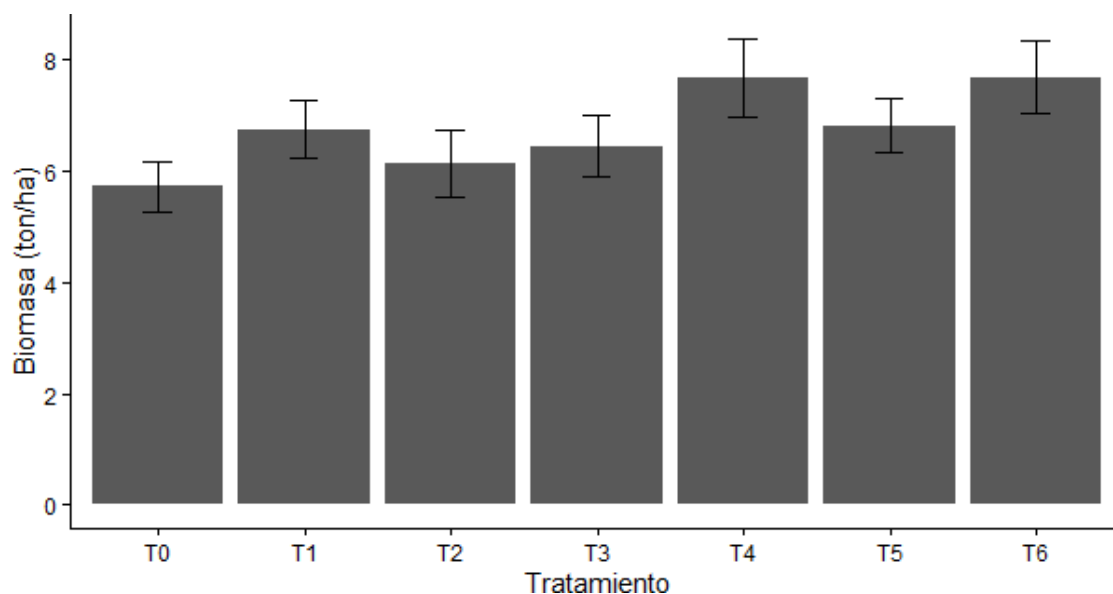
3.2.2 Biomasa

Dentro del Ciclo 3, aunque el análisis de varianza (ANOVA) para biomasa por hectárea no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 1,711$; $p = 0,162$), se observó una tendencia a mayores promedios de biomasa en tratamientos con dosis elevadas de biosólidos (por ejemplo, 36 t/ha con 7,67 t/ha y 72 t/ha con 7,66 t/ha) en comparación con el control (5,71 t/ha) (Figura 8). Si bien la respuesta no fue estadísticamente significativa, esta tendencia sugiere que la disponibilidad de nutrientes aportados por los biosólidos pudo haber contribuido parcialmente al incremento en la producción de materia seca. Diversos estudios han señalado que la acumulación total de biomasa en maíz está estrechamente relacionada con la disponibilidad de N en el suelo y su sincronización con la demanda del cultivo, así como con la disponibilidad hídrica durante las etapas de mayor crecimiento vegetativo (Cai et al., 2025). No obstante, cuando las dosis son elevadas, la respuesta puede no ser proporcional debido a posibles efectos de salinidad, desequilibrios

nutricionales o limitaciones en la mineralización del N orgánico (Koutroubas et al., 2023).

Figura 8

Efecto de las dosis de biosólidos sobre la Biomasa del maíz en el Ciclo 3



Aunque estas diferencias no fueron significativas estadísticamente, el comportamiento observado sugiere que la disponibilidad adicional de nutrientes aportados por los biosólidos, especialmente nitrógeno, pudo haber contribuido parcialmente al incremento en la producción de biomasa. La acumulación total de materia seca en maíz está estrechamente vinculada a la oferta de nitrógeno en el suelo y a su sincronización con la demanda fisiológica del cultivo durante las fases de crecimiento vegetativo activo. Asimismo, la disponibilidad hídrica durante estos periodos determina la eficiencia fotosintética y la conversión de foto asimilados en biomasa estructural.

Sin embargo, cuando las dosis aplicadas son elevadas, la respuesta productiva puede no ser proporcional al incremento de nutrientes suministrados. Esto puede deberse a efectos asociados a la acumulación de sales, posibles desequilibrios

nutricionales o a limitaciones en la mineralización del N orgánico contenido en los biosólidos, lo que reduce su disponibilidad inmediata para el cultivo. Por tanto, aunque las dosis altas mostraron valores promedio superiores, no evidenciaron ventajas estadísticamente robustas frente a dosis moderadas o al control.

Tabla 6

Biomasa total de maíz por tratamiento de la planta dentro de los ciclos. Los valores son los promedios por ciclo y la diferencias entre ciclo 2 y 1 (C2/C1), 3 y 2 (C3/C2) y 3 y 1 (C3/C1)

Tratamiento	Biomasa C1 (TON/Ha)	Biomasa C2 (TON/Ha)	Biomasa C3 (TON/Ha)	Diferencia C2C1	Diferencia C3-C2	Diferencia C3-C1
T0	6,13	8,64	5,71	2,51	-2,93	-0,42
T1	6,76	11,13	6,11	4,37	-5,02	-0,65
T2	7,14	11,03	6,69	3,89	-4,34	-0,45
T3	6,47	10,38	7,15	3,91	-3,23	0,68
T4	5,59	10,52	7,19	4,93	-3,33	1,6
T5	6,25	9,73	7,47	3,48	-2,26	1,22
T6	6,25	12,86	7,66	6,61	-5,2	1,41
Promedio	6,37	10,61	6,85	4,24	-3,76	0,48

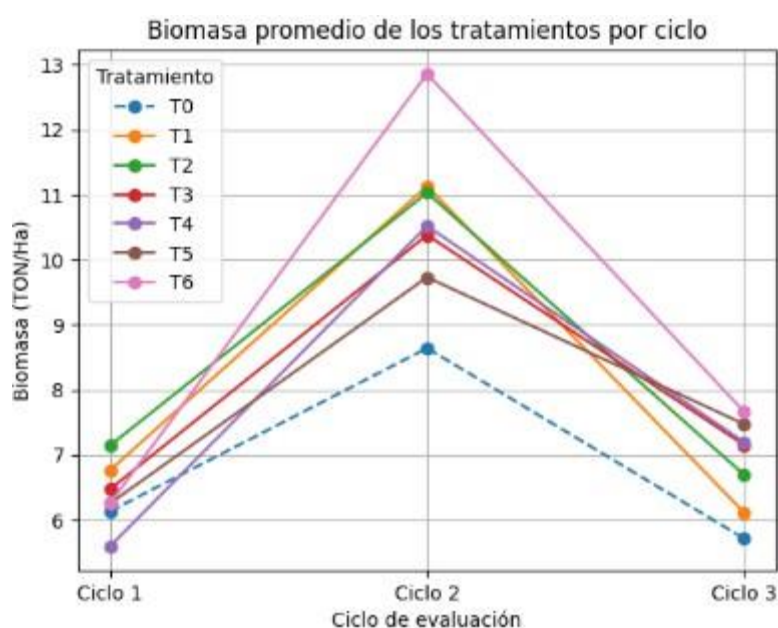
Al analizar el comportamiento de la biomasa a lo largo de los tres ciclos productivos (Figura 9), se observa un patrón claro de variación temporal. Del Ciclo 1 al Ciclo 2 se registró un incremento generalizado en todos los tratamientos, incluyendo el control, pasando de un promedio general de 6,46 t/ha a 10,46 t/ha. Este aumento podría explicarse por una mejora progresiva en la disponibilidad de nutrientes en el suelo tras las aplicaciones iniciales de biosólidos, así como por condiciones ambientales favorables como por ejemplo, las precipitaciones en época lluviosa.

En contraste, del Ciclo 2 al Ciclo 3 se evidenció una disminución promedio de la biomasa (-3,73 t/ha), comportamiento observado tanto en el tratamiento control como en aquellos con aplicación de biosólidos. Este descenso generalizado sugiere que factores externos al tratamiento, como variaciones climáticas interanuales, posibles periodos de déficit hídrico o episodios de estrés térmico, pudieron haber limitado la tasa

de crecimiento del cultivo y la duración efectiva del periodo de acumulación de biomasa. La evidencia científica indica que temperaturas elevadas y restricciones hídricas reducen la eficiencia fotosintética y aceleran la senescencia foliar, afectando directamente la producción de materia seca por hectárea.

Figura 9

Biomasa promedio en función de los tratamientos y ciclos de cultivo



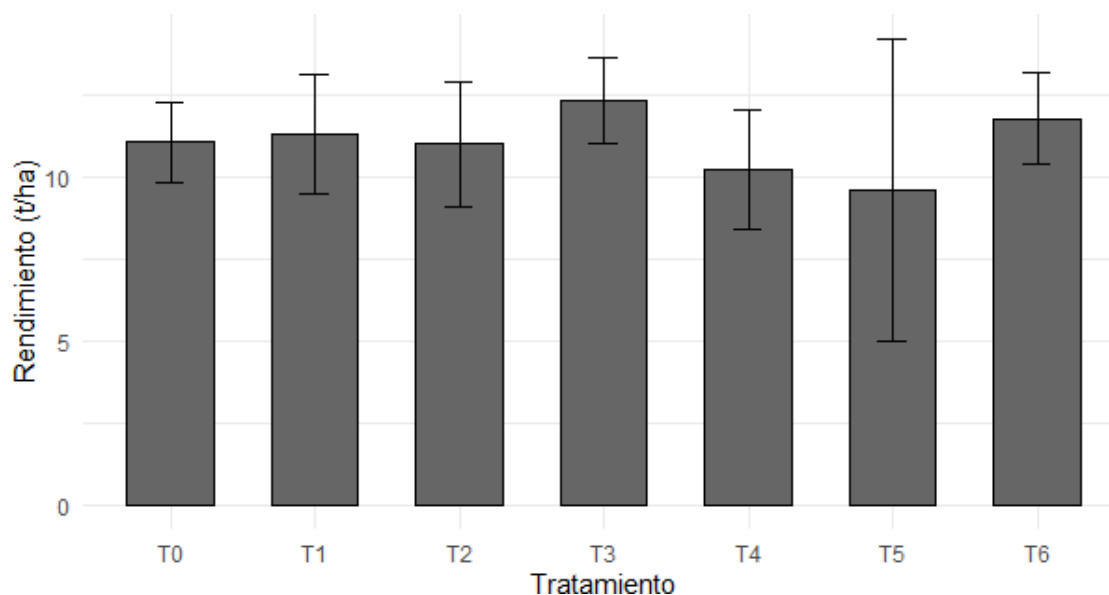
En conjunto, los resultados indican que la aplicación de biosólidos mostró una tendencia positiva en la acumulación de biomasa, particularmente en dosis moderadas a altas; sin embargo, dicha respuesta no fue estadísticamente significativa en el Ciclo 3. Esto sugiere que, bajo determinadas condiciones ambientales, la variabilidad interanual puede tener un peso mayor en la producción de biomasa que las diferencias entre dosis aplicadas, resaltando la importancia de considerar la interacción entre manejo nutricional y condiciones climáticas en la evaluación agronómica del cultivo.

3.2.3 Rendimiento

Dentro del Ciclo 3, aunque el análisis de varianza (ANOVA) para rendimiento por hectárea no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($F = 0,741$; $p = 0,622$), se observó una tendencia a mayores promedios de rendimiento en algunos tratamientos con mayores dosis de aplicación de biosólidos en comparación con el control (por ejemplo, T3 con 12,1 t/ha y T6 con 11,80t/ha frente a T0 con 11,1 t/ha) (Figura 10). Si bien la respuesta no fue estadísticamente significativa, esta tendencia sugiere que la disponibilidad de nutrientes y el manejo aplicado pudieron haber contribuido parcialmente al incremento en la producción de grano.

Figura 10

Efecto de las dosis de biosólidos sobre el rendimiento de cultivo en el Ciclo 3



Aunque las diferencias no alcanzaron significancia estadística, el comportamiento observado sugiere que el manejo nutricional adicional pudo haber contribuido parcialmente al incremento en el rendimiento. La acumulación de grano por hectárea

depende de la disponibilidad de nutrientes durante las fases críticas de desarrollo y del adecuado suministro de agua, factores que determinan la eficiencia fotosintética y la conversión de fotoasimilados en grano.

Sin embargo, los tratamientos con mayor rendimiento promedio no mostraron diferencias significativas frente al control, indicando que la variabilidad natural entre plantas y ciclos puede tener un peso mayor que el efecto de las dosis aplicadas en la producción final de grano. Por tanto, aunque algunos tratamientos mostraron valores superiores, esta tendencia no fue estadísticamente robusta para el Ciclo 3.

Tabla 7

Rendimiento promedio por tratamiento de la planta dentro de los ciclos

Tratamiento	C1 (ton/ha)	C2 (ton/ha)	C3 (ton/ha)	Δ C2-C1	Δ C3-C2	Δ C3-C1
T0	7,09	7,23	11,07	0,13	3,84	3,98
T1	7,85	7,71	11,10	-0,14	3,39	3,25
T2	5,29	7,89	11,03	2,60	3,14	5,74
T3	5,98	8,67	12,11	2,69	3,44	6,13
T4	6,17	7,41	9,76	1,24	2,35	3,59
T5	5,86	8,02	10,92	2,16	2,90	5,06
T6	8,17	8,87	11,80	0,70	2,93	3,63
Promedio	6,63	7,97	11,11	1,34	3,14	4,48

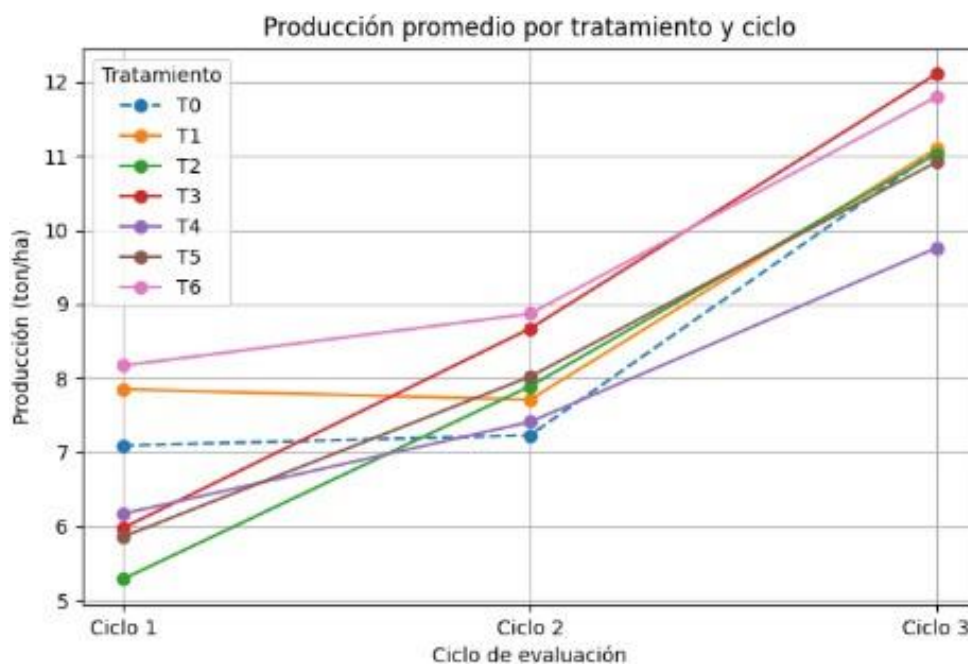
Al analizar el comportamiento del rendimiento a lo largo de los tres ciclos productivos (Figura 11), se observa un patrón de incremento generalizado desde el Ciclo 1 al Ciclo 3, con algunas variaciones entre tratamientos. Del Ciclo 1 al Ciclo 2 se registró un cambio moderado en los rendimientos, mientras que del Ciclo 2 al Ciclo 3 se observó un aumento más marcado en la mayoría de los tratamientos, sugiriendo que factores nutricionales y manejo agronómico pudieron favorecer la acumulación de grano por hectárea.

En conjunto, los resultados indican que aunque algunos tratamientos mostraron valores promedio superiores, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas

en el Ciclo 3, resaltando la importancia de considerar tanto el manejo nutricional como la variabilidad natural y las condiciones ambientales al evaluar el rendimiento final del maíz.

Figura 11

Rendimiento promedio en función de los tratamientos y número de ciclos de maíz sembrados



3.3 Impacto de la aplicación de biosólidos en el pH y la salinidad del suelo durante los tratamientos y ciclos de cultivo

Tabla 8

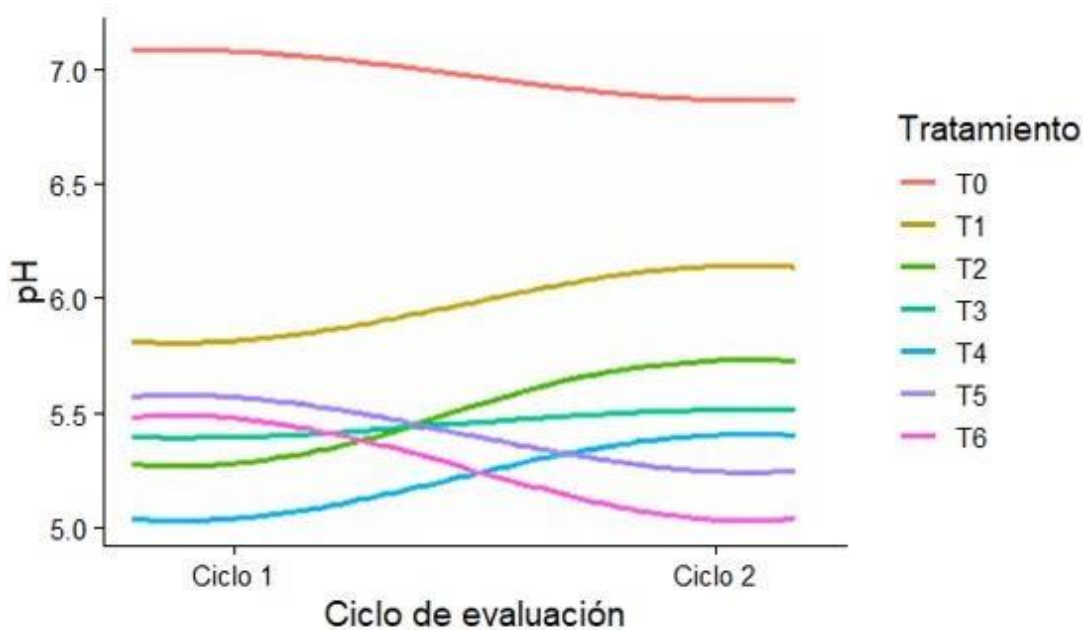
Variación de pH y salinidad por tratamiento en los ciclos iniciales

CICLO 1			CICLO 2		
Tratamiento	pH	Salinidad (psu)	Tratamiento	pH	Salinidad (psu)
T0	7,12	0,04	T0	6,90	0,05
T1	5,82	0,27	T1	6,16	0,08
T2	5,27	0,77	T2	5,72	0,14
T3	5,39	0,62	T3	5,51	0,20
T4	5,03	0,96	T4	5,4	0,23
T5	5,57	0,32	T5	5,24	0,56
T6	5,48	0,53	T6	5,03	0,63

Al analizar el impacto de los biosólidos dentro de ambos ciclos (Figura 10) se evidencia que el pH más alto se registró en el testigo (T0: 7,12 en Ciclo 1 y 6,90 en Ciclo 2), mientras que los valores más bajos se observaron en los tratamientos de mayor dosis (T4 en Ciclo 1 con 5,03 y T6 en Ciclo 2 con 5,03), lo que confirma un efecto acidificante asociado al aumento de biosólidos aplicados. Esta disminución progresiva del pH sugiere una mayor liberación de protones y acumulación de compuestos con efecto ácido en la solución del suelo, fenómeno que puede modificar la disponibilidad de nutrientes y aumentar la solubilidad de elementos potencialmente tóxicos en rangos ácidos (Rengel, 2022).

Figura 12

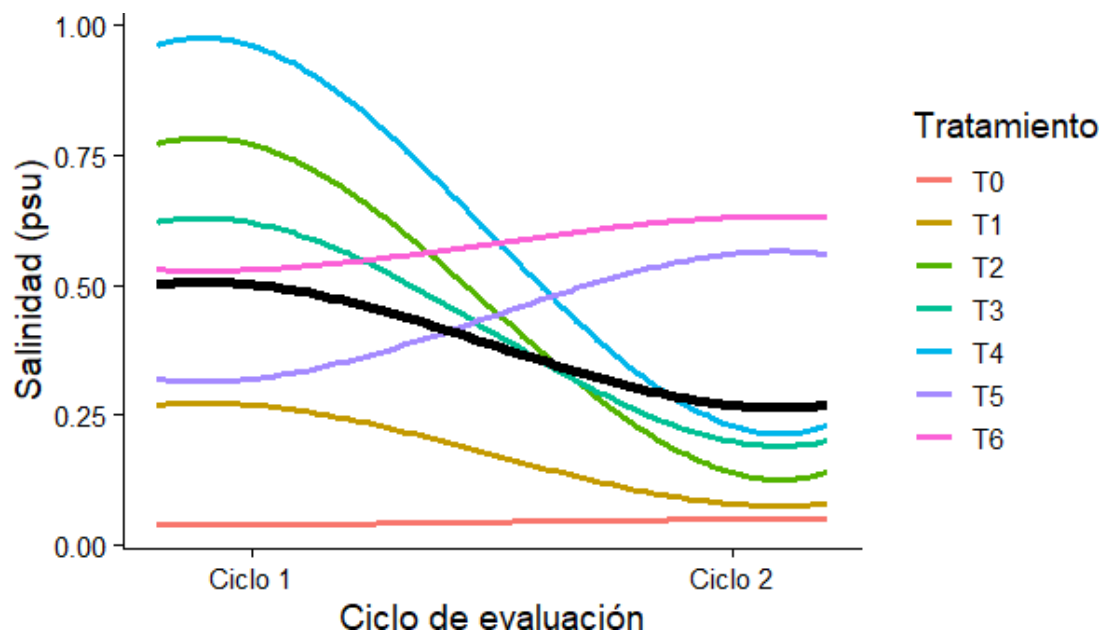
Evolución del pH del suelo a través de los ciclos de cultivo



De forma paralela, la salinidad alcanzó sus valores más altos en los tratamientos de mayor dosis (Figura 11), particularmente en T4 durante el Ciclo 1 (0,96 psu), evidenciando una acumulación significativa de sales solubles. En el Ciclo 2, aunque algunos tratamientos mostraron una reducción de la salinidad respecto al ciclo anterior, la tendencia general de incremento con la dosis se mantuvo, lo que sugiere procesos combinados de aporte iónico y redistribución de sales en el perfil del suelo, tal como describe la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021).

Figura 13

Variación de la salinidad del suelo a lo largo de los ciclos de cultivo



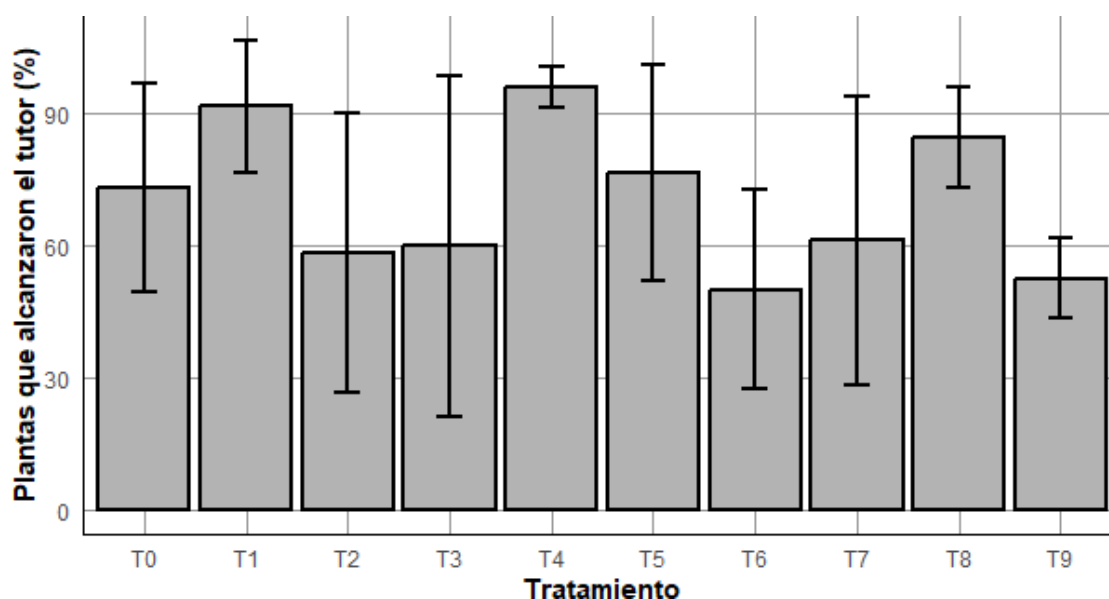
En conjunto, los resultados indican que el aumento de la dosis tiende a inducir acidificación y acumulación de sales en el corto plazo, mientras que entre ciclos se observa una ligera estabilización del pH y una redistribución parcial de sales, posiblemente asociada a la capacidad tampón del suelo y a procesos de lixiviación (Singh et al., 2023; Machado & Serralheiro, 2021). A lo largo del tiempo, esta dinámica refleja un sistema que intenta autorregularse, aunque la persistencia de tratamientos de alta dosis podría favorecer una degradación química progresiva del suelo si no se implementan estrategias de manejo adecuadas, aspecto señalado también por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) en relación con la sostenibilidad de los suelos agrícolas.

3.4 Efecto de la aplicación de los biosólidos en el desarrollo agronómico de la pitahaya

3.4.1 Análisis de crecimiento vegetativo por textura de suelo

Figura 14

Variabilidad del porcentaje de plantas que alcanzaron el tutor por tratamiento



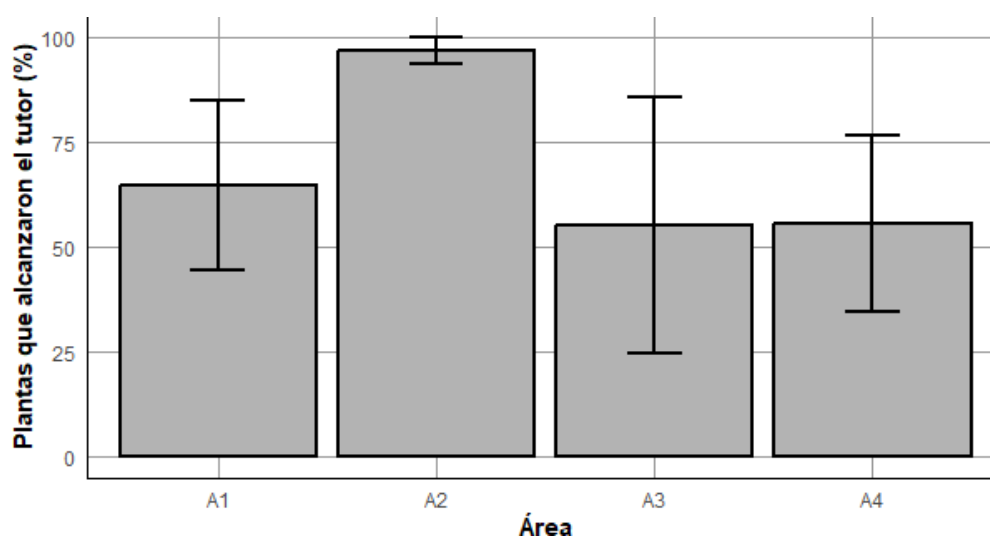
El gráfico de variabilidad por tratamiento muestra que la aplicación de lodos residuales tuvo un efecto positivo sobre el porcentaje de plantas de pitahaya que alcanzaron el tutor, observándose una tendencia general de incremento en la respuesta del cultivo a medida que aumentó la dosis aplicada. Los tratamientos que combinaron lodos residuales con fertilización complementaria (T1–T4) presentaron, en promedio, los mayores porcentajes de plantas que alcanzaron el tutor, destacándose el tratamiento con la dosis más alta (72 t ha⁻¹). Este comportamiento sugiere que la adición de lodos residuales contribuye al suministro de nutrientes y materia orgánica, favoreciendo el crecimiento vegetativo y el vigor de las plantas.

Tabla 9*Análisis de textura de suelo*

	%ARENA	%ARCILLA	%LIMO	TIPO DE SUELO	Promedio/ plantas alcanzaron tutor
Area 1	38,4	46,6	14,8	arcilloso	65%
Area 2	53,0	31,9	14,9	Franco arcillo arenoso	97%
Area 3	32,9	47,0	20,0	Arcilloso	55%
Area 4	45,4	37,0	17,5	Arcilla arenosa	55%

Figura 15

Variabilidad del porcentaje de plantas que alcanzaron el tutor por áreas con diferencias en textura



El análisis por área evidencia diferencias en el porcentaje de plantas que alcanzaron el tutor, lo cual puede asociarse a las características físicas inherentes del suelo, particularmente la textura. El Área 2 presentó el mayor porcentaje promedio, lo que coincide con su clasificación textural franco arcillo arenosa, condición que favorece una adecuada retención de humedad y disponibilidad de nutrientes. Por el contrario, las áreas con texturas más arcillosas o con menor equilibrio mostraron valores más bajos y una mayor variabilidad en la respuesta.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- El aprovechamiento de lodos residuales (biosólidos) como enmienda edáfica en suelos de baja fertilidad, mediante su aplicación controlada en los cultivos de maíz y pitahaya, permitió generar información técnica confiable que respalda su uso como una alternativa viable dentro de sistemas de producción agrícola sostenibles.
- La aplicación de biosólidos en diferentes dosis produjo efectos diferenciados sobre las características agronómicas de los cultivos evaluados, evidenciándose variaciones en el desarrollo vegetativo del maíz y en el crecimiento estructural de la pitahaya, particularmente en el porcentaje de plantas que alcanzaron el tutor.
- El análisis de información correspondiente a ciclos anteriores del cultivo de maíz permitió identificar cambios a nivel agronómico y en las propiedades del suelo asociados a la aplicación de biosólidos, aportando elementos comparativos que fortalecen la interpretación de los resultados obtenidos en el presente estudio.
- La caracterización de los biosólidos mediante parámetros físicos y químicos permitió verificar su calidad para uso agrícola, asegurando que los tratamientos aplicados se realizaron bajo condiciones técnicas adecuadas y que los resultados obtenidos son confiables y reproducibles.

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar estudios a mediano y largo plazo que permitan evaluar el efecto acumulativo de los biosólidos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su influencia en el rendimiento final de los cultivos.
- Es aconsejable incorporar análisis microbiológicos y de metales pesados en futuros trabajos, con el fin de garantizar la seguridad ambiental y agronómica del uso continuo de biosólidos en suelos agrícolas.
- Para el cultivo de pitahaya, se sugiere incluir variables agronómicas adicionales, como diámetro del tallo, número de brotes y tiempo hasta la floración, que permitan una evaluación más integral del efecto de las aplicaciones de biosólidos sobre el desarrollo del cultivo.
- Se recomienda evaluar diferentes dosis y formas de aplicación de biosólidos en distintas condiciones agroecológicas, con el propósito de optimizar su uso y generar criterios técnicos específicos para su implementación en prácticas agrícolas sostenibles.

Referencias

- Abarzúa Torres, M. (2022). *Impacto de enmiendas orgánicas sobre propiedades del suelo y productividad agrícola*. Editorial Universitaria.
- Amorim Júnior, J., Silva, R., & Costa, L. (2021). Utilización de lodos residuales como fertilizante orgánico en suelos agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45(3), 1–15.
- Assefa, T., Zhang, H., & Vyn, T. (2020). Maize growth response to organic amendments under tropical conditions. *Agronomy Journal*, 112(4), 2783–2795. <https://doi.org/10.1002/agj2.20255>
- Bourioug, M., et al. (2020). Environmental risk assessment of biosolids application in agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 710, 136302. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896971936302X>
- Ciampitti, I., & Vyn, T. (2021). Maize productivity and nutrient partitioning under different management practices. *Field Crops Research*, 260, 107978. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107978>
- Collivignarelli, M. C., et al. (2019). Agronomic use of treated sewage sludge: Environmental and health aspects. *Journal of Environmental Management*, 244, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018). *Gestión de lodos residuales en zonas urbanas*. <https://www.gob.mx/conagua>
- Cortés-Tello, J., & Jaramillo-López, P. (2020). Efecto de biosólidos y enmiendas orgánicas sobre el rendimiento de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(7), 1235–1247.

- da Silva, R., et al. (2020). Availability of phosphorus in biosolids-amended soils under tropical conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1421–1432. <https://doi.org/10.1002/saj2.20077>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2018). *Beneficial use of biosolids in agriculture*. <https://www.epa.gov/biosolids>
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2020). *Soil fertility and productivity in Latin America*. <https://www.fao.org>
- Grassini, P., et al. (2021). Determinants of maize yield gaps in tropical and subtropical regions. *Field Crops Research*, 264, 108087. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108087>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2019). *Plantas de tratamiento de aguas residuales en Ecuador*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec>
- Koutroubas, S., et al. (2023). Biosolids application and maize yield in Europe: Efficiency of nitrogen use. *European Journal of Agronomy*, 142, 126574. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S116103012300574X>
- Le Bellec, F., et al. (2020). Pitahaya production and plant management in tropical regions. *Horticulturae*, 6(4), 45. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6040045>
- Li, X., et al. (2023). Microplastics and emerging contaminants in biosolids applied to soils. *Environmental Pollution*, 318, 120750. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120750>
- Marchuk, A., et al. (2023). Agricultural utilization of biosolids in Australia: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 401, 136415. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623016415>

- Martínez Durán, J., et al. (2023). Effect of organic amendments on pitahaya growth and soil fertility in tropical soils. *Scientia Horticulturae*, 315, 111833. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.111833>
- McDonough, C., et al. (2022). PFAS in biosolids and implications for agriculture. *Environmental Science & Technology*, 56(4), 2345–2356. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06980>
- Moraes, J., et al. (2020). Organic amendments and soil fertility improvements in Latin America. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(5), 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00637-4>
- Morgan, J., et al. (2024). Microbial activity in soils amended with biosolids: Implications for fertility. *Soil Biology & Biochemistry*, 181, 108940. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003807172300940X>
- Ortiz-Hernández, F., & Carrillo-Salazar, J. (2021). Pitahaya (*Hylocereus* spp.) physiology and production under CAM metabolism. *Tropical Plant Biology*, 14(2), 102–115. <https://doi.org/10.1007/s12042-021-09278-4>
- Pineda, R., et al. (2022). Nitrogen and phosphorus dynamics in biosolid-amended soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(4), 1857–1870. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00745-2>
- Ramírez, L., et al. (2017). Disposición y manejo de lodos residuales: Retos ambientales. *Revista de Gestión Ambiental*, 23(1), 45–59.
- Rodríguez González, M., et al. (2024). Producción y gestión de biosólidos en tratamiento de aguas residuales. *Revista Iberoamericana de Ingeniería*, 31(2), 210–225.
- Sepúlveda-Varas, P., et al. (2011). Effects of biosolids on degraded soils in Chile: Physical and chemical properties. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 71(3), 450–460. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392011000300017>

- Sharma, A., et al. (2017). Nutrient recovery from biosolids and its use in agriculture. *Environmental Technology & Innovation*, 7, 49–60.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.11.002>
- Tokatlidis, I., & Koutroubas, S. (2020). Maize growth and yield determinants under different fertilization regimes. *Field Crops Research*, 246, 107635.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037842901930635X>
- Tyła, M. (2019). Heavy metal accumulation in crops amended with biosolids. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191, 347.
<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7481-8>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2023). *Guidelines for safe land application of biosolids containing PFAS*. <https://www.epa.gov>
- Villarroel Valderrama, J. (2023). Soil fertility enhancement with organic amendments. *Revista Chilena de Agricultura*, 87(2), 112–124.
- Zhang, H., et al. (2022). Biomass accumulation and nitrogen efficiency in maize under organic amendments. *Agronomy Journal*, 114(1), 45–59.
<https://doi.org/10.1002/agj2.20989>