

**REUSO DE EFLUENTES PORCICOLAS MEDIANTE FERTIRRIEGO:
EFECTOS SOBRE LA SALUD DEL SUELO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL
PASTO ESTRELLA (*Cynodon nlemfuensis*), EN UN ESTUDIO DE CASO EN EL
MUNICIPIO DE FUSAGASUGA – CUNDINAMARCA**

CESAR AUGUSTO RAMIREZ LEYVA

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DIRECCION DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
FUSAGASUGA, CUNDINAMARCA**

2025

**REUSO DE EFLUENTES PORCICOLAS MEDIANTE FERTIRRIEGO:
EFECTOS SOBRE LA SALUD DEL SUELO Y LA PRODUCTIVIDAD DEL
PASTO ESTRELLA (*Cynodon nlemfuensis*), EN UN ESTUDIO DE CASO EN EL
MUNICIPIO DE FUSAGASUGA – CUNDINAMARCA**

CESAR AUGUSTO RAMIREZ LEYVA

Trabajo de Grado como requisito parcial para optar al título de la

Maestría en Ciencias Ambientales

Directora del Proyecto:

Ana Catalina Avella Vásquez

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DIRECCION DE POSGRADO
MAESTRIA EN CIENCIAS AMBIENTALES
FUSAGASUGA, CUNDINAMARCA**

2025

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

El autor expresa sus agradecimientos a:

¡Dios primero que todo! por regalarme la vida y su Bendición constante. Por permitirme culminar mi vida académica con este aporte, en beneficio de los amamos nuestra profesión, el campo y trabajamos por un mundo mejor.

La enseñanza del Maestro, el ejemplo de Superación,

¡La Constancia, el esfuerzo y Don Divino del Amor...eso y mucho más...! ¡Tú Madre mía! ¡A la mujer que me dio la vida...porque me enseñó desde pequeño a llevar en mi corazón cada palabra, consejo y ejemplo suyos! Herramientas con las que siempre pude alcanzar mis sueños.

¡A mi amada esposa, a mi familia! por su respaldo, palabras de aliento y apoyo en los momentos difíciles.

Al señor Jeremías Quevedo Castillo, propietario de la granja Buenavista, a su señora esposa y a su hija Ana Milena Quevedo, por confiar en mí y brindarme su inmensurable apoyo y respaldo durante la ejecución del presente trabajo. Sin ellos no hubiera sido posible. Y, por supuesto, a cada uno de los funcionarios de su granja por acogerme como un miembro más de esa gran familia

INDICE

Contenido

GLOSARIO	17
Introducción	18
Capítulo 1. Planteamiento del problema.....	21
1.1 Descripción del Problema.....	21
1.2 Antecedentes	22
1.3 Pregunta de Investigación.....	25
Capítulo 2. Justificación.....	26
Capítulo 3. Objetivos e hipótesis	30
3.1 Objetivo general.....	30
3.1.1 Hipótesis general.....	30
3.2 Objetivos específicos e hipótesis	30
–Objetivo Específico 1 (Suelo).....	30
–Objetivo Específico 2 (Forraje - Productividad, Calidad y Morfología).....	31
–Objetivo Específico 3 (Interacción).....	31
Capítulo 4. Marco teórico	32
4.1 Evolución normativa y contexto nacional en Colombia.....	32
4.2 El sistema suelo-planta y su relevancia en la productividad forrajera.....	33
4.3 Potencial agronómico de los efluentes porcícolas.....	34
4.3.1 Reúso de efluentes porcícolas y economía circular.....	35
4.3.2 Fertirriego como estrategia de manejo sostenible.....	36

4.3.3 Bioles: definición, composición y efectos.	37
4.3.4 Porcinaza líquida: un subproducto con potencial fertilizante.	39
4.4 Salud del suelo y fertilización orgánica.	41
4.5 Calidad de forrajes y nutrición animal.	44
4.6 El pasto Estrella africana (<i>Cynodon nlemfuensis</i>): Características, Usos y Requerimientos Agronómicos.	46
4.6.1 Descripción Botánica y potencial Forrajero.	47
4.6.2 Requerimientos Nutricionales Esenciales.	47
4.6.3 características de suelo y adaptación edafoclimática.	48
4.7. Métodos estadísticos multivariados aplicados en estudios agrícolas.	50
4.7.1. Correlación de Spearman.	50
4.7.2. Análisis de Coordenadas Principales (PCoA).	51
4.7.3. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA).	52
4.7.4. Análisis de Componentes Principales (PCA).	53
4.7.5. Software estadístico PAST.	54
Capítulo 5. Marco Metodológico.	55
5.1. Localización y condiciones ambientales.	55
5.2. Material biológico.	56
5.2.1. Caracterización de la Porcinaza Líquida (año 2018).	56
5.2.2. Caracterización del Biol (año 2024).	57
5.2.3. Pradera de Pasto Estrella Africana.	59
5.3. Diseño de la investigación y estructura del estudio.	59
5.3.1. Justificación del diseño y de los tiempos de medición.	61

5.3.2. Descripción de las unidades experimentales y aplicación de tratamientos.....	62
5.3.3. Muestreo del suelo	63
5.3.4. Muestreo del forraje.....	67
5.4. Plan de análisis estadístico.....	67
5.4.1. Análisis exploratorio preliminar: Correlación de Spearman.....	68
5.4.2. Análisis de Coordenadas Principales (PCoA).....	69
5.4.3. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA).....	71
5.4.4. Análisis de Componentes Principales (PCA).....	71
5.4.5. Justificación integral del enfoque estadístico	72
Capítulo 6. Resultados	73
6.1. Caracterización inicial del suelo (Día 1).....	73
6.1.1. Interpretación descriptiva del Lote Biodigestor (Día 1)	74
6.1.2. Interpretación descriptiva del Lote Hernando (Día 1)	77
6.1.3. Comparación técnica entre lotes (Día 1).....	81
6.2.1. Cambios químicos en el Lote Biodigestor (Día 1 vs. Día 45)	82
6.2.2. Cambios químicos en el Lote Hernando (Día 1 vs. Día 45).....	88
6.2.3. Comparación técnica entre lotes (Día 1 vs Día 45)	93
6.3. Comparación entre tratamientos	94
6.3.1. Comparación de tratamientos en el Lote Biodigestor.....	97
6.3.2. Comparación de tratamientos en el Lote Hernando.....	99
6.3.3. Síntesis comparativa general entre tratamientos.....	100
6.4. Capacidad de carga y productividad del forraje.....	101
6.4.1. Productividad del forraje en el Lote Biodigestor.....	102

6.4.2. Productividad del forraje en el Lote Hernando.....	104
6.4.3. Síntesis descriptiva entre lotes	105
6.5. Crecimiento del pasto: altura semanal y tasa de crecimiento	106
6.5.1. Comportamiento del crecimiento en el Lote Biodigestor	108
6.5.2. Comportamiento del crecimiento en el Lote Hernando	109
6.5.3. Síntesis comparativa entre lotes.....	111
6.6. Análisis multivariado del suelo, forraje y productividad (PCoA, CCA y PCA).....	111
6.6.1 Análisis exploratorio de correlación entre variables del suelo (Spearman).....	112
6.6.2. PCoA del suelo en función del Día (1 y 45) y los tres tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo) - Lote Biodigestor	117
6.6.3. PCoA del suelo en función del Día (1 y 45) y los tres tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo) - Lote Hernando	119
6.6.4. PCoA del suelo en función de los días, lotes y tratamientos (Lotes Biodigestor y Hernando)	121
6.6.5. CCA del suelo en función del Lote, Día y Tratamiento	123
6.6.6. PCoA de la calidad bromatológica del forraje – Lote Biodigestor	125
6.6.7. PCoA de la calidad bromatológica del forraje- Lote Hernando.....	126
6.6.8. (PCA) del Crecimiento del Pasto Estrella Africana, Día 1 y Día 45 en relación a los lotes y propiedades fisicoquímicas del suelo.....	128
6.6.9. PCoA Análisis Multivariado Suelo–Crecimiento mediante.....	130
Capítulos 7. Análisis de resultados	132
7.1. Cambios químicos del suelo bajo fertirriego con Biol y Porcinaza.....	132
7.2. Productividad y calidad bromatológica del forraje	134

7.3. Crecimiento del pasto y capacidad de carga	135
7.4. Aporte de los análisis multivariados (PCoA, CCA y PCA)	136
7.5.1. Implicaciones agronómicas principales	138
7.5.2. Riesgos ambientales y consideraciones de sostenibilidad	141
7.5.3. Síntesis general	142
Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones	143
8.1. Conclusiones	143
8.1.1. Cambios químicos del suelo bajo fertirriego con Biol y Porcinaza	143
8.1.2. Productividad y calidad bromatológica del forraje	144
8.1.3. Crecimiento semanal, dinámica del rebrote y capacidad de carga	144
8.1.4. Síntesis general	145
8.2. Recomendaciones	146
8.2.1. Recomendaciones agronómicas	146
8.2.2. Recomendaciones para futuros estudios	146
8.2.3. Recomendaciones de manejo sostenible	147
8.2.4. Cierre general del capítulo	147
Referencias	148

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Alineación del proyecto con las agendas de sostenibilidad y planificación en Colombia.	28
Tabla 2 Requerimientos del Pasto Estrella.	49
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de los efluentes utilizados (Biol y Porcinaza líquida) (Agrilab Laboratorios S.A.S., 2018; 2023–2024).....	57
Tabla 4 Estructura del diseño de la investigación	61
Tabla 5 Distribución de tratamientos en los bloques naturales del estudio.....	63
Tabla 6 Requerimientos de muestra y métodos analíticos empleados para el análisis de suelos. 66	
Tabla 7 Propiedades químicas iniciales del suelo en los lotes Biodigestor y Hernando (Día 1) . 73	
Tabla 8 Productividad de biomasa fresca (kg/m ²) a los 45 días por lote y tratamiento	102
Tabla 9 Parámetros bromatológicos del forraje en el Lote Biodigestor.....	102
Tabla 10 Tabla bromatológica – Lote Hernando	104
Tabla 11 Promedio semanal de altura del pasto, altura final y crecimiento promedio en los lotes Biodigestor y Hernando (Día 1–Día 45).....	107
Tabla 12 Procedimiento operativo recomendado para fertirriego sostenible en suelos arcillo– arenosos aplicando biol.....	140

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ubicación espacial de la Granja Buena Vista	55
Ilustración 2 Biodigestores Granja Buena Vista (fuente de biol del estudio)	57
Ilustración 3 lote Hernando establecimiento de parcelas para muestreos.....	60
Ilustración 4 Metodo de movilizacion de efluentes porcinaza, Biol para lotes respectivos.	63
Ilustración 6 Muestras de forraje para posterior rotulación	67
Ilustración 7 Grafica de barras de cada tratamiento (PH, CE).....	75
Ilustración 8 Grafica de barras de cada tratamiento (MO, COOx y CICE día 1- lote Biodigestor)	75
Ilustración 9 Grafico de barras, Macronutrientes del suelo (Dia 1 - Lote Biodigestor.....	76
Ilustración 10 Grafico de barras Micronutrientes del suelo (Dia 1 - Lote Biodigestor).....	77
Ilustración 11 Grafico de barras PH y conductividad (lote Hernando, día 1).....	78
Ilustración 12 Grafica de barras de cada tratamiento (MO, COOx y CICE día 1- lote Hernando)	79
Ilustración 13 Grafica de barras Macronutrientes del suelo (día 1 lote Hernando).....	80
Ilustración 14 Grafica de barras Micronutrientes del suelo (día 1 lote Hernando).....	81
Ilustración 15 Grafico de barras lote biodigestor día 1 vs día 45	83
Ilustración 16 grafico de barras lote biodigestor día 1 vs día 45 Conductividad eléctrica del suelo	84
Ilustración 17 Lote Biodigestor MO y COOx día 1 vs día 45	85
Ilustración 18 Grafico de barras CICE lote biodigestor (día 1 vs día 45).....	86
Ilustración 19 grafico de barras lote biodigestor Macronutrientes del suelo (día 1 vs día 45)	86

Ilustración 20 grafico de barras lote Hernando PH día 1 vs día 45	89
Ilustración 21 Grafico de barras lote Hernando conductividad eléctrica (CE).....	90
Ilustración 22 Grafico de barras, Lote Hernando, día 1 vs día 45	91
Ilustración 23 Grafico de barras Cambios químicos del suelo-Lote Biodigestor	93
Ilustración 24 Cambios químicos del suelo-Lote Hernando.....	94
Ilustración 25 Cantidad de nutrientes asimilables- Tratamiento Porcinaza en los 2 lotes (Día 45)	95
Ilustración 26 Cantidad de nutrientes asimilables- Tratamiento Biol en los 2 lotes Día 45	96
Ilustración 27 Cantidad de nutrientes asimilables- Tratamiento Testigo en los 2 lotes (Día 45)..	97
Ilustración 28 Cambios macro y micronutrientes - Lote Biodigestor.....	98
Ilustración 29 Cambios en micro y macronutrientes- Lote Hernando	99
Ilustración 30 Capacidad de Carga en Kilos/mt ² - Lote Biodigestor Vs Lote Hernando (Día 45 según muestra y bibliografía).....	101
Ilustración 31 Cambios en las fracciones nutricionales del forraje bajo tres tratamientos (Lote Biodigestor).....	103
Ilustración 32 Productividad del forraje en el Lote Hernando.....	105
Ilustración 33 Distribución de porcinaza lote Hernando	107
Ilustración 34 Altura de pasto al transcurrir el tiempo con cada uno de los tratamientos	108
Ilustración 35 lote Hernando día 45.....	110
Ilustración 36 de correlación entre variables del suelo (Spearman) Dia 1	115
Ilustración 37 de correlación entre variables del suelo (Spearman) Dia 45	116
Ilustración 20 CCA global: suelo vs. Lote, día y tratamiento.....	123

Ilustración 21 PCoA de las variables bromatológicas del forraje (MS, FC, FDA, FDN y PC) en el Lote Biodigestor entre los días 7 y 42.	125
Ilustración 22 Análisis de Componentes Principales (PCA) del crecimiento del pasto durante los 45 días experimentales.....	128
Ilustración 23 Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) basado en propiedades químicas del suelo y crecimiento del forraje.....	130

Resumen

Este estudio evaluó el efecto del fertirriego con Biol y Porcinaza líquida sobre la salud del suelo y la productividad del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en dos lotes con características edáficas contrastantes del municipio de Fusagasugá (Cundinamarca): un suelo arcillo–arenoso (Lote Biodigestor) y un suelo franco–arcilloso (Lote Hernando). Durante 45 días se aplicaron dos tratamientos orgánicos y un testigo, analizando cambios fisicoquímicos del suelo, calidad bromatológica del forraje y variables productivas. Los resultados se integraron mediante análisis multivariados (Spearman, PCA, CCA y PCoA).

En el componente de suelo, los tratamientos con Biol y Porcinaza generaron incrementos significativos en los niveles de Ca, Mg, K, P, S, materia orgánica, CE, CICE y micronutrientes, especialmente en el Lote Biodigestor. El PCA mostró un gradiente claro de fertilidad asociado al Día 45, mientras que el CCA evidenció la influencia conjunta del tratamiento, el lote y el tiempo sobre la dinámica nutrimental. El Lote Hernando presentó mejoras más moderadas debido a su fuerte acidez y menor capacidad de intercambio catiónico.

En el componente forrajero, el Biol registró el mayor crecimiento y acumulación de biomasa (hasta 94 cm y 5.469 kg/m² en el Biodigestor), seguido por la Porcinaza. El testigo mostró el desempeño más bajo. El PCA de calidad bromatológica reveló un incremento progresivo de MS, FC, FDA y FDN con la madurez del forraje, junto con una reducción de la proteína cruda, comportamiento típico de gramíneas tropicales. El análisis PCoA integró las alturas semanales y la biomasa final, diferenciando claramente los tratamientos orgánicos del testigo en ambos lotes.

Se concluye que el fertirriego con efluentes porcícolas constituye una estrategia efectiva y sostenible para mejorar la fertilidad del suelo y la productividad del pasto Estrella africana, reduciendo la dependencia de fertilizantes de síntesis química y aportando evidencia aplicable a sistemas agropecuarios del Trópico Alto Andino.

Palabras clave: fertirriego, *Cynodon nlemfuensis*, efluentes porcícolas, salud del suelo, productividad forrajera, economía circular.

Abstract

This study evaluated the effect of fertigation with Biol and liquid Porcinaza on soil health and the productivity of African star grass (*Cynodon nlemfuensis*) in two contrasting soil types in Fusagasugá (Cundinamarca, Colombia): a clay–sandy soil (Biodigestor Lot) and a clay–loam soil (Hernando Lot). Over a 45-day experimental period, two organic treatments and a control were applied. Changes in soil chemical properties, bromatological quality of the forage, and productive performance were analyzed through multivariate methods (Spearman, PCA, CCA and PCoA).

In the soil component, Biol and Porcinaza significantly increased Ca, Mg, K, P, S, organic matter, electrical conductivity, cation exchange capacity and several micronutrients, particularly in the Biodigestor Lot. PCA revealed a clear fertility gradient associated with Day 45, whereas CCA demonstrated the combined influence of treatment, lot and time on soil nutrient dynamics. The Hernando Lot showed more moderate improvements due to its strong acidity and lower cation exchange capacity.

In the forage component, Biol showed the highest growth and biomass accumulation (up to 94 cm and 5.469 kg/m² in the Biodigestor Lot), followed by Porcinaza, while the control treatment consistently exhibited the lowest performance. The bromatological PCA indicated a progressive increase in DM, CF, ADF and NDF as forage matured, accompanied by a typical decrease in crude protein. The PCoA integrating weekly grass height and biomass production clearly separated the organic treatments from the control in both lots.

Overall, fertigation with swine effluents proved to be an effective and sustainable strategy to enhance soil fertility and improve the productivity of *Cynodon nlemfuensis*, reducing dependence on synthetic fertilizers and contributing scientific evidence applicable to agricultural systems in the Andean Highlands.

Keywords: fertigation, *Cynodon nlemfuensis*, swine effluents, soil health, forage productivity, circular economy.

GLOSARIO

- **Reúso de efluentes porcícolas:** Práctica de reutilizar productivamente los subproductos líquidos de granjas porcinas (porcinaza o Biol) en lugar de considerarlos un desecho.
- **Fertirriego:** Método de aplicación de fertilizantes disueltos en el agua de riego (Quishpe Cushicondor, 2021).
- **Porcinaza:** Efluentes líquidos sin tratar, compuestos por heces, orina y agua de lavado (Patarroyo Moreno, 2022).
- **Biol:** Efluente líquido estabilizado resultante de la digestión anaeróbica de la porcinaza
- **Pasto Estrella (Cynodon nlemfuensis):** Gramínea forrajera tropical perenne, de alta productividad y respuesta a la fertilización (Lopez & Villalobos, 2024).
- **Economía Circular:** Modelo económico que busca la optimización de recursos y la minimización de residuos (Parlamento Europeo, 2023)
- **Salud del suelo:** Capacidad de un suelo para funcionar como un ecosistema vital, medida a través de sus propiedades físicas, químicas y biológicas
- **Materia Seca (MS):** Indicador de productividad que representa el peso de la biomasa después de eliminar el agua.
- **Capacidad de Carga Animal:** Estimación del número de Unidades de Gran Ganado (UGG) que una hectárea puede sostener.
- **Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCAs):** Diseño experimental que controla una fuente de variación conocida para aumentar la precisión de los resultados (Navarro Flores & Vargas Rojas, 2015)

Introducción

La porcicultura colombiana vive una era de expansión sin precedentes. El récord de producción de más de 600,000 toneladas de carne en el 2024, es un testimonio del dinamismo del sector, pero esta cifra esconde una realidad ambiental insostenible (**Porkcolombia, 2016**) Cada tonelada de carne producida genera un volumen proporcional de efluentes, que mal gestionado se convierte en una amenaza directa para los suelos y las fuentes hídricas de regiones como Cundinamarca (Olaya et al., 2025)

Este crecimiento conlleva desafíos ambientales relevantes, especialmente relacionados con la gestión de los grandes volúmenes de fluentes generados en las granjas. Estos subproductos ricos en nutrientes como Nitrógeno N, Fósforo P, Potasio K, representan una oportunidad agronómica si son correctamente aprovechados, pero también un riesgo ambiental cuando su disposición es inadecuada, dado que, pueden provocar eutrofización de cuerpos de agua, lixiviación de nitratos hacia acuíferos y alteraciones en la salud del suelo (**Porkcolombia, 2016**)

En este contexto, la teoría de la economía circular se plantea como una estrategia viable para transformar lo que tradicionalmente se considera un desecho en un insumo productivo. El reúso de efluentes porcícolas tratados, como el Biol (producto de la digestión anaeróbica) y la porcínaza líquida mediante la técnica de fertirriego, constituye una alternativa con alto potencial para mejorar la fertilidad del suelo y sostener la productividad de cultivos forrajeros (Quishpe Cushicondor, 2021) , (Olaya et al., 2025). Además, esta práctica puede reducir la dependencia de fertilizantes minerales sintéticos, cuyo costo económico y huella ambiental son cada vez más cuestionados.

El marco normativo colombiano ha avanzado en este sentido. La Resolución 1256 del 2021, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, regula el uso de las aguas residuales tratadas en la agricultura, estableciendo criterios técnicos y de monitoreo para garantizar la seguridad de recurso hídrico ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2021. No obstante, la eficacia del uso de estos biofertilizantes depende de factores contextuales, como las condiciones edafoclimáticas, el historial de manejo del suelo y las características propias del cultivo receptor.

En este marco, resulta fundamental generar evidencia experimental aplicada en condiciones reales de la finca, que permita a los productores adoptar decisiones informadas. La agricultura sostenible demanda alternativas que sean económicamente viables, socialmente aceptables y ambientalmente responsable (Hernández Rodríguez et al., 2023). El uso de efluentes porcinos en praderas de Pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) gramínea ampliamente utilizada en los sistemas ganaderos del trópico alto andino, constituye un escenario idóneo para validar esta estrategia, dada la alta demanda de nutrientes del cultivo y su relevancia en la alimentación animal (Lopez & Villalobos, 2024)

Metodológicamente este estudio adopta un análisis, a través del Método Coeficiente de Correlación o correlación de Spearman (ρ), que es un coeficiente no paramétrico que permite medir el grado de asociación monotonica entre dos variables (Alabi et al., 2023) La elección de Spearman fue adecuada debido a las características estadísticas de los datos del suelo. La

finalidad del análisis, fue calcular una matriz de similitud entre muestras como insumo para el PCoA.

Así mismo, se tiene en cuenta el Análisis de Coordenadas Principales (PCoA), que es un método de ordenación multivariada que transforma una matriz de distancias entre muestras, en un conjunto de ejes capaces de representar la variación en un espacio de menor dimensión. Su objetivo es representar gráficamente las relaciones de similitud o disimilitud entre objetos multivariados. Es una técnica recomendada para datos ecológicos, edáficos y agronómicos (Alabi et al., 2023)

Finalmente, se estudiaron los datos por medio del Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), que es un método de ordenación multivariada, basado en relacionar directamente las variables ambientales con las variables de respuesta (Palarea-Albaladejo & Martín-Fernández, 2015) Mientras el PCoA muestra similitudes globales, el CCA identifica qué variables ambientales explican los gradientes observados. El método está ampliamente validado para datos agronómicos, ecológicos y de fertilidad del suelo.(Cruz et al., 2004)

En consecuencia, la presente investigación se propone como un estudio de caso representativo en Fusagasugá – Cundinamarca, región que ejemplifica los sistemas agropecuarios Andinos. Sus hallazgos no solo aportarán al cuerpo de conocimiento académico, sino que, también ofrecerán recomendaciones técnicas y ambientales, directamente aplicables a los sistemas productivos locales, contribuyendo a cerrar la brecha entre la generación de efluentes y su aprovechamiento sostenible.

Capítulo 1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del Problema

El crecimiento del 7.8% en la producción porcícola en 2024, es una métrica de éxito económico que, sin embargo, proyecta una sombra ambiental cada vez más larga sobre los ecosistemas andinos (Porkcolombia, 2016). La gestión de efluentes, con su alta carga de Nitrógeno (N) y Fósforo (P), se ha convertido en el talón de Aquiles del sector, con riesgos bien documentados de eutrofización de cuerpos de agua y una lenta pero constante degradación de la salud del suelo.

Al mismo tiempo, los sistemas forrajeros que sostienen la ganadería local, como las praderas de Pasto Estrella, libran su propia batalla contra la dependencia de fertilizantes sintéticos. Esta dependencia no solo eleva los costos de producción, sino que también expone a los agricultores a la volatilidad de los mercados globales y aumenta la huella de carbono de la agricultura regional (The State of Food and Agriculture, 2025).

Esta es la encrucijada que define nuestro problema: un residuo rico en nutrientes que contamina y un cultivo que demanda esos mismos nutrientes a un alto costo. La solución más evidente, el fertirriego con efluentes, se encuentra en un limbo práctico, frenada por la falta de validación científica local. No obstante, la Corporación Autónoma Regional de Chivor CORPOCHIVOR y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, a través de los actos administrativos (Resolución No. 1243 del 17 de noviembre de 2022, por la cual se

modifica la Resolución No. 076 del 6 de marzo de 2019, Por medio de la cual se establece el Marco Técnico para el adecuado manejo de la porcínaza en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor CORPOCHIVOR, así como la Resolución 0504 del 19 de julio de 2017, Por la cual se establecen lineamientos ambientales para el desarrollo de la actividad porcícola y para el manejo de la porcínaza en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC respectivamente (Min ambiente, 2019), en unión con la Asociación Colombiana de Porcicultores PORKCOLOMBIA, han planteado algunas estrategias para el uso de dichos efluentes, en aras de brindar una oportunidad a los productores porcícolas, acerca de su aprovechamiento sin la vulneración de aspectos contemplados en la normatividad ambiental, permitiendo así la utilización de estas enmiendas con total seguridad, eficacia y un estricto manejo técnico, que permita determinar las cantidades adecuadas para las condiciones únicas del trópico alto andino.

1.2 Antecedentes

A nivel global, la preocupación por el impacto ambiental de la agricultura y la ganadería intensiva ha impulsado el desarrollo de la economía circular como un modelo clave para la sostenibilidad (Parlamento Europeo, 2023). La literatura científica internacional ha documentado ampliamente que la aplicación de subproductos porcinos puede mejorar la disponibilidad de nutrientes, incrementar la materia orgánica del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos (Abdalla et al., 2018). Sin embargo, la misma literatura advierte sobre los riesgos de una aplicación inadecuada, como la acumulación de sales o desequilibrios microbianos, cuyos efectos son altamente dependientes del contexto edafoclimático local (Howe et al., 2024).

En Colombia, el sector porcícola ha adoptado modelos de economía circular, y guías técnicas como el "Manual de Uso de la Porcinaza en la Agricultura" de Porkcolombia promueven activamente el aprovechamiento de estos efluentes como un valioso biofertilizante (Porkcolombia, 2016). A nivel normativo, la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ha establecido un marco legal para el reúso de aguas residuales tratadas en la agricultura (Minambiente, 2021)

A pesar de estos avances, existe una brecha crítica entre la política y la práctica. Mientras las guías nacionales presentan una visión optimista de la porcinaza como recurso, estudios en contextos latinoamericanos similares, como en Córdoba (Argentina), revelan una realidad más compleja. Allí se ha observado que, aunque los productores reconocen el valor de los efluentes, con frecuencia los aplican sin criterios agronómicos, ignorando las dosis adecuadas y sin reducir el uso de fertilizantes minerales, lo que puede provocar excesos de nutrientes en el suelo y riesgos ambientales (Lorenzo Kómová et al., 2023).

Esta discrepancia evidencia que el “vacío de conocimiento” no se limita a reconocer que los efluentes porcícolas tienen un potencial fertilizante, sino que se sitúa principalmente en su implementación práctica y en los procesos de toma de decisiones a nivel de finca. Es decir, el desafío no reside solo en saber que los efluentes pueden aprovecharse, sino en cómo, cuánto y bajo qué condiciones incorporarlos de forma segura y eficiente en los sistemas forrajeros. Se trata, por tanto, de un reto socio-técnico que trasciende la simple transferencia de tecnología.

En este contexto, aquí se ubica la brecha que justifica la presente tesis: no existen estudios empíricos en Colombia que, en el contexto del Trópico Alto Andino, aporten evidencia concluyente sobre el uso de efluentes porcícolas en pasturas de Estrella africana.

Específicamente, este estudio contribuye con conocimiento en tres áreas de interés:

- Efectos sobre suelo y pasto: Evalúa el efecto comparativo del fertirriego con Porcinaza líquida y Biol sobre las propiedades químicas del suelo y sobre la productividad, la calidad y el crecimiento del pasto Estrella africana.
- Cambios en la calidad del suelo frente al manejo tradicional: Analiza las diferencias que se generan a nivel del suelo al aplicar Biol y/o Porcinaza en comparación con las condiciones de manejo tradicional de las praderas.
- Respuesta productiva y nutricional del forraje: Cuantifica las modificaciones en la biomasa, la morfología y el valor nutricional del pasto Estrella africana bajo estas condiciones controladas de fertirriego.

La literatura local se ha centrado principalmente en lineamientos de política o diagnósticos de manejo, pero carece de los datos experimentales necesarios para formular recomendaciones técnicas precisas, seguras y operativas para los productores de la región. Esta investigación aborda directamente dicha brecha, proporcionando la evidencia científica necesaria no solo para respaldar la práctica del fertirriego con efluentes porcícolas, sino también para avanzar en el desarrollo de protocolos que faciliten su correcta adopción, contribuyendo a cerrar

el ciclo entre la generación de efluentes y su aprovechamiento sostenible en los sistemas forrajeros andinos.

1.3 Pregunta de Investigación

Dado que el crecimiento del sector porcícola en Colombia genera un desafío ambiental por la gestión de efluentes (Porkcolombia, 2016) y, simultáneamente, la producción forrajera depende de fertilizantes sintéticos costosos (The State of Food and Agriculture, 2025), la economía circular propone reutilizar los efluentes porcinos como biofertilizantes (Sandoval et al., 2022). A pesar del respaldo científico internacional, la efectividad de esta práctica depende críticamente de las condiciones edafoclimáticas locales y del historial de manejo del suelo, existiendo un vacío de conocimiento empírico en el contexto andino colombiano (Cruz et al., 2004).

Este trabajo de investigación se formuló en torno a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el efecto del uso de Biol y Porcinaza como fertilizantes sobre las propiedades químicas del suelo, la producción de biomasa y la calidad bromatológica del pasto Estrella (*Cynodon nlemfuensis*), durante un periodo de 45 días, en relación con el manejo tradicional de las praderas, en un sistema porcícola del municipio de Fusagasugá?

Para abordar esta pregunta, se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis Nula: El cambio entre el día 1 y el día 45 en las variables de suelo y forraje no difiere entre los tratamientos (Biol, Porcinaza, Testigo) ni depende del Lote.

Hipótesis Alternativa: Al menos una variable del suelo y/o forraje presenta un cambio diferencial entre los tratamientos y/o una modulación por Lote.

Capítulo 2. Justificación

El presente trabajo de investigación se justifica desde perspectivas complementarias: práctica, ambiental y científica.

Desde un enfoque práctico, los resultados permitirán presentar al gremio porcícola de la región del Sumapaz, un documento con certidumbre sobre el valor real de la porcinaza y el biol. Bajo una aplicación adecuada y controlada en praderas de pasto Estrella (*Cynodon nlemfuensis*), se puede incrementar la producción de biomasa y su valor nutricional (Lopez & Villalobos, 2024), lo que se traduce en una mayor capacidad de carga animal, con una inversión casi nula en fertilizantes de síntesis química.

Desde el punto de vista ambiental, este trabajo promueve un modelo de economía circular, que mitiga el impacto de la porcicultura intensiva (Lorenzo Kómova et al., 2023). Al transformar un residuo en un insumo, se reduce el riesgo de contaminación hídrica y se mejora la salud del suelo mediante el aporte de materia orgánica. Una gestión basada en el conocimiento de la composición de los efluentes y la capacidad de asimilación del suelo, es clave para maximizar beneficios y minimizar riesgos como la salinización (Howe et al., 2024), alineándose con la normativa ambiental colombiana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Finalmente, la justificación científica radica en la generación de conocimiento original y contextualizado. Existe una carencia de estudios experimentales en Colombia que evalúen comparativamente diferentes tipos de efluentes porcinos (Biol y Porcinaza), bajo un diseño robusto que controle la variabilidad espacial (historial de manejo) y temporal. Para el presente estudio, la implementación del análisis de datos de Spearman, conocida también como coeficiente de correlación de rangos de Spearman, ρ , es una medida estadística que permite establecer qué tanto y en qué sentido cambian dos variables juntas. Si una de ellas aumenta cuando la otra lo hace o decrece, o si su efecto es contrario de manera permanente. La inclusión del total de variables a someter a análisis, incluida la bromatología, crecimiento forrajero y morfología del material vegetal, genera una visión holística del sistema, arrojando datos valiosos que nos ayudarán a cerrar la brecha de conocimiento identificada (Werker et al., 2022).

Más allá de sus contribuciones directas a la finca, esta investigación se alinea con marcos de planificación y sostenibilidad a nivel global, nacional y local, contribuyendo directamente con varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, como lo son: ODS 2 (Hambre Cero), ODS 6 (Agua Limpia), ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) y ODS 13 (Acción por el Clima) (Gamez, s. f.). A nivel nacional, se articula con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y resoluciones clave del Ministerio de Ambiente y el ICA. A nivel departamental y municipal, responde a los planes de desarrollo de Cundinamarca y al Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Fusagasugá, ofreciendo una solución técnica y viable a los problemas de gestión de efluentes. La siguiente tabla ilustra esta alineación estratégica.

Tabla 1 *Alineación del proyecto con las agendas de sostenibilidad y planificación en Colombia.*

Instrumento de Planificación	Eje o Línea Estratégica	Contribución del Proyecto
ODS (2030)	ODS 2 (Hambre Cero), ODS 6 (Agua Limpia), ODS 12 (Consumo Responsable), ODS 13 (Acción por el Clima)	Aumenta la disponibilidad de alimentos, protege los recursos hídricos, promueve el reciclaje de nutrientes y reduce las emisiones de GEI.
Marco Estratégico (The State of Food and Agriculture, 2025)	Mejor Producción, Mejor Medio Ambiente	Fortalece la productividad del forraje, cierra ciclos de nutrientes y reduce la dependencia de insumos de síntesis química.
Plan Nacional de Desarrollo (2022-2026)	Derecho Humano a la Alimentación, Transformación Productiva	Aumenta la disponibilidad de alimentos y promueve la innovación basada en el capital natural para la resiliencia climática.
Plan de Desarrollo de Cundinamarca (2020-2024)	+Sostenibilidad, +Competitividad	Valida un modelo de producción que mejora la productividad y el uso de

POT de Fusagasugá	Desarrollo Agroindustrial Sostenible, Mitigación de Riesgos Ambientales	recursos, mientras protege el medio ambiente. Ofrece una solución viable a la gestión de efluentes, apoyando el objetivo de una producción ordenada y circular.
-------------------	---	--

Nota: Elaboración propia

Capítulo 3. Objetivos e hipótesis

3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida, sobre la salud del suelo y la productividad y calidad nutricional del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), en dos lotes con diferente tipo de suelo (Franco arcilloso y Arcillo arenoso), y con diferente historial de manejo, durante un ciclo experimental de 45 días en el municipio de Fusagasugá, Cundinamarca.

3.1.1 Hipótesis general

- **Hipótesis nula:** No existen diferencias significativas en las variables suelo (Franco arcilloso y Arcillo arenoso) y forraje, entre los tratamientos (Biol, Porcinaza, Testigo), ni en función del historial del manejo del lote.
- **Hipótesis alternativa:** Al menos una variable de suelo y forraje presenta un cambio diferencial en función del tratamiento aplicado y/o del historial del manejo del lote.

3.2 Objetivos específicos e hipótesis

- **Objetivo Específico 1 (Suelo).**
 - Comparar cuantitativamente el efecto del fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida sobre las propiedades químicas del suelo (pH, Mg, S, B, Zn, Mn, Fe y Cu), entre el día 1 y el día 45, respecto al Testigo, en dos tipos de suelo (Franco arcilloso y Arcillo arenoso) y en dos Lotes con distinto Historial de Manejo.

- **Objetivo Específico 2 (Forraje - Productividad, Calidad y Morfología).**
 - Determinar el impacto del Biol y la Porcinaza Líquida sobre la producción de biomasa (en Materia Seca, MS), la calidad bromatológica (Proteína Cruda, PC; Fibra Detergente Neutro, FDN; y Fibra Detergente Ácido, FDA) y la acumulación de nutrientes.

- **Objetivo Específico 3 (Interacción).**
 - Comprobar la efectividad del Biol y la Porcinaza Líquida en dos lotes con distinto historial de manejo, identificando si la aplicación de alguno de los tratamientos modula la respuesta del suelo, del forraje y de la capacidad de carga.

Capítulo 4. Marco teórico

El marco teórico integra la normatividad vigente, los fundamentos agronómicos y ambientales del uso de efluentes porcinos, la economía circular, la salud del suelo, la calidad de forrajes, las características del *Cynodon nlemfuensis* y la base estadística del diseño experimental adoptado. Este capítulo establece la conexión entre el problema planteado y el cuerpo de conocimiento científico.

4.1 Evolución normativa y contexto nacional en Colombia

En Colombia, el marco normativo ha evolucionado significativamente para regular el reúso de efluentes en prácticas agrícolas sostenibles. La Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece criterios técnicos para el uso seguro de aguas residuales tratadas, promoviendo evaluaciones de riesgos y planes de monitoreo (Minambiente, 2021). Esta normativa se alinea con el crecimiento de la producción porcícola, que alcanzó 608,752 toneladas en 2024 (Porkcolombia, 2016). Sin embargo, esta intensificación genera presiones ambientales, como la contaminación por alta carga de materia orgánica, nitrógeno y fósforo, que pueden causar eutrofización y degradación del suelo (Cruz et al., 2004). Guías técnicas sectoriales, como las publicadas por Porkcolombia, ofrecen lineamientos para el manejo ambiental y el aprovechamiento de la porcínaza, reconociendo la necesidad de integrar la normativa con prácticas locales para mitigar riesgos, considerando la variabilidad edafoclimática y el historial de manejo del suelo (Porkcolombia, 2016)

Así mismo, la Corporación Autónoma Regional de Chivor CORPOCHIVOR y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, a través de los actos administrativos (Resolución No. 1243 del 17 de noviembre de 2022, por la cual se modifica la Resolución No. 076 del 6 de marzo de 2019, *Por medio de la cual se establece el Marco Técnico para el adecuado manejo de la porcínaza en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Chivor CORPOCHIVOR*, así como la Resolución 0504 del 19 de julio de 2017, *Por la cual se establecen lineamientos ambientales para el desarrollo de la actividad porcícola y para el manejo de la porcínaza en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC* (Min ambiente, 2019) respectivamente, en unión con la Asociación Colombiana de Porcicultores PORKCOLOMBIA, han planteado algunas estrategias para el uso de dichos efluentes, en aras de brindar una oportunidad a los productores porcícolas, acerca de su aprovechamiento sin la vulneración de alguno de los aspectos contemplados en la normatividad ambiental, pero que al llevar a la realidad del día a día, no conservaron el rigor técnico en la aplicación ni de sus condiciones, viéndose obligados a la suspensión o aplazamiento de dicha oportunidad.

4.2 El sistema suelo-planta y su relevancia en la productividad forrajera.

El suelo es un sistema dinámico donde interactúan componentes físicos, químicos y biológicos que determinan su capacidad para sostener la vida vegetal. Para gramíneas tropicales como el pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), la disponibilidad de nutrientes, la estructura y el microbiota edáfico son factores clave para el rendimiento y la calidad del forraje (Cali Moya, 2025). El sistema suelo-planta-animal en sistemas ganaderos es interdependiente: la

calidad del suelo influye en la productividad y composición nutricional del forraje, lo que a su vez impacta la salud y el desempeño animal. Por ello, el manejo sostenible del suelo es un factor crítico en la eficiencia y resiliencia de los sistemas pecuarios (Atoloye, 2020)

4.3 Potencial agronómico de los efluentes porcícolas.

Los efluentes porcinos son un recurso valioso como enmiendas orgánicas, mejorando la disponibilidad de fósforo, incrementando la materia orgánica y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos (Flórez Traslaviña, 2023); (Atoloye, 2020). Investigaciones recientes confirman que su aplicación en fertirriego aumenta el carbono orgánico del suelo (SOC), reduce la densidad aparente y mejora la biomasa microbiana, especialmente en suelos con historial de sobreexplotación (Cruz et al., 2004). En pasturas como el pasto Estrella, se observan incrementos en la productividad forrajera, con mayor materia seca y proteína cruda bajo tratamientos con Biol y Porcinaza Líquida (Hernández Rodríguez et al., 2023)

Adicional a lo anterior, para el caso del Biol, genera una estimulación microbiana del suelo, lo que permite una nutrición rápida de la planta, elevando la velocidad de rebrote e incrementando la producción de forraje ((Yin et al., 2025); (Cali Moya, 2025)) En su lugar, la porcinaza produce un mejoramiento en las condiciones del suelo, por la liberación gradual de nitrógeno orgánico. También brinda un gran aporte de Fósforo, esencial en el desarrollo radicular de la planta y en las fases iniciales del pasto, lo que favorece la recuperación de suelos deficientes (Laura Villegas, 2025) Presenta elevado aporte de sólidos al suelo, que lo define como

una gran enmienda utilizada principalmente con abono al suelo y no de uso foliar (Yin et al., 2025).

4.3.1 Reúso de efluentes porcícolas y economía circular.

El concepto economía circular propone una transición desde el modelo económico lineal de “tomar – hacer – desechar”, hacia un sistema regenerativo donde los residuos de un proceso se convierten en insumos para otro, promoviendo la sostenibilidad en la producción porcina (El-Naqme et al., 2019). En la producción porcina, esto implica gestionar los efluentes como una oportunidad para recuperar y reciclar nutrientes, reduciendo impactos ambientales y económicos mediante sistemas cerrados (Sandoval et al., 2022) Los efluentes porcinos, ya sea en su forma cruda (porcinaza) o tratada (Biol), son ricos en N, P, K, materia orgánica MO y micronutrientes, convirtiéndolos en una enmienda de alto valor para fertirriego en contextos de agricultura sostenible (Quishpe Cushicondor, 2021)

El biol efluente de la digestión anaeróbica, es un fertilizante estabilizado que reduce patógenos y convierte el nitrógeno orgánico en formas amoniacaes más disponibles para las plantas, facilitando aplicaciones controladas que mejoran la eficiencia de recursos en regiones como Colombia (Quishpe Cushicondor, 2021)

El marco legal en Colombia, a través de la Resolución 1256 de 2021, reconoce y regula el reúso de aguas residuales tratadas, estableciendo un camino para que los productores

implementen estas prácticas de manera segura y sostenible, exigiendo evaluación de riesgos y planes de monitoreo que integren principios de One Heart (**Minambiente, 2021**)

Recientes avances muestran que estos modelos reducen emisiones de gas efecto invernadero GEI en un 96.9%, al reemplazar lagunas anaeróbicas por tecnologías superiores, valorando off sets (compensaciones) de carbono y mejorando la resiliencia de agroecosistema (El-Naqme et al., 2019)

4.3.2 Fertirriego como estrategia de manejo sostenible.

Diversos estudios han mostrado que la fertilización orgánica mejora la disponibilidad de macro y micronutrientes, contribuye a la actividad microbiana y promueve la resiliencia del suelo frente a fenómenos de degradación (Youssef, M. M. A. & Eissa, M. F. M., 2014). Sin embargo, la eficacia depende del tipo de bioinsumo, dosis, frecuencia y las características edafoclimáticas locales.

El fertirriego integra la aplicación de nutrientes mediante el agua de riego, lo que optimiza la eficiencia del uso de fertilizantes, reduce pérdidas por lixiviación y permite un manejo más preciso de los recursos (Maher et al., 2025). En regiones tropicales el fertirriego con insumos orgánicos como Bioles y efluentes pecuarios, se ha convertido en una alternativa para disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos y mejorar la sostenibilidad en los sistemas forrajeros (Sandoval et al., 2022)

Tradicionalmente se conoce que la fertilización de suelos en Colombia, se ha venido haciendo con la aplicación de insumos al suelo directamente, pero los estudios e investigaciones han demostrado que el fertirriego es una de las alternativas más eficientes y económicas, pues su elevado contenido de Nitrógeno (elemento fundamental para las plantas) está presente en gran proporción en este tipo de efluentes, mejorando las condiciones de los suelos e incrementando la productividad de las praderas y cultivos donde se aplican.(Cuastumal et al., 2023)

4.3.3 Bioles: definición, composición y efectos.

Los bioles son biofertilizantes líquidos resultantes de la fermentación anaerobia de estiércol, residuos vegetales y agua, ricos en compuestos bioactivos como enzimas, ácidos orgánicos y fitohormonas (Armijos Jose, 2023). Su aplicación en pasturas mejora parámetros como:

- Incremento de biomasa aérea y densidad de macollas.
- Aumento de concentración de proteína cruda y reducción de la Fibra Detergente Neutro FDN.
- Estímulo del microbiota rizosférica y mayor disponibilidad de nitrógeno N y fósforo P.

El biol no solo presenta una alta carga microbiana benéfica para las plantas, sino que, posee una rica composición de macro y micronutrientes (Cuastumal et al., 2023) Su uso en praderas de pasto Estrella promueve el crecimiento del material vegetal e incrementa su valor nutricional, por su rápida asimilación, que le permite a la planta una alta estimulación de la

velocidad de rebrote y una superior producción de biomasa (Youssef, M. M. A. & Eissa, M. F. M., 2014).

Estudios como los de (Ramírez et al., 2024) confirman lo planteado por (Jazmín-Marín, 2019), respecto a que, la fertilización con biol puede aumentar la velocidad de rebrote y la producción de forraje, favoreciendo la recuperación de suelos degradados y proporcionando una alternativa viable a los fertilizantes sintéticos.

Igualmente, estudios recientes destacan que los bioles no solo soportan nutrientes, sino que, también actúan como promotores de crecimiento vegetal, bioestimulantes, mejorando la tasa de aparición foliar y la relación hoja: tallo, lo que se traduce en mayor digestibilidad del forraje(Sandoval et al., 2022). Por tratarse de un fertilizante orgánico, su efecto positivo se refleja en el incremento de la producción de forraje verde de pasto estrella y en el crecimiento de la planta, raíces y frutos, derivado del contenido y disposición de nutrientes, minerales y hormonas, todos ellos involucrados en la producción de biomasa (Flórez Traslaviña, 2023) y (Sandoval et al., 2022)

El biol es un biofertilizante considerado seguro para las plantas y cultivos, cuando se cuenta con todas las condiciones previas para un uso correcto del material. Muy pocas veces se le atribuyen efectos negativos, y en esos casos, suelen estar asociados a aplicación de dosis altas, que en presencia de lluvias y por efectos de lixiviación, pueden llegar a generar contaminación de aguas superficiales o subterráneas. Por su alto contenido de nutrientes, puede generar un desbalance en la composición química del suelo, por lo que se recomienda previo a su uso un análisis de suelo, con el fin de evitar que un alto nivel de algún macro o micro elemento, que está

directamente relacionado a otro elemento, pueda ocasionar una baja o nula absorción de ese y otros nutrientes. (Youssef, M. M. A. & Eissa, M. F. M., 2014)

- De igual manera, el uso indebido de un biol de mala o baja calidad (mala sanitización del efluente por bajo tiempo de retención o maduración), puede llegar a presentar microorganismos patógenos que afecten la salud del pasto o del ganado que lo consume. (Nations, 2011).

4.3.4 Porcinaza líquida: un subproducto con potencial fertilizante.

La porcinaza líquida es un efluente pecuario formado por las heces y orina del cerdo, a la cual se le suman de forma indirecta residuos del alimento de los animales, agua de lavado de los corrales, pelos, escamas de piel y pérdida de agua por bebederos entre otros, con alto contenido de nitrógeno amoniacal, fósforo P, potasio K, calcio Ca y micronutrientes, además de materia orgánica soluble. Su uso en fertirriego ha demostrado mejorar la fertilidad de los suelos tropicales y la producción de gramíneas forrajeras como *Cynodon spp.* y *Pennisetum spp.* (Lopez & Villalobos, 2024).

- La calidad de la porcinaza producida en una granja, está directamente relacionada con el tipo de alimento que consuman los animales, ya que, si esta se compone de una dieta con alimento no convencional (granos, residuos de cosechas, plátano, frutas, lavazas o papa), la porcinaza es más nutritiva y con menor presencia de semillas de malezas. (Jazmín-Marín, 2019)

Unido a lo anterior, podemos destacar de la porcinaza líquida, su alto contenido de fósforo P (esencial para el desarrollo radicular de los pastos), su amplia capacidad de mejorar suelos a largo plazo y su aporte gradual de nitrógeno N, el cual se libera durante la descomposición, lo que le permite manifestar al suelo su potencial, presentando un comportamiento a lo largo de su fijación, como una enmienda excepcional.

Su aporte constante de material sólido y materia orgánica, contribuyen al mejoramiento de la estructura física de los suelos, la aireación, la capacidad de intercambio catiónico y la humedad entre otros, demostrando ser eficaz en la recuperación de suelos con baja fertilidad, deficientes o degradados.

Para su inclusión en pastos, se utiliza principalmente como abono orgánico de aplicación directa al suelo, con el fin de mejorar las condiciones e incrementar su fertilidad y estimular el crecimiento de las plantas y forraje, debido a su significativo aporte de nitrógeno. (Rodríguez Rodríguez & Sánchez Camargo, 2017)

Sin embargo, la porcinaza debe ser manejada con precaución, debido a riesgos de contaminación por exceso de nitrógeno N, salinidad y carga microbiológica patógena. La aplicación controlada y ajustada a las necesidades del cultivo y a las condiciones del suelo, es esencial para evitar impactos ambientales negativos como eutrofización de cuerpos hídricos. A continuación, algunos potenciales efectos negativos de la porcinaza:

Contaminación por nitratos: Ocasionado por el exceso en la aplicación de la dosis adecuada. Este factor, unido a la presencia de la época de lluvias puede generar la lixiviación del material, con la consecuente contaminación de fuentes subterráneas, situaciones adversas para el ambiente y las personas si se llegan a consumir sus aguas. (Noreña-Grisales et al., 2016)

Problemas de Olores y Moscas: Por su alto contenido de materia orgánica y constantes olores durante el proceso de descomposición, genera la aparición de moscas en un área o perímetro amplio del predio o de la granja, lo que se traduce en uno de los principales factores de queja ambiental entre vecinos en nuestra región.

Patógenos: Obedece únicamente al manejo sanitario de la granja, donde algunos microorganismos podrían alojarse en los comederos, bebederos y transmitirse al mismo suelo.

Salinidad: El uso desmedido de la porcinaza, a través de sobredosificaciones, puede generar un desnivel en la salinidad del suelo a largo plazo.

Usos y Aplicaciones: La aplicación de tipo foliar genera el amarillamiento (quemado) de las hojas. Por lo tanto, utilizar únicamente para aplicación al suelo. (Noreña-Grisales et al., 2016)Federación Nacional de Porcicultores.

4.4 Salud del suelo y fertilización orgánica.

La inexistencia de un significado definitivo y apropiado para la salud del suelo, nos ha llevado a un concepto simple pero inadecuado, donde manifestamos que consideramos sano aquel suelo que nos es útil y nos permite alcanzar una excelente producción. Es así que, la producción de alimentos a nivel mundial demanda nuevos sistemas agrícolas que proporcionen

alternativas con alta producción (cantidad, calidad), sin agotar o explotar drásticamente dicho recurso. Es la oportunidad que le podemos brindar a nuestros ecosistemas, para que nos provean de bienes y servicios, pero que continúen conservando su diversidad. (The State of Food and Agriculture, 2025)

La aplicación de enmiendas orgánicas como los efluentes porcinos, pueden mejorar las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, al aportar macronutrientes como el nitrógeno N, Potasio K y Fósforo P, micronutrientes como el Hierro Fe, Cobre Cu, Zinc Zn, Manganeso Mn y Boro B, incrementar el Carbono Orgánico del Suelo (SOC) y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (Ramírez et al., 2024). Sin embargo, un exceso en la cantidad de fertilizante aplicado o sobredosis, aunado a la presencia de precipitaciones, también puede acarrear riesgos como la lixiviación de nitratos (contaminación de aguas subterráneas), salinización por alta conductividad eléctrica (CE), o sodificación (El-Naqme et al., 2019). Por ello, el monitoreo periódico de indicadores como pH y CE es indispensable, utilizando métodos estandarizados como el Mehlich-3 para estimar la fracción de nutrientes disponible (Kulhánek et al., 2023).

- **Propiedades Químicas del suelo:** Corresponden a las relacionadas con la interacción química, la disponibilidad de nutrientes en el suelo y sus reacciones. Son determinantes de la fertilidad, la productividad y son absolutos en definir la capacidad que tiene el suelo para el establecimiento de cultivos. Dependiendo el tipo de suelo, el cultivo y la zona donde se localice el predio, algunos de los

parámetros óptimos son: pH (6.0 a 7.0), Capacidad de Intercambio Catiónico CIC (Ideal: 15 – 25 cmol(+)/kg (suelos franco-arcillosos – Lote Hernando)) y (8 – 15 cmol(+)/kg (suelos franco-arenosos – Lote Biodigestor)), Materia Orgánica MO (3% a 6 %), Macro y Micronutrientes, Salinidad, Conductividad Eléctrica CE, Saturación de Bases SB (mayor al 60% es el ideal), Relación Ca–Mg–K (equilibrio catiónico) Rangos ideales en saturación del complejo de cambio: Ca: 60 – 70 % y Mg: 10 – 20 %. Fósforo disponible (P Bray II u Olsen): Ideal: 12 – 25 mg/kg en suelos de textura media-arcillosa y 8 – 18 mg/kg en suelos arenosos. Potasio Intercambiable K: Ideal: 0.3 – 0.6 cmol(+)/kg. Suficiente para cultivos exigentes como pastos, maíz y hortalizas, Acidez Intercambiable AI y Carbonatos y Bicarbonatos entre otros. Estos elementos están interrelacionados entre sí. Cualquier elevación o descenso en sus niveles óptimos, puede generar la alteración de la función de otro elemento, con el que se encuentra asociado. Ej: Azufre (S) y Materia Orgánica — Liberación microbiana.

- La mineralización de la materia orgánica libera azufre disponible (SO_4^{2-}).
- Suelos pobres en MO tienden a ser deficientes en S.

El biol mejora las propiedades del suelo aportando **N, P, K, Ca, Mg** y micronutrientes en formas solubles, aumentando la disponibilidad inmediata de los nutrientes para las plantas. Así mismo, algunos tienen una función específica como el **N (amonio)**: Favorece el rebrote. **P**: Fortalece las raíces y la absorción de

nutrientes. **K:** Aumenta el vigor de la planta, la resistencia y la calidad del forraje.

Ca y Mg: Estabilizan agregados y mejoran estructura.

- **Propiedades Físicas del suelo:** Corresponden a cada una de las cualidades que dependen netamente de su estructura, textura y forma en que actúan en el suelo. Son determinantes en aspectos relacionados con desplazamiento del agua, raíces y aire dentro del suelo y son parte fundamental en el establecimiento y desarrollo de cultivos.

Beneficios del Biol frente a las Propiedades Físicas. Los elementos naturales y la actividad microbiana del suelo permiten formar agregados estables (grumos), mejoran la distribución de las partículas entre sí (porosidad y aireación). Favorece la circulación del agua entre las partículas, reduciendo la compactación. Mejora el crecimiento de las raíces del pasto.

4.5 Calidad de forrajes y nutrición animal.

La alimentación de la mayoría de los rumiantes se basa en el suministro de pastos y forrajes, significando para ellos la mayor parte de su dieta, pues son de más fácil adquisición, más económicos, con una buena capacidad de producción y un factor de crecimiento relativamente rápido (Flórez Traslaviña, 2023) De igual manera, el consumo de nutrientes es uno de los más importantes puntos que limita la producción animal en nuestro país, y solo se podría subsanar si el valor nutricional de los pastos y forrajes no constituyera un factor limitante

Por otra parte, se tiene que, los aspectos climáticos y meteorológicos, hacen que la producción ganadera dependa de ellos. Por tal razón, todos y cada uno de los cambios que se presentan a medida que pasan los periodos, en cuanto a la humedad relativa, la temperatura y las precipitaciones, generan la correspondiente variabilidad en la producción e inciden en el factor nutritivo de los forrajes. Es por esto que, la producción ganadera del trópico basada principalmente en el pastoreo de gramíneas en monocultivo, enfrenta grandes dificultades particularmente en el tiempo seco, donde escasea el alimento y el poco existente, carece de valor nutricional, por lo cual es utilizado y aprovechado para lo que se conoce como de sostenimiento del animal. (Kulhánek et al., 2023)

La producción actual de los pastos en el trópico, junto a la destinación del uso de la tierra para el establecimiento de ganaderías, se ha convertido en uno de los más grandes desafíos para desarrollar la planificación integrada y la toma de decisiones en los sistemas tropicales de pastoreo (**Rojas-Downing et al., 2017**)

El sector demanda la implementación de sistemas sostenibles de producción ganadera, que permitan la interrelación del manejo integrado de las explotaciones con el contexto natural, donde se reconcilie la relación existente entre el paisaje natural y los paisajes compuestos por bosques mixtos, que se usan incorrectamente como sistemas de pastoreo extensivo. El contexto basado en el silvopastoreo, hace parte integral de una muy fuerte y acertada alternativa para enfrentar estos problemas (Lopez & Villalobos, 2024), pues si permitimos a los bosques conservar la biodiversidad portar un sinnúmero de servicios ambientales a los ecosistemas

(Minambiente, 2021) incrementar cualitativa y cuantitativamente la oferta de pastos y forrajes para el ganado (FAO, 2019), así como la minimización del desbalance en la producción de alimentos que caracteriza a los sistemas sin árboles (Yin et al., 2025)

La productividad de un sistema ganadero depende tanto de la cantidad de forraje (biomasa en kg de materia seca por hectárea) como de su calidad nutricional. La calidad se determina por su contenido de proteína cruda (PC), digestibilidad y concentración de fibra (Maher et al., 2025) El análisis bromatológico, siguiendo metodologías como las de la AOAC, cuantifica estos componentes. Las fracciones de fibra, analizadas por el método de Van Soest, se dividen en fibra detergente neutro (FDN), inversamente relacionada con el consumo voluntario, y fibra detergente ácido (FDA), inversamente relacionada con la digestibilidad (Detmann & Valadares Filho, 2010). La fertilización nitrogenada tiende a aumentar la PC y la biomasa, y la aplicación de efluentes porcinos ha demostrado mejorar estos parámetros de manera integral (Noreña-Grisales et al., 2016).

4.6 El pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*): Características, Usos y Requerimientos Agronómicos.

El pasto Estrella africana es una gramínea forrajera perenne ampliamente utilizada en sistemas ganaderos tropicales (Sandoval et al., 2022). Su alta demanda de nutrientes, especialmente N, P y K, lo convierte en un cultivo ideal para la valorización de efluentes porcícolas (Noreña-Grisales et al., 2016) El ciclo de crecimiento y la calidad nutricional están estrechamente ligados a la edad de rebrote. Estudios indican que, si bien la biomasa aumenta con

la edad, el contenido de proteína cruda tiende a disminuir después de un punto óptimo, que a menudo se sitúa alrededor de los 35 días (Mejía Salazar et al., 2021) Por lo tanto, el manejo del pastoreo o corte debe buscar un equilibrio entre el rendimiento de materia seca y el valor nutricional del forraje. La preferencia de esta especie por suelos con un pH entre 5.5 y 7.0 es un factor crítico para la asimilación de nutrientes.

4.6.1 Descripción Botánica y potencial Forrajero.

El pasto estrella se propaga mediante estolones leñosos y fuertes, lo que le permite formar una densa cobertura vegetal, ideal para el control de malezas y la conservación del suelo. (Agro activo n.d.; tropical.(Mejía Salazar et al., 2021) A diferencia de otras especies del género *Cynodon*, carece de rizomas subterráneos (Flórez Traslaviña, 2023) Esta gramínea se valora por su alta palatabilidad para el ganado bovino, caprino y ovino, además de su resiliencia al pastoreo continuo y a periodos de sequía moderada. Se utiliza para pastoreo como cultivo de corte directo, para la producción de pacas de heno o ensilaje (Sandoval et al., 2022) Su amplia adaptabilidad le permite crecer desde el nivel del mar, hasta más de 2.300 metros de altitud, lo que la hace adecuada para los ecosistemas del trópico alto andino en Colombia.

4.6.2 Requerimientos Nutricionales Esenciales.

El pasto Estrella es un cultivo exigente en nutrientes, con una alta demanda de nitrógeno N, fósforo P y potasio K, que son los elementos más limitantes en la mayoría de los suelos tropicales (Mejía Salazar et al., 2021). Para alcanzar una productividad moderada a alta,

requiere un mínimo de 10 kg/ha de nitrógeno N por mes de crecimiento, con una respuesta favorable a dosis mayores (Flórez Traslaviña, 2023). Esta alta demanda de nitrógeno N es la que le permite alcanzar contenidos de proteína cruda de hasta el 20%, aunque los valores típicos oscilan entre el 8% y el 14% (Sandoval et al., 2022a).

La alta demanda de nutrientes del *Cynodon nlemfuensis*, lo convierte en un receptor ideal para los efluentes porcícolas, que son una fuente concentrada de N, P, y K (**Maya Mazorra et al., 2005**). Esta relación es altamente sinérgica: el riesgo ambiental que suponen los efluentes ricos en nutrientes, es absorbido y transformado en un activo productivo, por un cultivo que requiere una elevada fertilización para su óptimo desempeño. La aplicación de fertilizantes orgánicos ha demostrado consistentemente un aumento en la producción de materia seca MS y el contenido de proteína cruda PC, validando el potencial agronómico de los efluentes como una alternativa a los insumos sintéticos (**(Maya Mazorra et al., 2005);(Cordero et al., 2016)**).

4.6.3 características de suelo y adaptación edafoclimática.

El pasto estrella se adapta a una amplia gama de suelos, desde arenosos hasta arcillosos (Flórez Traslaviña, 2023) Sin embargo, su crecimiento es óptimo en suelos bien drenados, húmedos y con una textura más ligera (**Maya Mazorra et al., 2005**) factor edáfico crítico para su desarrollo es el pH del suelo. Si bien tolera un rango amplio de 4.5 a 8.0, su crecimiento ideal ocurre en un rango de 5.5 a 7.0 (**Cordero et al., 2016**) Esta preferencia es fundamental para la asimilación de nutrientes, ya que, un pH fuera del rango óptimo puede limitar la disponibilidad

de elementos esenciales, incluso si estos están presentes en el suelo. En la Tabla No. 2 se describen ampliamente los aspectos más importantes sobre los requerimientos del pasto Estrella.

Tabla 2 Requerimientos del Pasto Estrella.

Característica	Requerimiento/Rango Ideal	Observaciones
Suelo		
pH óptimo	5.5 - 7.0	Rango de tolerancia amplio (4.5 - 8.0) (tropical.theferns.info, 2024)
Tipo de suelo	Arenoso a arcilloso	Prefiere suelos bien drenados y con buena fertilidad (tropical.theferns.info, 2024)
Nutrientes	Alta demanda de N, P y K	N mínimo de 10 kg/ha/mes para alta productividad (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022)
Drenaje	No tolera encharcamientos prolongados (Pasturas Tropicales, 2023)	
Productividad		
Biomasa fresca	13 - 25 t/ha	Variable según manejo y fertilización (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022)
Materia seca (MS)	3 - 6 t/ha	Variable según manejo y fertilización (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022)
Proteína Cruda (PC)	8% - 20%	Disminuye con la edad de rebrote, aumenta con fertilización N (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022)
Fibra Detergente Neutro (FDN)	55% - 70%	Menor valor indica mayor consumo por el animal (Hernández et al., 2024; Solano López y Villalobos, 2024)
Fibra Detergente Ácido (FDA)	30% - 40%	Menor valor indica mayor digestibilidad ((Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022)

Fuente: Síntesis de la literatura consultada ((Abdalla et al., 2018); (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022).; (Ferrufino-Suárez et al., 2022)., 2020; (García et al., 2024); Pasturas Tropicales, 2023; tropical.theferns.info, 2024;)

4.7. Métodos estadísticos multivariados aplicados en estudios agrícolas

El estudio de sistemas agrícolas y edáficos requiere enfoques estadísticos capaces de capturar la alta complejidad inherente a los suelos, los cultivos y sus respuestas bioquímicas. La variabilidad espacial, temporal y nutricional del suelo, junto con la dinámica fisiológica de los forrajes, hace que el análisis multivariado sea una herramienta esencial para identificar patrones, agrupar muestras, evaluar gradientes ambientales y determinar relaciones estructurales entre variable. A continuación, se presentan los fundamentos teóricos de las técnicas estadísticas empleadas comúnmente en investigaciones agronómicas: correlación de Spearman, Análisis de Componentes Principales (PCA), Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) y Análisis de Coordenadas Principales (PCoA).

4.7.1. Correlación de Spearman

La correlación de Spearman es un coeficiente no paramétrico que evalúa la intensidad y dirección de la asociación monotónica entre dos variables cuantitativas (Anderson, 2001) A diferencia de la correlación de Pearson, Spearman se basa en rangos y no en los valores originales, lo que lo hace robusto ante datos que no cumplen supuestos de normalidad, homocedasticidad o linealidad, características frecuentes en variables edáficas como pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico o nutrientes expresados en distintas unidades. Su fórmula general se expresa como:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

donde d_i es la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones y n corresponde al número de datos comparados.

Este tipo de correlación es especialmente útil en estudios de suelos, donde los procesos químicos, microbiológicos y físico-estructurales suelen exhibir relaciones no lineales y escalas heterogéneas. La matriz de correlación derivada permite identificar agrupamientos entre nutrientes, detectar co-variabilidad estructurales y visualizar tendencias mediante mapas de calor, herramientas ampliamente utilizadas para describir interdependencias edáficas antes de aplicar técnicas multivariadas más complejas (Anderson, 2001).

4.7.2. Análisis de Coordenadas Principales (PCoA)

El Análisis de Coordenadas Principales (PCoA), también conocido como metric multidimensional scaling, es una técnica de ordenación basada en matrices de distancia que permite representar objetos multivariados en un espacio de menor dimensión. (Anderson, 2001) A diferencia del PCA, que trabaja con matrices de varianza-covarianza o correlación, el PCoA funciona con distancias previamente definidas, como distancia euclidiana, Manhattan o coeficientes derivados de medidas de similitud.

El PCoA es relevante en sistemas agrícolas porque:

Permite analizar variables medidas en escalas homogéneas, como crecimiento en centímetros o biomasa en kg/m^2 .

Facilita la visualización de patrones temporales en mediciones repetidas.

Es robusto para identificar grupos o separaciones entre tratamientos.

Se adapta a matrices de distancia que no responden a relaciones lineales, lo cual es común en procesos agronómicos.

Los ejes derivados (principal coordinates) representan gradientes de disimilitud que sintetizan la variación multivariada, por lo que el método ha sido ampliamente aplicado en estudios de productividad vegetal, monitoreo agrícola y análisis temporal del crecimiento forrajero.

4.7.3. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA)

El Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) es un método de ordenación multivariada que relaciona directamente un conjunto de variables de respuesta con un conjunto de variables ambientales o explicativas (Anderson, 2001). A diferencia del PCA, orientado a describir la estructura interna de la covariación, el CCA busca explicar dicha estructura mediante factores ambientales conocidos.

En el ámbito agrícola, el CCA es apropiado para interpretar:

La influencia de factores espaciales (por ejemplo, diferentes lotes o áreas de cultivo).

Los efectos de tratamientos agronómicos (fertilización, riego, manejo).

Los cambios temporales en la composición química del suelo.

El método genera ejes canónicos que maximizan la correlación entre los gradientes ambientales y los patrones multivariados de los nutrientes. Esto permite visualizar

simultáneamente la contribución de cada variable, la agrupación de muestras y la relación entre los factores ambientales y las propiedades químicas del suelo, siendo una herramienta ampliamente validada en edafología y ecología de suelos (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022).

4.7.4. Análisis de Componentes Principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) es una técnica de reducción dimensional diseñada para transformar un conjunto amplio de variables correlacionadas en un número menor de componentes independientes que explican la mayor proporción de la variación total (Atoloye, 2020). Cada componente principal representa un gradiente estadístico generado a partir de combinaciones lineales de las variables originales.

En estudios agrícolas, el PCA es ampliamente utilizado para:

- Identificar gradientes de fertilidad del suelo.
- Evaluar la estructura química en diferentes condiciones espaciales o temporales.
- Caracterizar la calidad bromatológica del forraje.
- Comparar grupos de manejo o tratamientos.

El PCA permite analizar simultáneamente variables expresadas en diferentes unidades, especialmente cuando se emplea una matriz de correlación estandarizada mediante z-score, técnica que asigna el mismo peso estadístico a todas las variables (Anderson, 2001) Debido a su capacidad para sintetizar la complejidad de los datos, el PCA se ha consolidado como una herramienta fundamental en investigaciones de fertilidad del suelo y producción forrajera.

4.7.5. Software estadístico PAST

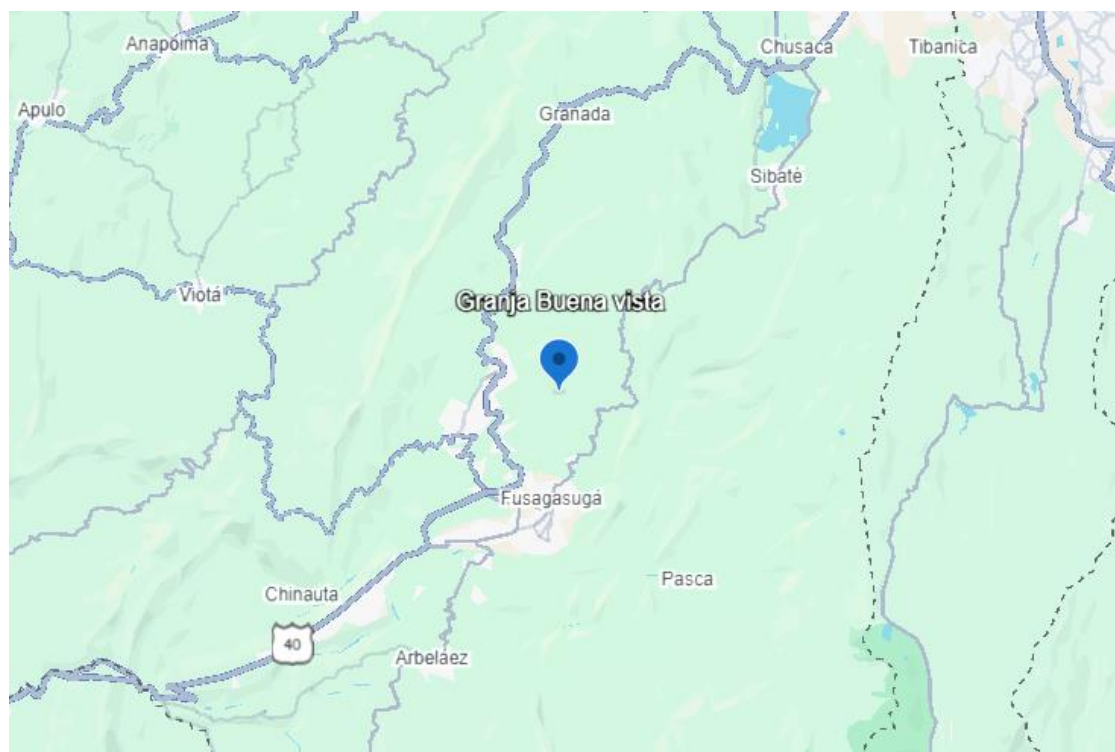
PAST (Paleontological Statistics), desarrollado por (Hammer et al., 2001) es un software de análisis estadístico orientado a datos ambientales, ecológicos y multivariados. Su diseño permite trabajar con matrices complejas sin necesidad de programación, lo que facilita la aplicación de métodos como PCA, CCA, PCoA y múltiples índices de distancia y correlación. PAST es ampliamente valorado en investigaciones edáficas y agronómicas debido a su precisión en ordenación multivariada, su interfaz accesible y su compatibilidad con datos de distintas escalas y estructuras.

Capítulo 5. Marco Metodológico

5.1. Localización y condiciones ambientales

El ensayo se desarrolló en la Granja Porcícola Buenavista, ubicada en el municipio de Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia, en las coordenadas 4°23'34" N y 74°21'23" W, a una altitud aproximada de 1.726 m s. n. m. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, el área corresponde al bioma de bosque muy húmedo premontano (bmh-P), caracterizado por una temperatura media anual cercana a 20 °C y una precipitación promedio de 1250 mm, condiciones que influyen directamente en los procesos de mineralización, disponibilidad de nutrientes y dinámica del crecimiento forrajero.

Ilustración 1 Ubicación espacial de la Granja Buena Vista



Fuente: propia

El estudio se realizó en dos lotes contrastantes dentro de la unidad productiva: Lote Biodigestor (textura arcillo-arenosa) y Lote Hernando (textura franco-arcillosa). La heterogeneidad física y química entre ambos lotes fue confirmada mediante la caracterización basal del día 1, realizada por el laboratorio AGRILAB, que evidenció diferencias marcadas en pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y contenidos de macro y micronutrientes. (Ver tabla 3) Estas diferencias preexistentes justificaron la necesidad de tratar cada lote como un bloque independiente, con el fin de controlar la variabilidad espacial y evitar que esta afectara la interpretación de los efectos asociados a los tratamientos de fertirriego.

5.2. Material biológico

El material biológico empleado en este estudio comprendió dos insumos orgánicos de origen porcino Porcinaza Líquida y Biol junto con praderas establecidas de pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*). La calidad, composición química y estabilidad de los insumos orgánicos fueron consideradas fundamentales para la definición de su manejo, frecuencia de aplicación y estimación de su aporte potencial al suelo y al crecimiento del forraje. Para este fin, ambos materiales fueron previamente caracterizados en laboratorio bajo métodos estandarizados.

5.2.1. Caracterización de la Porcinaza Líquida (año 2018)

La porcinaza utilizada correspondió a la fracción líquida del estiércol porcino proveniente de la Granja Buenavista, cuya caracterización fue realizada por Agrilab Laboratorios S.A.S. en el año 2018. El análisis incluyó parámetros físico-químicos esenciales para determinar su calidad como fertilizante orgánico. (Ver tabla 3)

5.2.2. Caracterización del Biol (año 2024)

El Biol empleado provino de procesos de digestión anaerobia implementados en el sistema de producción porcina, y su caracterización reciente fue realizada por Agrilab en 2024. (ver tabla 3)

Ilustración 2 Biodigestores Granja Buena Vista (fuente de biol del estudio)



La selección de los dos efluentes responde a su disponibilidad local, su potencial como mejoradores de suelo y su creciente interés en sistemas de economía circular agropecuaria. La porcínaza líquida aporta N, P y K en concentraciones moderadas y fracciones orgánicas de descomposición progresiva, favoreciendo la liberación lenta de nutrientes. Por su parte, el Biol destaca por su fracción mineral y micronutrientes fácilmente aprovechables, además de su baja carga salina.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de los efluentes utilizados (Biol y Porcinaza líquida) (Agrilab Laboratorios S.A.S., 2018; 2023–2024)

Parámetro	Unidad	Biol (2023–2024)	Porcinaza líquida (2018)
pH	-	7.48	6.83
Conductividad eléctrica (CE)	dS/m	0.132	0.04
Densidad	g/cm ³	1	1.01
Carbono oxidable	g/L	1.05	—
Sólidos insolubles	g/L	—	9.27
Nitrógeno total	g/L	1.14	0.87
Nitrógeno amoniacal (N–NH ₄ ⁺)	mg/L	—	16.1
Fósforo total (P)	g/L	0.317	—
Fósforo (P ₂ O ₅)	g/L	—	0.57
Potasio total (K)	g/L	0.914	—
Potasio (K ₂ O)	g/L	—	0.55
Calcio (Ca)	g/L	0.281	—
Magnesio (Mg)	g/L	0.075	—
Azufre (S)	g/L	0.162	—
Hierro (Fe)	mg/L	4.72	—
Manganeso (Mn)	mg/L	0.133	—
Cobre (Cu)	mg/L	0.364	—
Zinc (Zn)	mg/L	2.73	—
Boro (B)	mg/L	14.6	—

Nota. Los valores de biol corresponden al análisis realizado en 2023–2024 y los de porcinaza líquida al análisis reportado por AGRILAB en 2018. Los datos provienen de los informes analíticos oficiales suministrados para el desarrollo del estudio. La tabla fue elaborada por autoría propia.

Ambos insumos representan alternativas viables para sistemas sostenibles de fertilización en praderas tropicales, y su caracterización detallada permitió determinar adecuadamente las dosis, los tiempos de aplicación y la interpretación posterior de los cambios observados en el suelo y en el cultivo durante el ensayo.

5.2.3. Pradera de Pasto Estrella Africana

El experimento se desarrolló sobre praderas previamente establecidas de *Cynodon nlemfuensis*, una especie de amplia adaptación edafoclimática, común en sistemas ganaderos del trópico bajo. Para asegurar homogeneidad en la respuesta, el ensayo se inició con un rebrote uniforme de 30 días, tanto en el lote Biodigestor como en el lote Hernando. Este manejo permitió evaluar los efectos de los tratamientos orgánicos sobre un mismo nivel fisiológico del forraje.

5.3. Diseño de la investigación y estructura del estudio

El diseño metodológico del estudio se orientó a evaluar los efectos del reúso de efluentes porcinos —porcinaza líquida y biol— sobre la salud del suelo y la productividad del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*). Debido a que la investigación se desarrolló en un sistema productivo previamente establecido, bajo condiciones reales de finca, se adoptó un diseño no experimental, observacional y longitudinal, apropiado para estudios en los que las unidades experimentales no pueden ser reasignadas ni homogenizadas de manera controlada (Hernández-Sampieri et al., 2018).

Las unidades experimentales correspondieron a parcelas existentes dentro de dos lotes con características edáficas naturalmente contrastantes. Esta condición estructural determinó la distribución de los tratamientos y justificó el uso de un diseño por bloques naturales, en el cual cada lote actúa como un bloque independiente debido a sus diferencias intrínsecas en las propiedades físicas y químicas del suelo (Gómez & Gómez, 1984).

Ilustración 3 lote Hernando establecimiento de parcelas para muestreos



Los dos lotes —Biodigestor y Hernando— fueron definidos como bloques independientes tras la caracterización inicial realizada por el laboratorio AGRILAB en el Día 1, (ver tabla 3) la cual evidenció contrastes marcados en parámetros como pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica, fósforo disponible y cationes intercambiables. Estas diferencias reflejan la variabilidad espacial del sistema y justifican el análisis separado de cada lote para evitar que los gradientes edáficos interfieran en la interpretación de los efectos de los tratamientos.

En cada lote se evaluaron tres tratamientos:

- Biol
- Porcinaza líquida
- Testigo (sin aplicación)

Cada tratamiento se aplicó a una parcela definida, para un total de seis unidades experimentales. La Tabla 4 resume la estructura general del diseño.

Tabla 4 Estructura del diseño de la investigación

Elemento		Descripción
	Tipo de estudio	No experimental, observacional, longitudinal
	Bloques (lotes)	Biodigestor y Hernando
	Tratamientos	Biol; Porcinaza líquida; Testigo
	Unidades experimentales	6 parcelas (1 por tratamiento dentro de cada lote)
suelo	Momentos de evaluación del	Día 1 y Día 45
forraje	Momento de evaluación del	Día 45
	Variable de seguimiento	Altura semanal del pasto (semanas 1 a 6)

Nota. La tabla resume los elementos estructurales que conforman el diseño metodológico del estudio, incluyendo la unidad de análisis, temporalidad, tratamientos aplicados y momentos de evaluación. Elaboración propia.

5.3.1. Justificación del diseño y de los tiempos de medición

La estructura metodológica respondió a dos necesidades centrales:

- Comprender cómo los efluentes influyen en propiedades edáficas en un ciclo corto de fertilización líquida, y
- Capturar la dinámica productiva del pasto Estrella a lo largo de un ciclo fisiológico completo.

La duración total del ensayo fue de 45 días, seleccionada con base en criterios agronómicos. En gramíneas tropicales como *Cynodon nlemfuensis*, la proteína cruda alcanza su máximo hacia los 30–35 días de rebrote (Ferrufino-Suárez et al., 2022) mientras que la biomasa continúa aumentando hasta los 45–50 días (García et al., 2024) Por ello, un ciclo de 45 días

constituye un punto de equilibrio entre calidad y cantidad, y es representativo de decisiones de manejo utilizadas por productores en sistemas de pastoreo rotacional. Además, este rango temporal permite detectar cambios en propiedades edáficas asociadas a aplicaciones líquidas, cuya expresión suele presentarse en intervalos de 30 a 60 días.

La elección de mediciones en dos momentos (Día 1 y Día 45) respondió a la necesidad de establecer un contraste basal–final que permitiera interpretar variaciones atribuibles a los tratamientos, manteniendo la homogeneidad operativa del muestreo. En paralelo, el registro semanal de la altura del pasto permitió caracterizar la tasa de crecimiento forrajero, que constituye un indicador agronómico fundamental para estimar capacidad de carga y disponibilidad de biomasa.

5.3.2. Descripción de las unidades experimentales y aplicación de tratamientos

Cada unidad experimental correspondió a una parcela delimitada físicamente dentro del lote, con bordes libres y separación mínima de 1 m para evitar contaminación cruzada. La aplicación de los tratamientos se realizó una única vez, inmediatamente después del muestreo basal del Día 1. Tanto el biol como la porcinaza líquida se aplicaron en dosis de 100 L por parcela, equivalente a aproximadamente 10 mm de lámina de fertirriego. El efluente se trasladó desde el pozo estercolero y el tanque de almacenamiento mediante tractor, utilizando canecas de 20 L (cinco por parcela). La aplicación se realizó únicamente en días sin lluvia, con el fin de evitar escorrentía y pérdida de nutrientes.

Ilustración 4 Metodo de movilizacion de efluentes porcinaza, Biol para lotes respectivos.



Tabla 5 *Distribución de tratamientos en los bloques naturales del estudio*

Lote	Tratamiento	Dosis aplicada	Aplicación	Observación
Biodigestor	Biol	100 L	Día 1	Fertirriego manual
Biodigestor	Porcinaza líquida	100 L	Día 1	Fertirriego manual
Biodigestor	Testigo	0 L	—	Control
Hernando	Biol	100 L	Día 1	Fertirriego manual
Hernando	Porcinaza líquida	100 L	Día 1	Fertirriego manual
Hernando	Testigo	0 L	—	Control

Nota. Cada lote (bloque natural) estuvo compuesto por tres parcelas, una por cada tratamiento evaluado: Biol, Porcinaza líquida y Testigo. Los lotes se consideraron bloques independientes debido a sus diferencias edáficas verificadas mediante caracterización de laboratorio (AGRILAB, Día 1).

5.3.3. Muestreo del suelo

El muestreo siguió estrictamente el protocolo del IGAC (2021). En cada parcela se recolectaron entre 15 y 20 submuestras tomadas en zigzag a una profundidad uniforme de 0–20 cm. Estas submuestras provinieron de aproximadamente 12 a 18 apiques distribuidos

homogéneamente en el área útil de cada parcela, asegurando representatividad espacial y minimizando el sesgo por variabilidad microambiental del suelo.

Cada apique aportó una fracción de suelo que, al homogenizarse, conformó una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg.

El uso combinado de matrices de correlación de Spearman, PCoA, CCA y PCA permitió ir más allá de comparaciones univariadas y capturar la estructura multivariada del sistema suelo-planta. Este enfoque es consistente con recomendaciones metodológicas en ciencia del suelo y ecología, donde el PCoA y el CCA se emplean para sintetizar gradientes de fertilidad, acidez y manejo a partir de múltiples variables químicas y ambientales



5.3.3.1 Aseguramiento y control de calidad (QA/QC) y reproducibilidad

Para garantizar la fiabilidad y validez de los resultados, se implementaron procedimientos estrictos de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) durante el muestreo, el transporte y el análisis de laboratorio. En campo, todos los procedimientos de muestreo se ejecutaron con

equipos previamente lavados y desinfectados (baldes plásticos, palas de acero inoxidable) con el fin de evitar contaminación cruzada entre parcelas. Cada muestra fue rotulada con información completa de lote, tratamiento, fecha y profundidad de muestreo, y posteriormente transportada en contenedores limpios y protegidos, siguiendo lineamientos técnicos internacionales para manejo de muestras agrícolas (FAO, 2020).

En el laboratorio encargado del análisis (AGRILAB), las determinaciones se realizaron bajo métodos analíticos estandarizados y reconocidos internacionalmente, tales como Mehlich-3 (Kulhánek et al., 2023) para extracción de nutrientes en suelo y los métodos oficiales de AOAC INTERNATIONAL para análisis bromatológicos. El cumplimiento de estos protocolos asegura coherencia analítica entre mediciones y permite la comparación válida de resultados entre lotes y tratamientos.

Los laboratorios reportaron que sus equipos analíticos son sometidos a calibraciones periódicas, realizadas conforme a las recomendaciones del fabricante, lo cual contribuye a la precisión instrumental y minimiza el error analítico. Adicionalmente, las muestras se procesaron siguiendo rutinas de control interno, que incluyen análisis por duplicado en casos necesarios y la verificación de estándares de referencia certificados.

Tabla 6 *Requerimientos de muestra y métodos analíticos empleados para el análisis de suelos*

Determinación	Método analítico utilizado	Profundidad de muestreo	Cantidad mínima requerida	Cantidad máxima aceptada	Observaciones técnicas
Propiedades químicas generales del suelo (pH, CE, MO, CICE, nutrientes disponibles)	Mehlich-3 para extracción; lectura por ICP-OES o AAS	0–20 cm	1 kg	1 kg	Muestras compuestas por 15–20 submuestras; sin requisitos adicionales.
Elementos traza disponibles	ICP-OES / AAS después de extracción Mehlich-3	0–20 cm	200 g	200 g	Se requiere homogeneidad completa de la muestra. Mantener la muestra protegida de humedad externa.
Sulfatos en suelo	Método colorimétrico estándar	0–20 cm	500 g	700 g	Sin requisitos adicionales. Mantener temperatura estable durante medición.
Cloruros en suelo	Método volumétrico	0–20 cm	500 g	700 g	
Salinidad del suelo	Conductividad eléctrica en extracto 1:2 o pasta saturada	0–20 cm	2 kg	2 kg	

Nota. Esta tabla integra los requerimientos de cantidad de muestra, profundidad y métodos analíticos empleados para las determinaciones físico-químicas del suelo. La estructura se basa en lineamientos técnicos del IGAC (2021) y en los protocolos analíticos reportados por el laboratorio AGRILAB.

5.3.4. Muestreo del forraje

Ilustración 5 Muestras de forraje para posterior rotulación



La evaluación de la respuesta productiva del pasto se realizó el Día 45 mediante la cosecha de un cuadrante de 1 m² colocado en el centro de cada parcela. Se determinó materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra cruda (FC), fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA), variables analizadas en laboratorio certificado bajo métodos AOAC para bromatología. Estas variables permitieron evaluar cambios en calidad nutricional asociados a los tratamientos.

5.4. Plan de análisis estadístico

El análisis estadístico se desarrolló con el propósito de caracterizar la dinámica de variación de las propiedades fisicoquímicas del suelo, la composición bromatológica del forraje y el crecimiento del pasto bajo tres tratamientos de fertirriego en dos lotes con historial de manejo contrastante. Todos los procedimientos fueron ejecutados en el software software PAST v4.03 (Paleontological Statistics), un programa gratuito y ampliamente utilizado en investigaciones ecológicas, biológicas, ambientales y agronómicas. PAST ofrece un conjunto robusto de

herramientas para análisis multivariados, incluyendo correlaciones, matrices de distancia, PCoA, CCA y PCA, lo que permite trabajar con datos complejos y de múltiples escalas (Hammer et al., 2001). PAST permite trabajar simultáneamente con múltiples variables cuantitativas, aplicar técnicas de ordenación multivariada.

El software PAST v4.03 fue seleccionado porque se adapta de manera óptima a las características de los datos obtenidos en este estudio, los cuales incluyen variables fisicoquímicas del suelo con escalas heterogéneas, datos bromatológicos del forraje y mediciones de crecimiento semanal. PAST permite trabajar eficientemente con matrices mixtas y no requiere supuestos estrictos de normalidad, lo que resulta adecuado para datos ambientales y edáficos.

5.4.1. Análisis exploratorio preliminar: Correlación de Spearman

Como paso exploratorio previo, se evaluaron las asociaciones monotónicas entre las variables fisicoquímicas del suelo mediante el coeficiente de correlación Spearman (ρ).

La correlación de Spearman (ρ) es un coeficiente no paramétrico que permite medir el grado de asociación monotónica entre dos variables (Anderson, 2001). Su fórmula general se expresa como:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

donde d_i es la diferencia entre los rangos de cada par de observaciones y n corresponde al número de datos comparados. Este análisis formó parte de la construcción del PCoA, exceptuando el CCA y PCA, permitió identificar patrones iniciales en la covariación de nutrientes y propiedades edáficas en los dos lotes y bajo los tres tratamientos.

En PAST, la matriz se generó a partir de la opción Correlation → Spearman, construyendo automáticamente los coeficientes para todas las variables del Día 1 y luego para el Día 45. Estos resultados fueron utilizados únicamente para visualización mediante mapas de calor.

Estos mapas de calor, permiten representar de forma gráfica la magnitud y dirección de las correlaciones entre variables. Este tipo de visualización facilita la identificación inmediata de patrones de asociación, agrupamientos de nutrientes que responden de manera similar y contrastes entre lotes o tratamientos. Los mapas de calor constituyen así una herramienta descriptiva para reconocer tendencias iniciales en la estructura interna del suelo antes de aplicar los análisis multivariados (PCoA, CCA y PCA), interviniendo solamente en la construcción del PCoA.

5.4.2. Análisis de Coordenadas Principales (PCoA)

El Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) es una técnica de ordenación multivariada que permite transformar una matriz de distancias entre muestras en un conjunto de ejes capaces de representar la variación en un espacio de menor dimensión, con el fin de visualizar de manera gráfica las relaciones de similitud o disimilitud entre objetos multivariados (Gaddis & Gaddis, 1990). Esta técnica descompone la matriz de distancias en valores propios (eigenvalues), los cuales indican la proporción de variación explicada por cada eje; así, los ejes PCoA1, PCoA2 y los subsecuentes constituyen gradientes sintéticos que no corresponden a las variables originales, sino a combinaciones multivariadas que reflejan la estructura interna de los datos.

Su aplicación fue especialmente adecuada en este estudio debido a la naturaleza altamente multivariada de los datos edáficos, que incluyen múltiples propiedades químicas evaluadas simultáneamente, y porque la matriz de distancias derivada de los coeficientes de Spearman permite representar los patrones de semejanza entre muestras del Día 1 y el Día 45 sin requerir supuestos de normalidad ni homocedasticidad, condiciones que rara vez se cumplen en matrices de suelo. Además, el PCoA facilita la identificación de agrupamientos asociados a lote, tratamiento y tiempo, lo que resulta fundamental para interpretar los cambios edáficos ocurridos durante el ciclo experimental. Su uso es ampliamente recomendado en estudios ecológicos, edáficos y agronómicos debido a su robustez y a su capacidad para sintetizar información compleja (Gaddis & Gaddis, 1990).

En el caso del componente forrajero, se empleó una matriz de distancias euclidianas, dado que las variables de calidad nutricional (materia seca, fibra cruda, FDN, FDA y proteína cruda) comparten escalas comparables y unidades coherentes, lo que permite el uso adecuado de distancias métricas. Las mediciones repetidas a lo largo del tiempo generaron un patrón estructurado donde el ciclo temporal actúa como principal gradiente de variación, y dicho comportamiento se refleja apropiadamente en los ejes euclidianos obtenidos.

El procedimiento analítico se llevó a cabo en el software PAST (Hammer et al., 2001). Para ello, se ingresó la matriz de disimilitud correspondiente: $1 - \rho$ para el suelo y la matriz euclidiana para el forraje— y posteriormente se seleccionó la opción Multivariate → Ordination → Principal Coordinates Analysis. El programa generó los eigenvalues, permitiendo verificar el porcentaje de varianza explicada por cada dimensión, y produjo el plano PCoA1–PCoA2,

utilizado como síntesis gráfica para interpretar la estructura multivariada de las muestras en relación con sus variables químicas y productivas.

5.4.3. Análisis de Correspondencia Canónica (CCA)

Para relacionar directamente las propiedades fisicoquímicas del suelo con los factores ambientales del experimento (Lote, Día y Tratamiento) se aplicó un Análisis de Correspondencia Canónica (CCA), una técnica multivariada que relaciona de manera directa las variables ambientales con las variables de respuesta, permitiendo identificar los gradientes que explican la estructura multivariada del suelo (Gaddis & Gaddis, 1990). A diferencia del PCA, el CCA integra simultáneamente variables cuantitativas (nutrientes del suelo) y categóricas (factores ambientales), generando ejes canónicos que maximizan la correlación entre ambos conjuntos.

El CCA fue particularmente adecuado para este estudio debido a que permitió evaluar si los cambios observados en el suelo podían atribuirse al manejo diferencial entre los lotes, al efecto de los tratamientos de fertirriego y a la evolución temporal entre el Día 1 y el Día 45. En PAST, el modelo se construyó ingresando la matriz de nutrientes como matriz de respuesta y añadiendo, al final, las columnas que representaron las variables ambientales codificadas.

5.4.4. Análisis de Componentes Principales (PCA)

Para identificar los gradientes principales de variación en las propiedades químicas del suelo y en la calidad bromatológica del forraje Se aplicó el Análisis de Componentes Principales (PCA), una técnica multivariada que permite sintetizar la variación conjunta de múltiples variables y representar sus patrones estructurales en un espacio reducido de componentes. (Anderson, 2001) Este método permite reducir la dimensionalidad de las matrices,

transformando múltiples variables correlacionadas en componentes sintéticos que explican la mayor parte de la variación total.

En este estudio, los PCA se ejecutaron utilizando matrices de correlación de Pearson estandarizadas, lo cual es apropiado para variables expresadas en diferentes unidades y magnitudes. La estandarización permitió que todas las variables aportaran equitativamente al

5.4.5. Justificación integral del enfoque estadístico

El conjunto de técnicas aplicado permitió abordar la complejidad del sistema evaluado desde múltiples perspectivas. Spearman ofreció una primera aproximación descriptiva a la estructura interna del suelo. El PCoA permitió identificar gradientes de variación conjunta en la fertilidad edáfica y la composición del forraje. El CCA estableció la relación directa entre las propiedades químicas y los factores ambientales del experimento. Finalmente, el PCA permitió representar la similitud multivariada en la dinámica de crecimiento del pasto.

Capítulo 6. Resultados

6.1. Caracterización inicial del suelo (Día 1)

La caracterización química inicial del suelo permitió establecer el estado basal de cada lote antes de la aplicación de los tratamientos. Los análisis fueron realizados por el laboratorio AGRILAB en el Día 1, empleando extracción Mehlich-3, combustión seca, espectrometría ICP-OES y procedimientos estandarizados para evaluación fisicoquímica, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 7 *Propiedades químicas iniciales del suelo en los lotes Biodigestor y Hernando (Día 1)*

Parámetro	Biodigestor –Porcinaza	Biodigestor – Biol	Biodigestor – Testigo	Hernando Porcinaza	Hernando – Biol	Hernando – Testigo
pH	6.04	5.59	5.87	4.81	4.21	4.03
CE (dS/m)	0.44	0.39	0.45	0.12	0.31	0.22
MO (%)	3.15	3.02	2.76	2.59	2.38	2.20
COOx (%)	1.83	1.76	1.61	1.50	1.23	1.19
CICE (meq/100 g)	16.50	15.23	13.45	6.16	6.54	5.93
P (mg/kg)	136	129	144	3.16	2.96	2.11
K (mg/kg)	773	712	754	54.3	52.3	51.3
Ca (mg/kg)	1890	1877	1770	220	217	243
Mg (mg/kg)	597	574	348	47	44	41
Fe (mg/kg)	392	375	369	550	525	511
Mn (mg/kg)	148	135	130	13.3	13.0	11.3
Cu (mg/kg)	7.08	6.97	7.12	2.71	2.33	2.44
Zn (mg/kg)	19.5	18.7	18.9	2.98	2.71	2.26
B (mg/kg)	0.51	0.49	0.66	0.128	0.122	0.119

Nota. Los valores corresponden al análisis fisicoquímico basal realizado por AGRILAB (Día 1), empleando los métodos Mehlich-3, ICP-OES/AAS y procedimientos estandarizados para suelos agrícolas.

6.1.1. Interpretación descriptiva del Lote Biodigestor (Día 1)

El Lote Biodigestor presentó condiciones químicas asociadas a su textura arcillo–arenosa y a un historial de mayor acumulación de residuos orgánicos. El pH osciló entre 5.59 y 6.04, valores clasificados como ligeramente ácidos, adecuados para gramíneas forrajeras de ambientes tropicales. La conductividad eléctrica (0.39–0.45 dS/m) se mantuvo dentro del rango de suelos no salinos.

Los contenidos de materia orgánica (2.76–3.15%) y carbono oxidable (1.61–1.83%) fueron moderados, reflejando cierta acumulación de residuos orgánicos estabilizados. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se ubicó entre 13.45 y 16.50 meq/100 g, lo cual indica un suelo con buena capacidad de retención de nutrientes, congruente con la fracción arcillosa del lote, como se muestra en la ilustración x.

Ilustración 6 Grafica de barras de cada tratamiento (PH, CE)

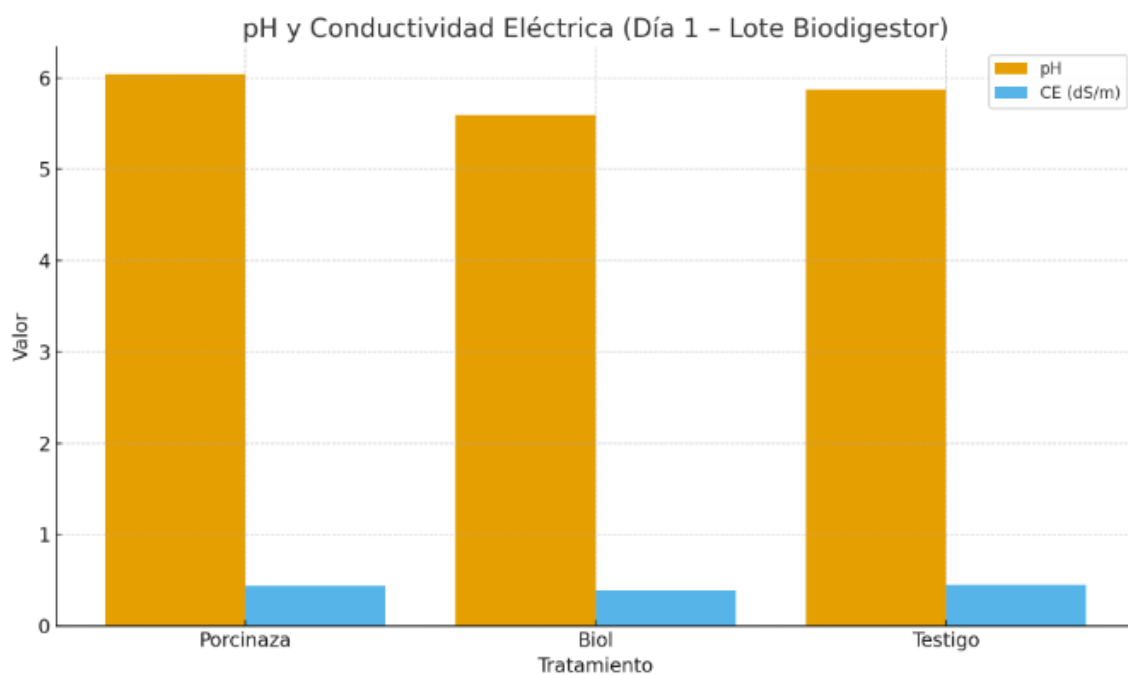
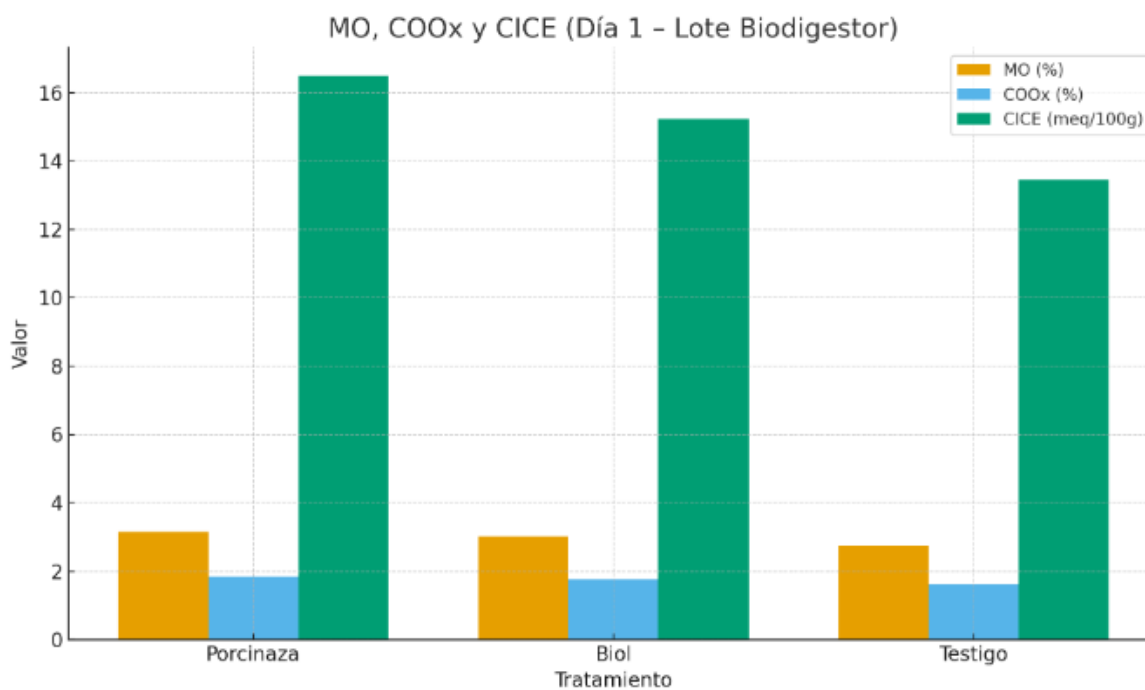
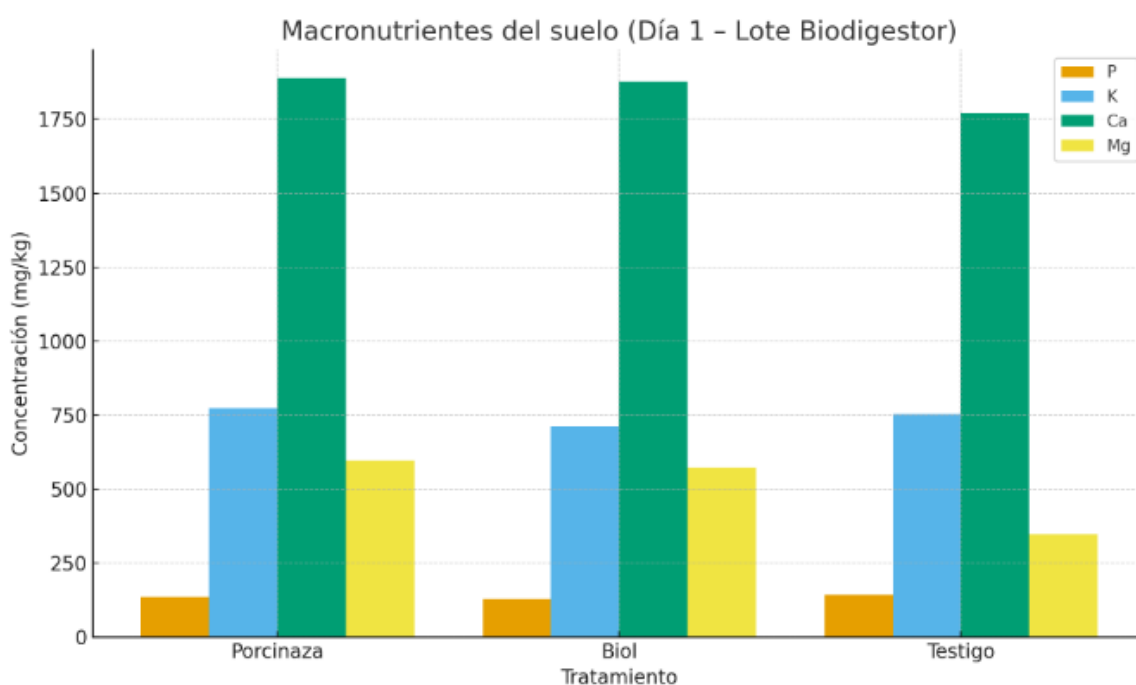


Ilustración 7 Grafica de barras de cada tratamiento (MO, COOx y CICE dia 1- lote Biodigestor)



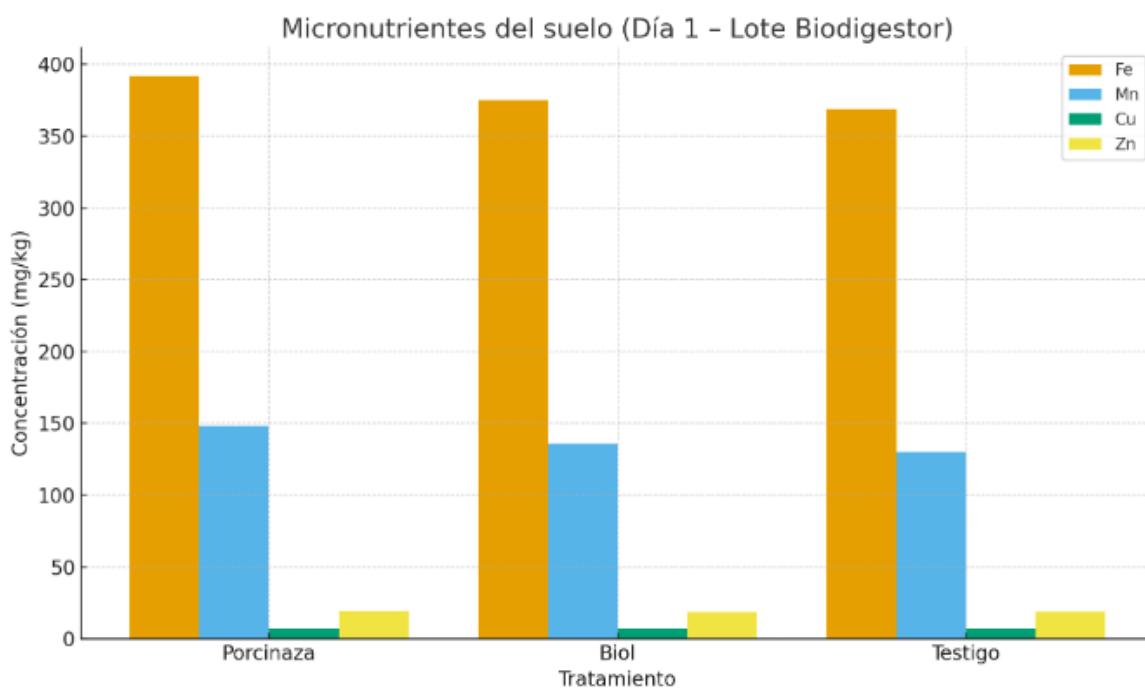
Los macronutrientes mostraron niveles elevados de fósforo disponible (129–144 mg/kg) y potasio intercambiable (712–773 mg/kg), características coherentes con aportes históricos de efluentes porcinos. Los contenidos de Ca (1770–1890 mg/kg) y Mg (348–597 mg/kg) también fueron altos, incrementando la saturación de bases y favoreciendo la disponibilidad nutrimental, como se muestra en la ilustración x ..

Ilustración 8 Grafico de barras, Macronutrientes del suelo (Dia 1 - Lote Biodigestor



En cuanto a micronutrientes, Fe, Mn, Cu y Zn se encontraron en niveles altos respecto a rangos críticos para forrajes tropicales, lo que sugiere un suelo químicamente fértil y con buena disponibilidad de elementos esenciales para el rebrote del pasto Estrella, como se muestra en la ilustración x .

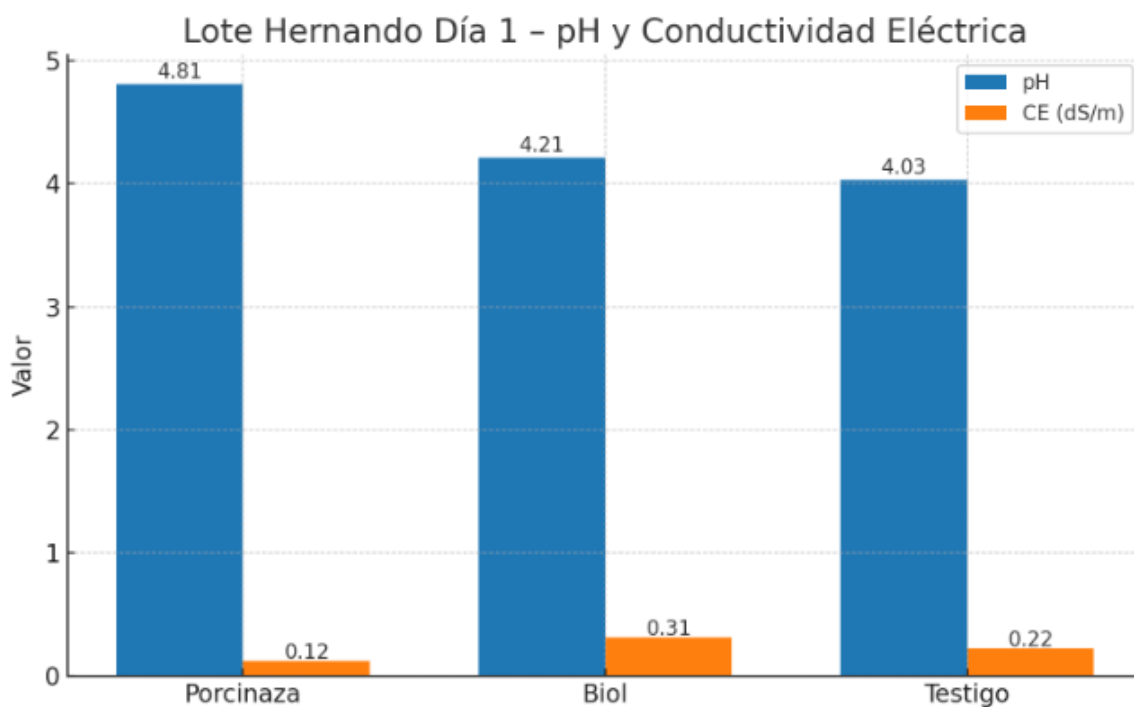
Ilustración 9 Grafico de barras Micronutrientes del suelo (Dia 1 - Lote Biodigestor)



6.1.2. Interpretación descriptiva del Lote Hernando (Día 1)

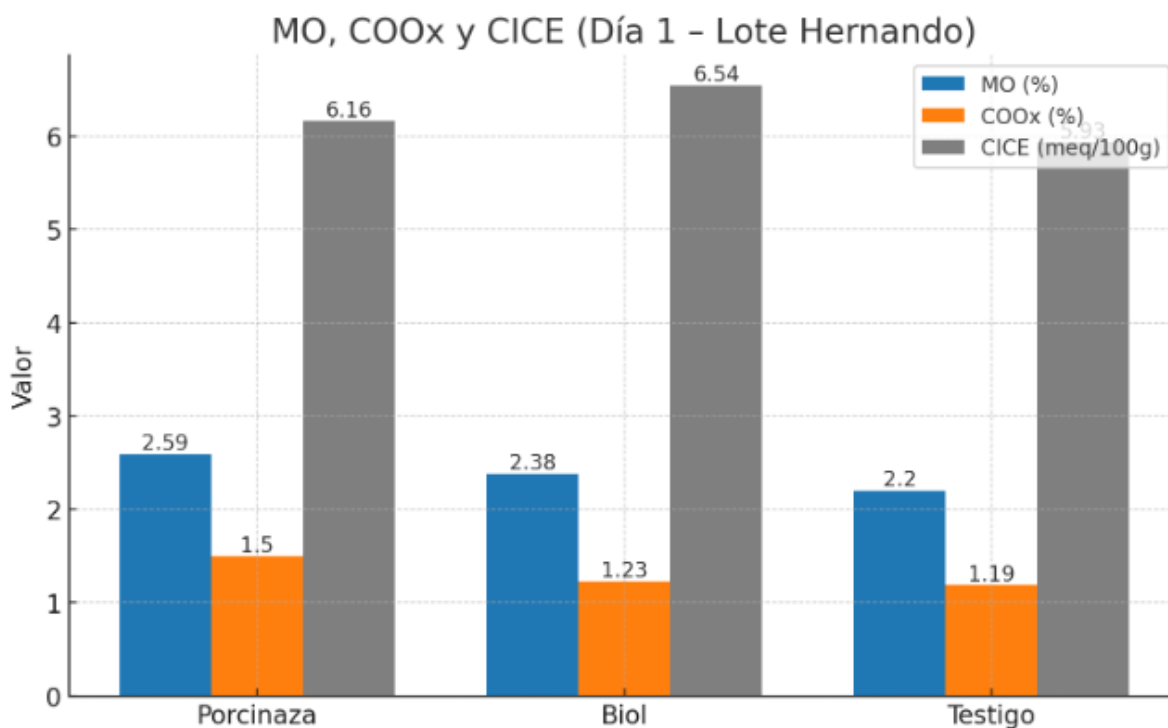
El Lote Hernando presentó un comportamiento químico característico de su textura franco–arcillosa y de un historial de manejo con menor acumulación de residuos orgánicos. El pH osciló entre 4.03 y 4.81, rangos clasificados como fuertemente ácidos a moderadamente ácidos, lo cual puede limitar la disponibilidad y absorción de macronutrientes esenciales para gramíneas forrajeras. La conductividad eléctrica (0.12–0.31 dS/m) se mantuvo dentro de niveles propios de suelos no salinos, como se observa en la ilustración X.

Ilustración 10 Grafico de barras PH y conductividad (lote Hernando, día 1)



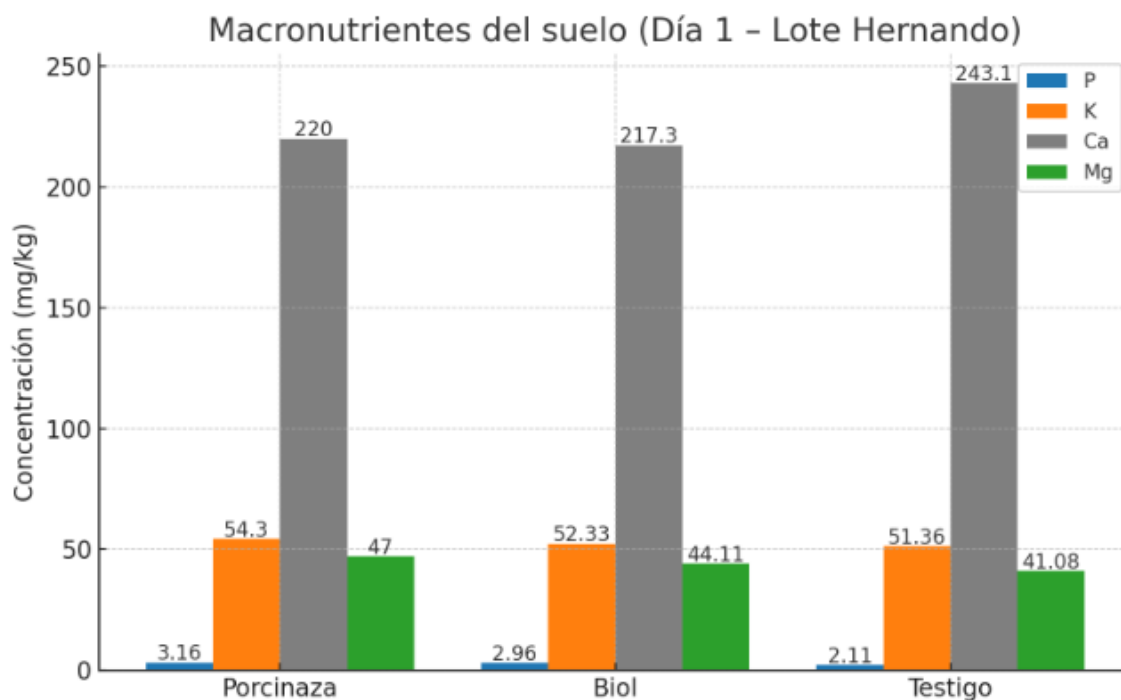
Los contenidos de materia orgánica (2.20–2.59 %) y carbono oxidable (1.19–1.50 %) fueron inferiores a los del Lote Biodigestor, lo que refleja una menor acumulación de residuos orgánicos estabilizados. Asimismo, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) presentó valores bajos (5.93–6.54 meq/100 g), indicando una limitada capacidad de retención de nutrientes y mayor susceptibilidad a procesos de lixiviación. Estos patrones se ilustran en la ilustración X.

Ilustración 11 Grafica de barras de cada tratamiento (MO, COOx y CICE dia 1- lote Hernando)



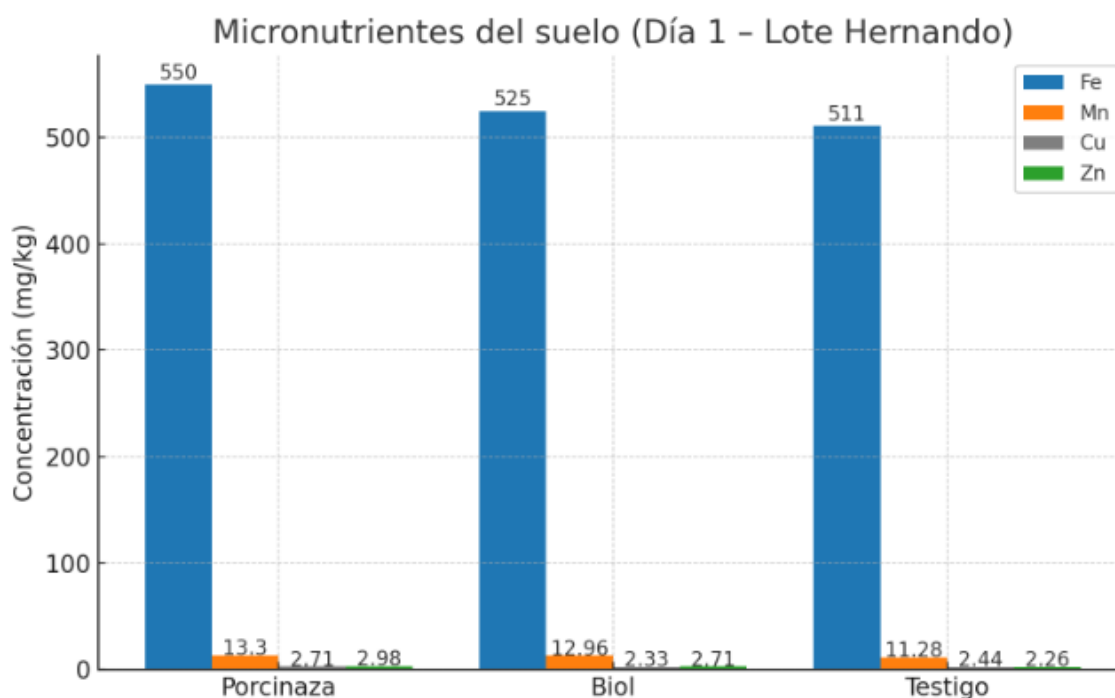
Los macronutrientes mostraron niveles marcadamente bajos de fósforo disponible (2.11–3.16 mg/kg), muy por debajo de los rangos críticos para gramíneas tropicales. Del mismo modo, las concentraciones de potasio (51.36–54.30 mg/kg), calcio (217.30–243.10 mg/kg) y magnesio (41.08–47 mg/kg) fueron considerablemente menores que las registradas en el Lote Biodigestor, evidenciando un suelo químicamente pobre y con restricciones nutricionales importantes para el crecimiento del pasto. Estos resultados se aprecian en la ilustración X.

Ilustración 12 Grafica de barras Macronutrientes del suelo (día 1 lote Hernando)



Respecto a los micronutrientes, el lote presentó niveles inferiores de Mn, Cu y Zn en comparación con el Lote Biodigestor; sin embargo, el hierro (511–550 mg/kg) mostró concentraciones notablemente elevadas, condición típica de suelos ácidos y pobremente tamponados. Este comportamiento sugiere la presencia de un ambiente químico restrictivo para el desarrollo radicular y la disponibilidad equilibrada de oligoelementos, como se muestra en la ilustración X.

Ilustración 13 Grafica de barras Micronutrientes del suelo (día 1 lote Hernando)



6.1.3. Comparación técnica entre lotes (Día 1)

La comparación entre lotes evidenció diferencias amplias en las propiedades del suelo:

- **pH:** Biodigestor fue moderadamente ácido; Hernando mostró acidez fuerte.
- **Materia orgánica y COOx:** mayores en Biodigestor, lo cual explica su mayor capacidad amortiguadora.
- **CICE:** Biodigestor duplicó los valores del Lote Hernando, reflejando mejor capacidad de intercambio y retención nutrimental.
- **Macronutrientes (P, K, Ca, Mg):** los valores del Lote Biodigestor superaron ampliamente a los del Lote Hernando (hasta 40 veces más en P).
- **Micronutrientes:** Biodigestor mostró mayor disponibilidad de Mn, Cu y Zn; Hernando destacó únicamente por Fe elevado, asociado a pH ácido.

Estas diferencias configuran dos ambientes edáficos claramente diferenciados, lo cual es fundamental para la interpretación de los cambios observados en el estudio, tanto en dinámica de nutriente.

6.2. Cambios químicos del suelo entre Día 1 y Día 45

La evolución del suelo en los dos lotes permitió identificar cómo los tratamientos influyeron en los parámetros fisicoquímicos tras 45 días de fertirriego. Los datos corresponden a los análisis realizados por AGRILAB en ambos momentos del muestreo, aplicando los mismos métodos estandarizados (Mehlich-3, combustión seca, ICP–OES/AAS).

Las comparaciones se presentan por lote debido a las diferencias edáficas identificadas previamente, lo que permite describir con mayor precisión la magnitud de los cambios observados.

6.2.1. Cambios químicos en el Lote Biodigestor (Día 1 vs. Día 45)

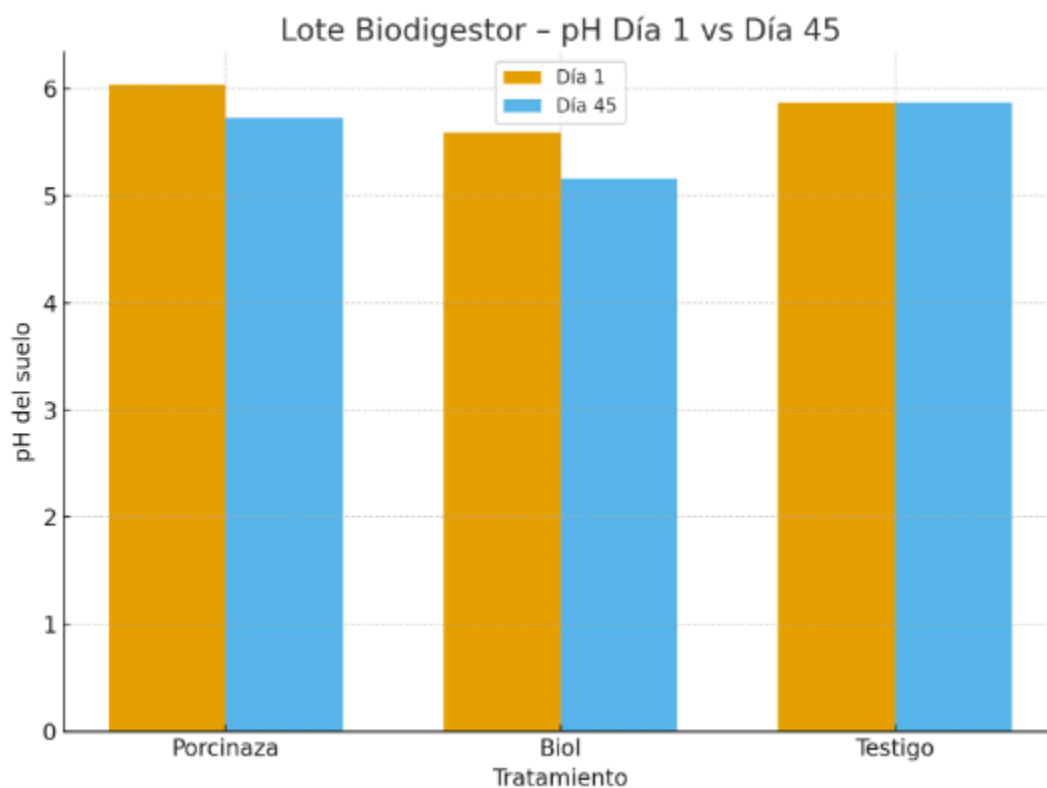
El Lote Biodigestor, caracterizado inicialmente por su fertilidad moderada-alta, mostró variaciones claras en varios parámetros después de la aplicación de Biol y Porcinaza. Las tendencias se describen según los principales grupos de variables.

pH del suelo

El pH presentó un descenso, pasando de valores ligeramente ácidos (5.59–6.04) a rangos algo más ácidos (5.16–5.87).

- Porcinaza: disminuyó 0.31 unidades.
- Biol: disminuyó 0.43 unidades.
- Testigo: permaneció sin variaciones.

Ilustración 14 Grafico de barras lote biodigestor día 1 vs día 45



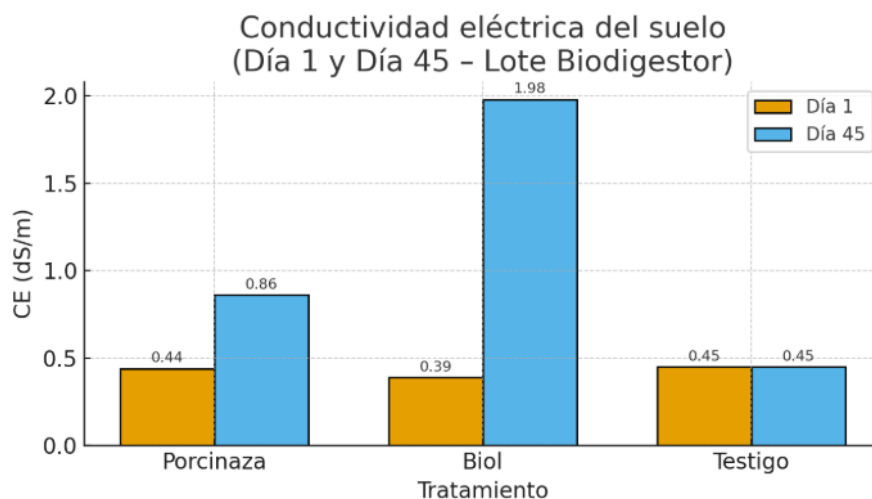
Este comportamiento muestra que el pH reaccionó de manera diferenciada según el tratamiento, manteniéndose dentro de rangos adecuados para *Cynodon nlemfuensis*.

Conductividad eléctrica (CE)

La CE mostró incrementos claros en las parcelas tratadas, reflejando incorporación de sales solubles.

- Porcinaza: aumentó de 0.44 a 0.86 dS/m.
- Biol: aumentó de 0.39 a 1.98 dS/m.
- Testigo: se mantuvo constante (0.45 dS/m).

Ilustración 15 grafico de barras lote biodigestor día 1 vs día 45 Conductividad eléctrica del suelo



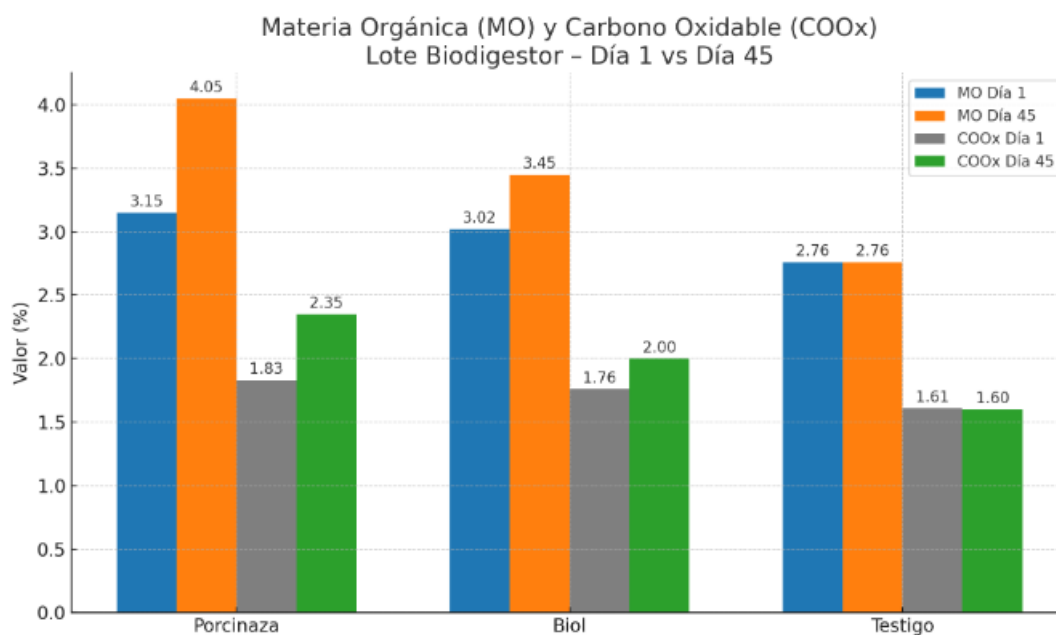
Los incrementos estuvieron por debajo de niveles críticos, lo cual indica que el suelo incrementó su carga iónica sin entrar en condiciones de salinidad.

Materia orgánica (MO) y carbono oxidable (COOx)

Se observaron aumentos apreciables en tratamientos orgánicos:

- Porcinaza: MO pasó de 3.15% a 4.05%; COOx de 1.83% a 2.35%.
- Biol: MO pasó de 3.02% a 3.45%; COOx de 1.76% a 1.93%.
- Testigo: permaneció estable (2.76% de MO; 1.61% de COOx).

Ilustración 16 Lote Biodigestor MO y COOx día 1 vs día 45



Los incrementos reflejan incorporación de material orgánico y actividad de mineralización.

Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)

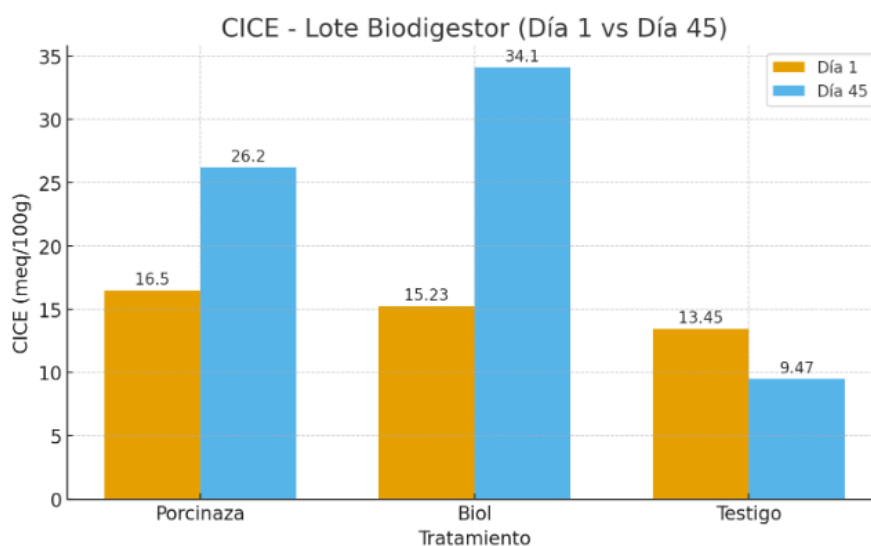
La CICE mostró un comportamiento contrastante:

Porcinaza: aumentó de 16.50 a 26.20 meq/100 g.

Biol: aumentó de 15.23 a 34.10 meq/100 g.

Testigo: descendió de 13.45 a 9.47 meq/100 g.

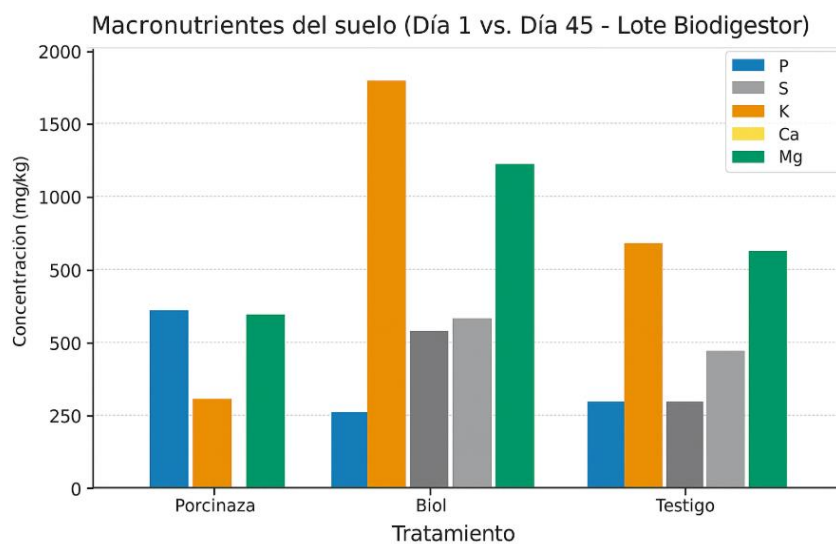
Ilustración 17 Grafico de barras CICE lote biodigestor (día 1 vs día 45)



Este incremento indica mayor capacidad del complejo coloidal para retener cationes, mientras que en el Testigo se observó agotamiento gradual del complejo de intercambio.

Macronutrientes (P, S, K, Ca, Mg)

Ilustración 18 grafico de barras lote biodigestor Macronutrientes del suelo (día 1 vs día 45)



Los tratamientos orgánicos generaron incrementos considerables:

Fósforo disponible (P):

- Porcinaza: 136 → 481 mg/kg
- Biol: 129 → 881 mg/kg
- Testigo: 144 → 20.3 mg/kg

Azufre (S):

Porcinaza y Biol mostraron aumentos significativos (\approx 90–140 mg/kg).

Potasio (K):

- Porcinaza: 773 → 1170 mg/kg
- Biol: 712 → 1450 mg/kg
- Testigo: 754 → 258 mg/kg

Calcio (Ca):

Los valores se duplicaron en tratamientos, alcanzando >4000 mg/kg.

Magnesio (Mg):

Incrementos consistentes: 348–597 mg/kg iniciales → 750–832 mg/kg finales.

Estos cambios confirman un aumento generalizado de nutrientes esenciales en parcelas fertilizadas.

Micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B)

Se observó incremento general en elementos traza:

- **Zn**: 19 → 346 mg/kg (Biol), uno de los cambios más marcados.

- **Cu:** 6.9 → 26.9 mg/kg (Porcinaza).
- **Mn:** aumentó en 30–100 mg/kg según tratamiento.
- **B:** aumentó ligeramente (0.5 → 1.44 mg/kg).
- **Fe:** tendió a estabilizarse o disminuir ligeramente en Biol.

El Testigo mostró valores más bajos y tendencia a la disminución.

Síntesis del Lote Biodigestor

El Lote Biodigestor presentó una respuesta clara al fertirriego con Biol y Porcinaza, evidenciada en:

- Incrementos en MO, COOx y CICE.
- Elevaciones importantes de P, K, Ca, Mg y micronutrientes.
- Mantenimiento del pH en rangos apropiados.
- Ausencia de salinización crítica.
- El Testigo mostró una tendencia a la reducción de nutrientes y de su capacidad de intercambio.

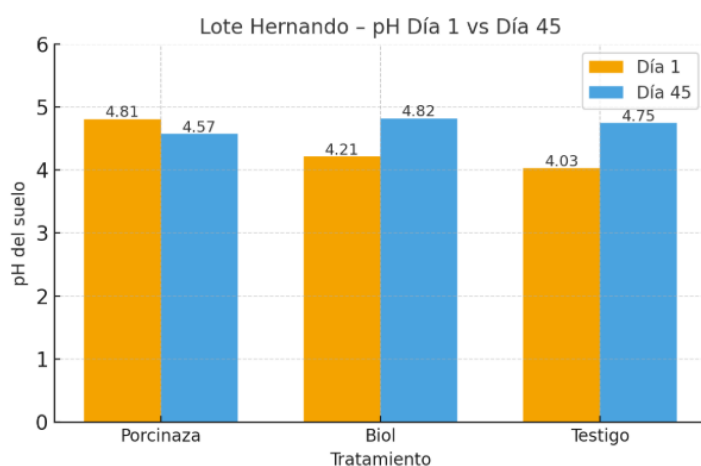
6.2.2. Cambios químicos en el Lote Hernando (Día 1 vs. Día 45)

El Lote Hernando, caracterizado inicialmente por su baja fertilidad, acidez fuerte y baja CICE, mostró un comportamiento diferente al del Lote Biodigestor. Las variaciones reflejan las limitaciones estructurales del suelo y la forma en que responde a los tratamientos.

- pH del suelo
- Porcinaza: disminuyó ligeramente (4.81 → 4.57).

- Biol: aumentó (4.21 → 4.82).
- Testigo: aumentó de 4.03 → 4.75.

Ilustración 19 grafico de barras lote Hernando PH día 1 vs día 45

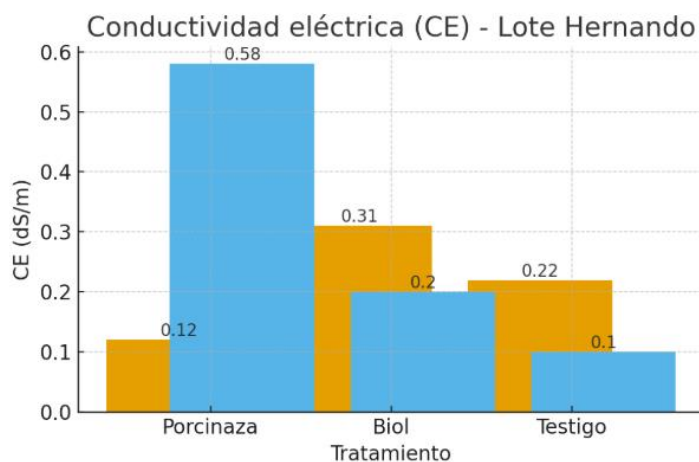


El incremento del pH en Biol y Testigo indica alivio de acidez, posiblemente por procesos de lavado o desaturación de protones.

Conductividad eléctrica (CE)

- Porcinaza: 0.12 → 0.58 dS/m (incremento moderado).
- Biol: 0.31 → 0.20 dS/m (disminución).
- Testigo: 0.22 → 0.10 dS/m (disminución).

Ilustración 20 Grafico de barras lote Hernando conductividad eléctrica (CE)



El aumento en Porcinaza sugiere incorporación de sales; las dos restantes mostraron reducción.

MO y COOx

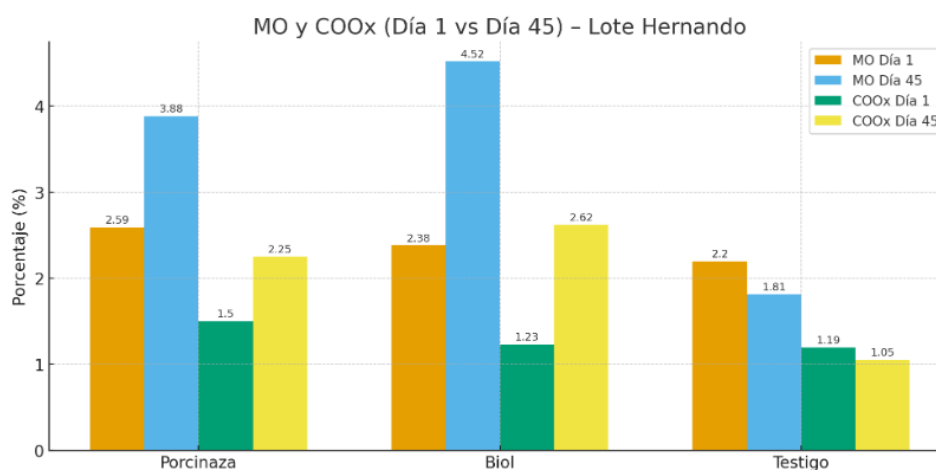
Hubo incrementos importantes en tratamientos:

- Porcinaza: MO 2.59 → 3.88%; COOx 1.50 → 2.25%.
- Biol: MO 2.38 → 4.52%; COOx 1.23 → 2.62%.
- Testigo: MO disminuyó (2.20 → 1.81%).

El incremento en tratamientos evidencia aportes orgánicos directos.

Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)

Ilustración 21 Grafico de barras, Lote Hernando, día 1 vs día 45



A diferencia del Lote Biodigestor, aquí se observaron reducciones:

- Porcinaza: 6.16 → 6.04.
- Biol: 6.54 → 5.40.
- Testigo: 5.93 → 3.30.

La CICE del lote mostró reducción general, reflejando las limitaciones inherentes del suelo franco-arcilloso ácido.

Macronutrientes (P, K, Ca, Mg)

Los incrementos fueron marcados en ciertos nutrientes:

- Fósforo (P):
- Porcinaza: 3.16 → 37.2 mg/kg
- Biol: 2.96 → 446 mg/kg

Testigo: estable (2.11 → 2.04 mg/kg)

Potasio (K):

- Porcinaza: 54.3 → 240 mg/kg
- Biol: 52.3 → 119 mg/kg
- Testigo: 51.3 → 41.5 mg/kg

Calcio (Ca):

- Porcinaza: 220 → 550 mg/kg
- Biol: 217 → 592 mg/kg
- Testigo: 243 → 179 mg/kg
-

Magnesio (Mg):

- Porcinaza: 47 → 144 mg/kg
- Biol: 44 → 129 mg/kg
- Testigo: 41 → 57 mg/kg

Micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Zn, B)

Fe: incrementos muy notorios con Porcinaza (550 → 2210 mg/kg)

Zn: 2.98 → 18.6 mg/kg con Porcinaza.

Mn: aumentó entre 20–40 mg/kg.

Cu: aumentó alrededor de 5 mg/kg con tratamientos.

B: aumentos ligeros.

Síntesis del Lote Hernando

El lote mostró recuperación parcial en algunos nutrientes (P, K, Ca, Mg).

La CICE disminuyó, indicando limitaciones estructurales del suelo.

El pH tuvo una tendencia favorable en Biol y Testigo.

Porcinaza produjo incrementos fuertes en Fe y K.

6.2.3. Comparación técnica entre lotes (Día 1 vs Día 45)

Ilustración 22 Grafico de barras Cambios químicos del suelo-Lote Biodigestor

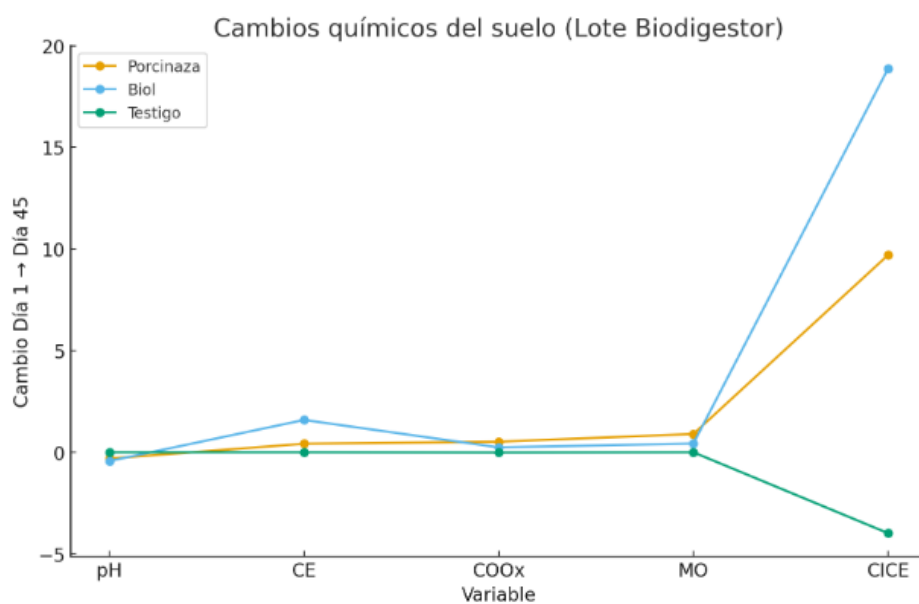
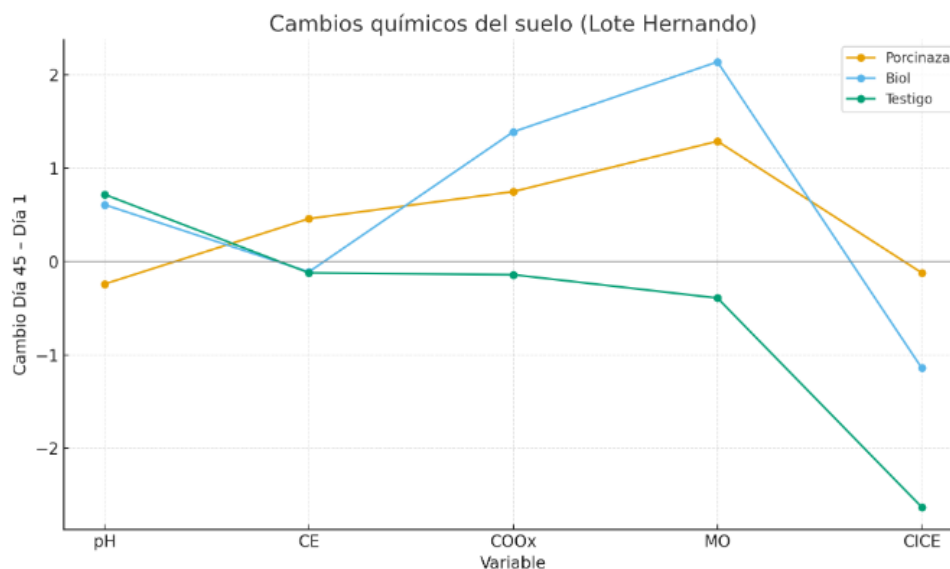


Ilustración 23 Cambios químicos del suelo-Lote Hernando



- Biodigestor respondió con incrementos amplios en fertilidad, mostrando mayor capacidad de retención y disponibilidad de nutrientes.
- Hernando mostró respuestas positivas, pero más limitadas por su acidez, baja CICE y menor capacidad amortiguadora.
- En ambos lotes, el Testigo reflejó tendencia al empobrecimiento.
- El Biol mostró efectos nutritivos más pronunciados en ambos ambientes como en respuesta productiva del pasto Estrella.

6.3. Comparación entre tratamientos

La evaluación comparativa entre los tratamientos aplicados (Biol, Porcinaza líquida y Testigo) permitió identificar los efectos diferenciales sobre las propiedades químicas del suelo entre el Día 1 y el Día 45. Dado que los dos lotes presentan condiciones edáficas contrastantes, la

comparación se realizó inicialmente dentro de cada lote y posteriormente se integraron patrones generales a nivel de tratamiento.

Los resultados muestran que los tratamientos a base de efluentes porcinos generaron cambios detectables en varios parámetros fisicoquímicos, aunque con magnitudes y direcciones distintas según el lote. Estos comportamientos se organizaron en torno a tres tipos de variables: (a) indicadores químicos generales del suelo (pH, CE, MO, COOx, CICE), (b) macronutrientes esenciales (N-NH₄⁺, P, K, Ca, Mg, S) y (c) micronutrientes disponibles (Fe, Mn, Cu, Zn, B).

Ilustración 24 Cantidad de nutrientes asimilables- Tratamiento Porcinaza en los 2 lotes (Día 45)

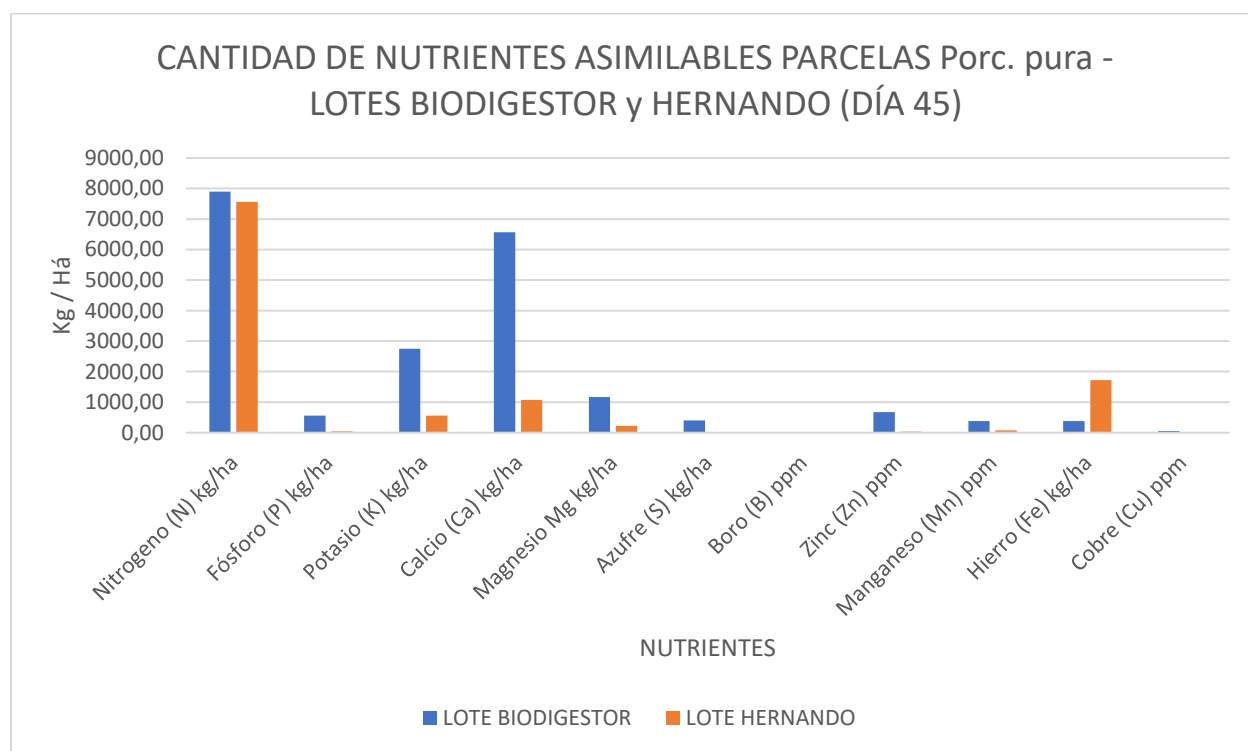


Ilustración 25 Cantidad de nutrientes asimilables- Tratamiento Biol en los 2 lotes Día 45

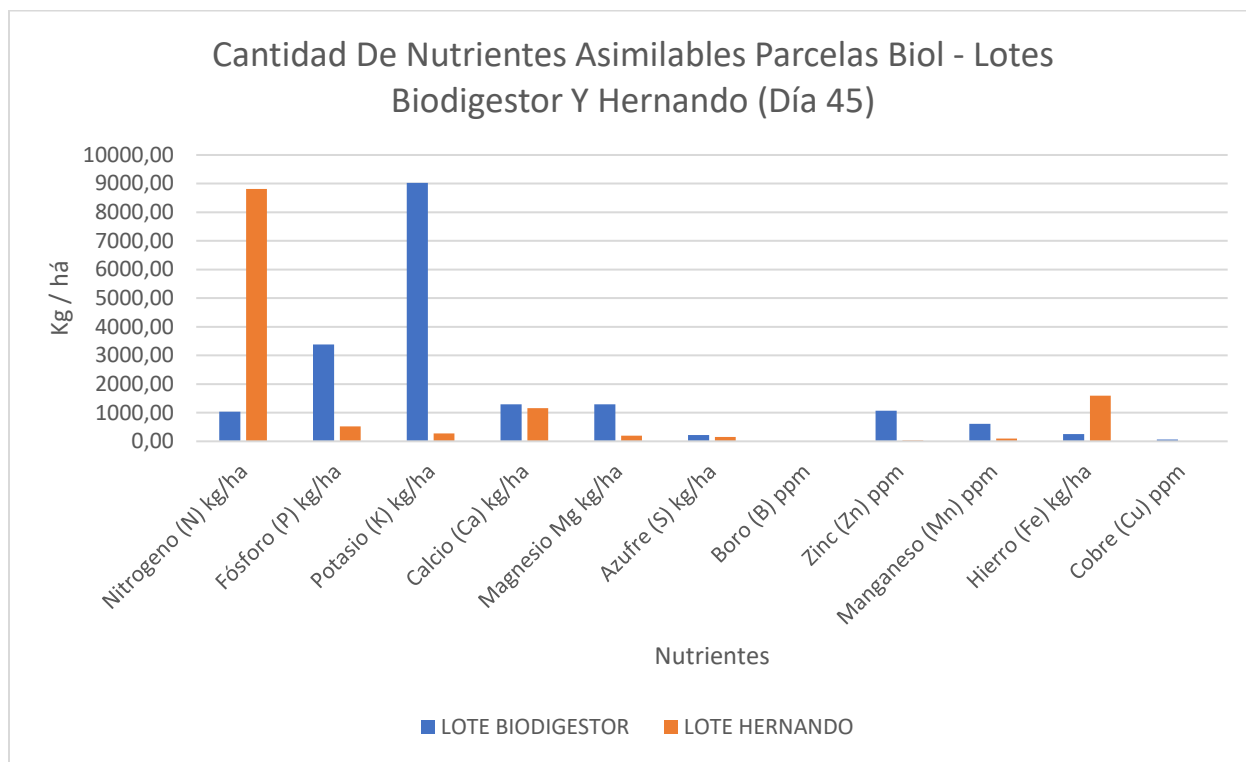
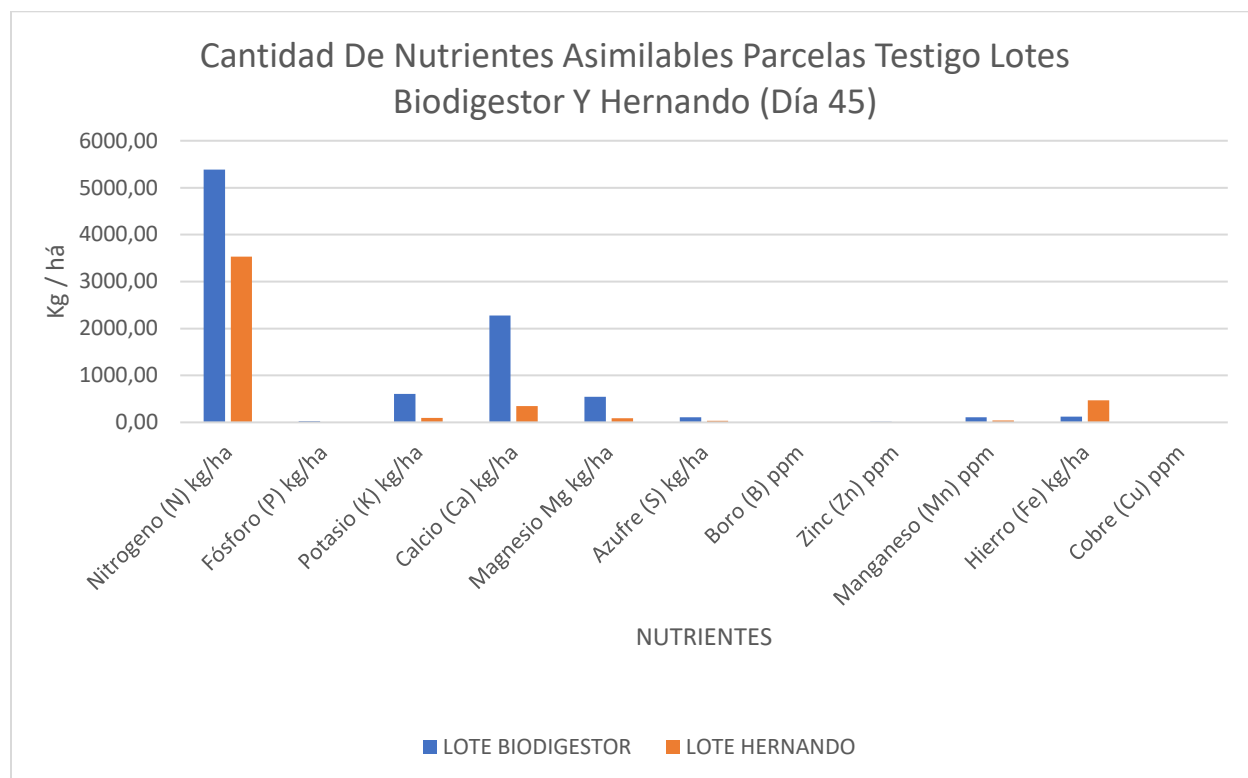


Ilustración 26 Cantidad de nutrientes asimilables- Tratamiento Testigo en los 2 lotes (Día 45)



6.3.1. Comparación de tratamientos en el Lote Biodigestor

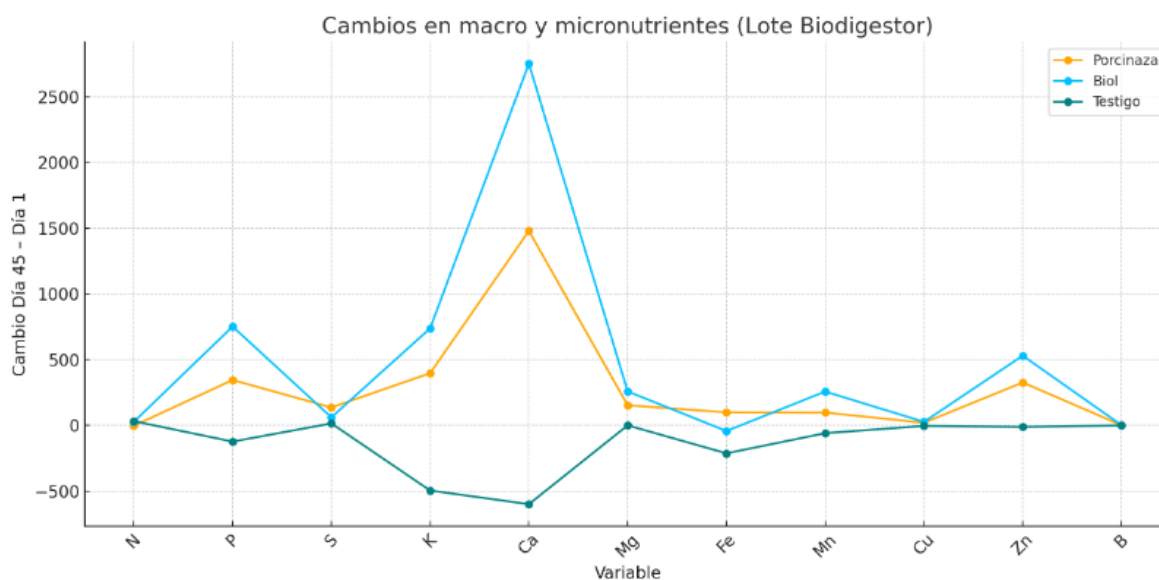
El Lote Biodigestor presentó variaciones marcadas entre tratamientos. En términos de indicadores químicos, la Porcinaza y el Biol modificaron el pH y la CE en mayor medida que el Testigo, reflejando el aporte directo de sales, bases intercambiables y compuestos orgánicos provenientes de los efluentes. Los tratamientos con efluentes también incrementaron la materia orgánica y el carbono oxidable, aunque en proporciones distintas, con mayor aumento asociado al Biol.

En relación con los macronutrientes, tanto la Porcinaza como el Biol evidenciaron aumentos sustanciales de P, K, Ca y Mg respecto al Testigo, lo que coincide con la fracción mineral y orgánica contenida en los efluentes. En particular, el tratamiento Biol mostró

incrementos más pronunciados en P y K al finalizar el ciclo, mientras que la Porcinaza reflejó mayor efecto sobre Ca y Mg, consistente con su composición química inicial.

En cuanto a micronutrientes, ambos tratamientos aumentaron los niveles de Zn, Mn y Cu en comparación con el Testigo, aunque con dinanismos distintos. El Biol produjo incrementos marcados en Zn y B, mientras que la Porcinaza mostró aumentos particularmente notorios en Mn y Cu. El Testigo, como era de esperar, mantuvo valores más estables entre el Día 1 y el Día 45.

Ilustración 27 Cambios macro y micronutrientes - Lote Biodigestor

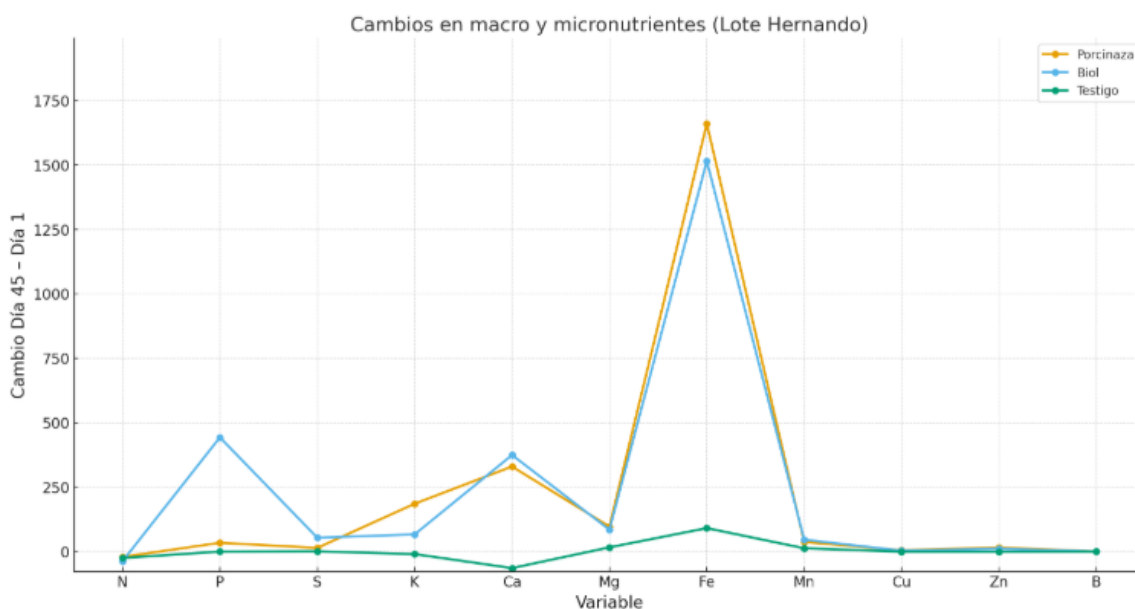


Estos comportamientos reflejan la capacidad de los tratamientos orgánicos para modificar la disponibilidad nutrimental en suelos previamente enriquecidos, como es el caso de este lote.

6.3.2. Comparación de tratamientos en el Lote Hernando

En el Lote Hernando, caracterizado por mayor acidez y menor contenido basal de nutrientes, las respuestas entre tratamientos fueron más contrastantes. En los indicadores generales del suelo, el Biol generó el mayor aumento en CE y MO, mientras que la Porcinaza mostró su influencia principalmente en el contenido de $N-NH_4^+$ y en el incremento de Ca y Mg. El Testigo nuevamente reflejó una dinámica más estable, típica de suelos con baja fertilidad inicial.

Ilustración 28 Cambios en micro y macronutrientes- Lote Hernando



Los macronutrientes evidenciaron diferencias notables: mientras que el Testigo mantuvo valores bajos en P y K, el Biol produjo incrementos significativos de ambos nutrientes en el Día 45, lo que resultó especialmente relevante dado el déficit inicial del lote. La Porcinaza, por su parte, mostró mayor contribución al Ca y Mg, coherente con su composición.

En los micronutrientes, el Biol generó aumentos pronunciados en Zn y Mn, mientras que la Porcinaza elevó más intensamente el Cu y Fe. El comportamiento del hierro fue particularmente marcado, dada la afinidad de este elemento por suelos de pH bajo.

6.3.3. Síntesis comparativa general entre tratamientos

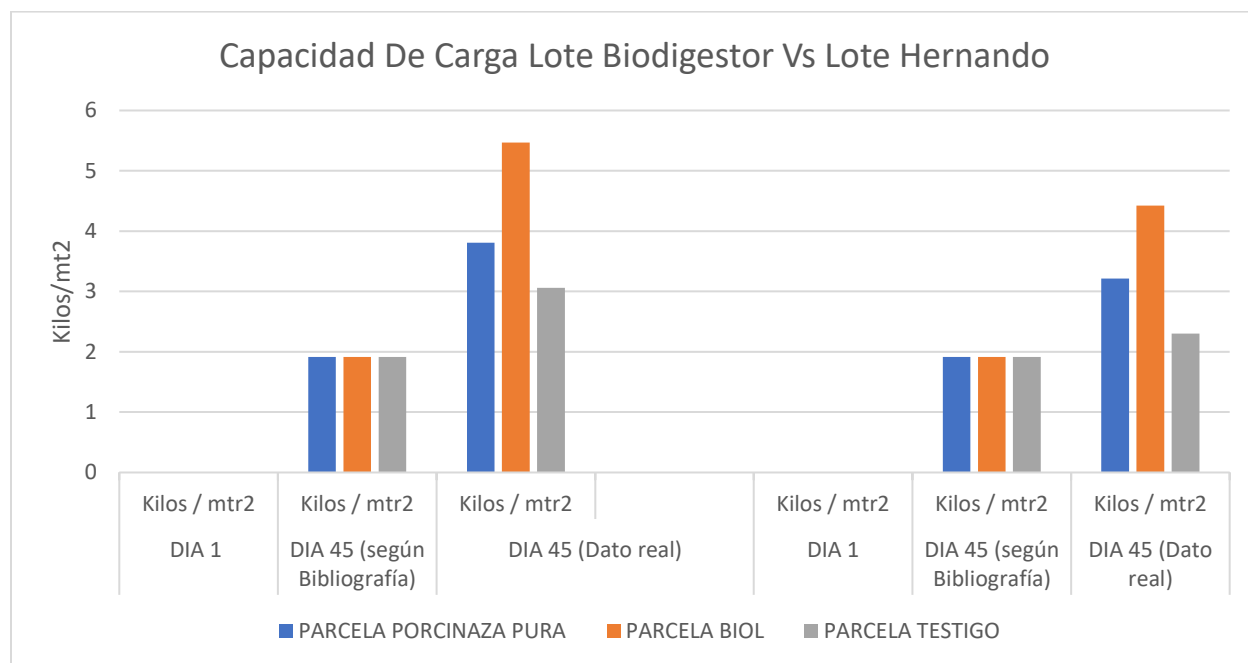
La comparación entre tratamientos en ambos lotes revela tres patrones consistentes:

- Los efluentes (Biol y Porcinaza) modificaron la química del suelo en mayor magnitud que el Testigo, tanto en indicadores generales como en macro y micronutrientes.
- El Biol mostró mayor influencia sobre nutrientes móviles como P, K, Zn y B, lo cual coincide con su composición altamente mineral y su baja carga orgánica insoluble.
- La Porcinaza líquida tuvo un impacto mayor sobre Ca, Mg, N-NH₄⁺, Mn y Cu, reflejando el aporte orgánico y la fracción mineral asociada a bases intercambiables.
- El Testigo mantuvo valores más estables, lo que facilita interpretar los cambios observados como resultado directo de los tratamientos aplicados.

Estos patrones constituyen la base para los análisis multivariados posteriores (PCoA y CCA), donde se integran todas las variables químicas para identificar la estructura global del comportamiento de los tratamientos.

6.4. Capacidad de carga y productividad del forraje

Ilustración 29 Capacidad de Carga en Kilos/mt²- Lote Biodigestor Vs Lote Hernando (Día 45 según muestra y bibliografía)



La estimación de la capacidad de carga y la productividad del forraje permitió evaluar el desempeño agronómico del pasto Estrella africana al finalizar el ciclo experimental de 45 días. Los valores de biomasa fresca obtenidos en campo reflejan la productividad real alcanzada por cada tratamiento y lote, mientras que los valores de referencia bibliográfica representan una productividad estándar esperada para praderas tropicales bajo condiciones óptimas de disponibilidad de nutrientes, como se muestra en la tabla 9. La integración de ambas fuentes facilita contextualizar la respuesta del pasto frente a los efluentes aplicados.

Tabla 8 Productividad de biomasa fresca (kg/m²) a los 45 días por lote y tratamiento

Lote y Tratamiento	Día 45 (Referencia bibliográfica)	Día 45 (Dato real)
Lote Biodigestor		
Porcinaza líquida	1.915	3.807
Biol	1.915	5.469
Testigo	1.915	3.061
Lote Hernando		
Porcinaza líquida	1.915	3.214
Biol	1.915	4.426
Testigo	1.915	2.304

Nota. La biomasa fresca corresponde a la producción obtenida en un cuadrante de 1 m² cosechado al Día 45. Los valores de referencia bibliográfica para un ciclo equivalente (\approx 45 días) se basan en valores promedio reportados para praderas tropicales de *Cynodon spp.* bajo manejo convencional. Elaboración propia según registro de campo del estudio.

6.4.1. Productividad del forraje en el Lote Biodigestor

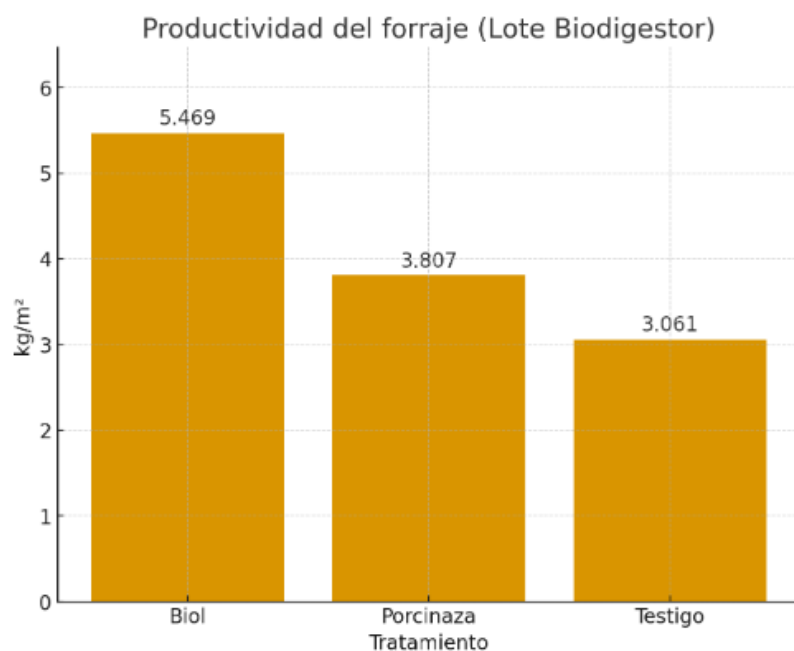
Tabla 9 Parámetros bromatológicos del forraje en el Lote Biodigestor

Muestra	MS (%)	FC (%)	FDA (%)	FDN (%)	PC (%)
Día 7 – Porcinaza	16.48	44.40	56.80	54.85	11.60
Día 7 – Biol	16.96	44.12	56.48	54.23	11.68
Día 7 – Testigo	16.22	43.99	56.02	53.98	11.39
Día 14 – Porcinaza	17.88	27.65	32.66	55.21	11.34
Día 14 – Biol	18.67	27.54	32.47	54.02	11.09
Día 14 – Testigo	17.54	27.77	31.88	55.01	11.22
Día 21 – Porcinaza	20.31	30.36	35.42	54.99	10.99
Día 21 – Biol	20.97	29.77	35.23	54.11	10.69
Día 21 – Testigo	20.11	29.94	35.12	54.19	10.83
Día 28 – Porcinaza	20.87	33.89	36.56	57.89	12.98
Día 28 – Biol	21.98	33.45	36.74	56.84	12.03
Día 28 – Testigo	20.47	32.87	37.02	57.24	12.11
Día 35 – Porcinaza	22.13	36.33	39.28	57.01	12.61
Día 35 – Biol	22.86	36.74	39.08	57.05	12.08
Día 35 – Testigo	22.01	33.46	39.01	57.96	12.22
Día 42 – Porcinaza	23.74	40.20	40.39	58.03	11.30
Día 42 – Biol	24.31	40.60	40.21	57.12	11.87
Día 42 – Testigo	23.66	40.20	40.33	57.99	11.02

Nota Los valores corresponden a los parámetros bromatológicos del pasto *Estrella africana* (*Cynodon nlemfuensis*) en el Lote Biodigestor, evaluados a lo largo del ciclo de 45 días bajo tres tratamientos: Porcinaza líquida, Biol y Testigo. Las variables incluyen materia seca (MS), fibra cruda (FC), fibra detergente ácido (FDA), fibra detergente neutro (FDN) y proteína cruda (PC).

El Lote Biodigestor mostró valores de productividad superiores a los de referencia en todos los tratamientos. Esto sugiere que las condiciones edáficas iniciales —caracterizadas por mayores niveles de materia orgánica, CICE y macronutrientes— favorecieron el crecimiento del pasto durante el ciclo de 45 días.

Ilustración 30 Cambios en las fracciones nutricionales del forraje bajo tres tratamientos (Lote Biodigestor)



El tratamiento con Biol alcanzó la mayor biomasa fresca (5.469 kg/m²), superando ampliamente tanto al testigo como al tratamiento con porcinaza líquida. Esta respuesta se enmarca en el aporte de micronutrientes y fracción mineral soluble característico del biol, cuya disponibilidad temprana puede haber estimulado el crecimiento inicial del rebrote.

La porcinaza líquida registró 3.807 kg/m², un valor superior al testigo (3.061 kg/m²), lo cual indica que aun una única aplicación ejerce un efecto positivo sobre la disponibilidad de N, P y K, reflejándose en crecimiento adicional durante el ciclo.

En este lote, la diferencia entre tratamientos se observa de forma clara, con un gradiente productivo donde Biol > Porcinaza > Testigo.

6.4.2. Productividad del forraje en el Lote Hernando

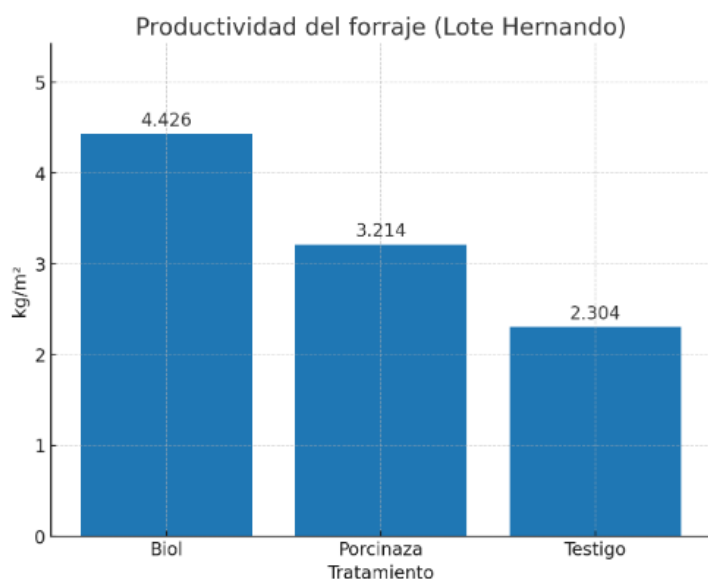
Tabla 10 Tabla bromatológica – Lote Hernando

Muestra	MS	FC	FDA	FDN	PC
Dia7_Porcinaza	15.92	45.10	57.21	55.62	10.94
Dia7_Biol	16.11	44.86	56.88	55.01	11.02
Dia7_Testigo	15.73	44.70	56.31	54.66	10.81
Dia14_Porcinaza	16.83	28.66	33.10	56.08	10.72
Dia14_Biol	17.54	28.35	32.87	55.02	10.43
Dia14_Testigo	16.48	28.51	32.41	55.51	10.55
Dia21_Porcinaza	18.22	31.22	35.80	55.34	10.33
Dia21_Biol	18.99	30.74	35.51	54.62	10.12
Dia21_Testigo	17.93	30.98	35.39	54.97	10.19
Dia28_Porcinaza	19.44	34.88	37.14	58.23	11.84
Dia28_Biol	20.12	34.55	37.11	57.01	11.32
Dia28_Testigo	19.21	34.02	37.51	57.46	11.48
Dia35_Porcinaza	20.76	37.45	39.42	58.14	11.50
Dia35_Biol	21.33	38.11	39.31	57.98	11.22
Dia35_Testigo	20.66	35.22	39.28	58.63	11.39
Dia42_Porcinaza	22.18	41.02	40.70	58.77	10.47
Dia42_Biol	22.74	41.55	40.61	57.92	11.11
Dia42_Testigo	22.03	41.11	40.68	58.54	10.29

El Lote Hernando, caracterizado por suelos ácidos, bajos en CICE y con contenidos marcadamente inferiores de P, K, Ca y Mg, presentó valores menores de biomasa respecto al Lote Biodigestor. Sin embargo, también mostró respuestas diferenciales entre tratamientos.

El tratamiento con Biol fue nuevamente el de mayor producción (4.426 kg/m²), seguido por la porcínaza líquida (3.214 kg/m²), mientras que el testigo registró la menor biomasa (2.304 kg/m²).

Ilustración 31 Productividad del forraje en el Lote Hernando



Aunque los valores absolutos fueron más bajos que en el Lote Biodigestor, la tendencia relativa se mantuvo: los tratamientos orgánicos incrementaron la producción respecto al control. Esto sugiere que, incluso bajo condiciones edáficas limitantes, los aportes de nutrientes — especialmente cuando incluyen fracciones solubles como las presentes en el Biol— tienen la capacidad de estimular la productividad del cultivo.

6.4.3. Síntesis descriptiva entre lotes

Considerando los resultados de ambos lotes, se identifican patrones recurrentes:

- En todos los casos, el Biol presentó la mayor productividad del forraje.
- La porcinaza líquida ocupó una posición intermedia.
- El tstigo mantuvo los valores más bajos en ambos lotes.
- Las diferencias absolutas fueron mayores en el Lote Biodigestor, coherentes con su mayor fertilidad basal.
- En el Lote Hernando, la respuesta relativa a los tratamientos fue más evidente debido a su baja disponibilidad natural de nutrientes.

Estos resultados permiten visualizar que tanto las condiciones intrínsecas del suelo como el tipo de efluente aplicado influyeron en la productividad alcanzada al final del ciclo.

6.5. Crecimiento del pasto: altura semanal y tasa de crecimiento

La dinámica de crecimiento del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) durante los 45 días del ensayo evidenció patrones diferenciados entre lotes y tratamientos, asociados tanto a la fertilidad inicial del suelo como al efecto de los efluentes aplicados. El seguimiento semanal permitió caracterizar la velocidad de crecimiento, la expresión morfológica del rebrote y la acumulación de biomasa en cada parcela.

Ilustración 32 Distribución de porcina lote Hernando



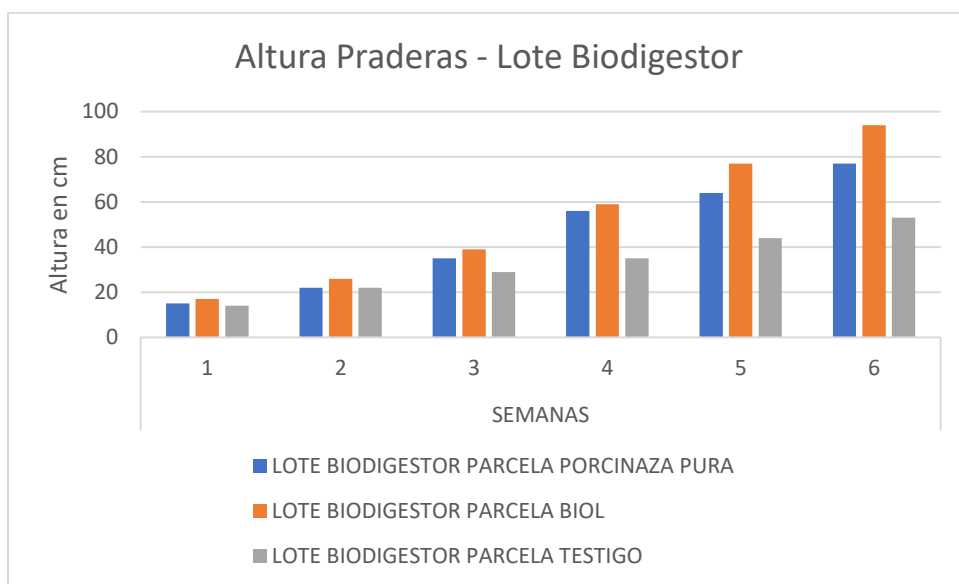
Tabla 11 Promedio semanal de altura del pasto, altura final y crecimiento promedio en los lotes Biodigestor y Hernando (Día 1–Día 45)

Lote	Tratamiento	Sema na 1 (\bar{x})	Sema na 2 (\bar{x})	Sema na 3 (\bar{x})	Sema na 4 (\bar{x})	Sema na 5 (\bar{x})	Sema na 6 (\bar{x})	Altura final (cm)	Crecimiento promedio (cm/sem)
Biodi- gestor	Porcina	17.83	22.33	33.60	56.27	69.80	77.00	45.02	15
	Biol	16.00	26.33	39.20	59.00	79.20	94.00	52.06	19
	Testigo	13.50	22.00	29.50	36.50	44.00	53.00	32.99	11
Herna n-do	Porcina	12.83	21.00	27.83	34.17	41.50	52.00	31.52	10
	Biol	13.00	22.00	31.50	36.00	48.67	56.00	34.09	11
	Testigo	11.83	20.00	27.00	34.17	42.17	50.00	30.70	10

Nota. Los valores representan los promedios semanales obtenidos a partir de todas las mediciones registradas en cada parcela. La altura final corresponde al promedio general del Día 45 reportado por AGRILAB y las mediciones de campo.

6.5.1. Comportamiento del crecimiento en el Lote Biodigestor

Ilustración 33 Altura de pasto al transcurrir el tiempo con cada uno de los tratamientos



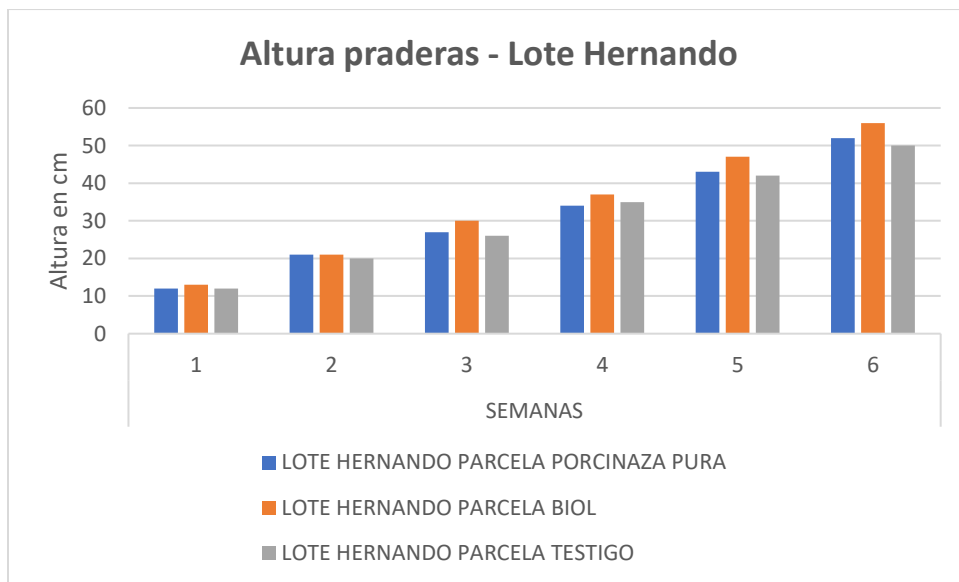
En el Lote Biodigestor, caracterizado por mayores niveles de fertilidad inicial, el crecimiento del pasto mostró una progresión continua y acelerada desde la primera semana.

- **Tratamiento Biol:** registró el crecimiento más alto durante todo el ciclo.
 - Pasó de 16.00 cm en la semana 1 a 94.00 cm en la semana 6, mostrando una curva ascendente sostenida.
 - Alcanzó un promedio de 52.06 cm al Día 45, con una tasa semanal de 19 cm, la mayor entre todos los tratamientos evaluados.
- **Tratamiento Porcinaza líquida:** presentó también un crecimiento vigoroso.
 - Inició con 17.83 cm y llegó a 77.00 cm en la semana 6.
 - La altura final fue de 45.02 cm, con una tasa de crecimiento semanal de 15 cm.
- **Testigo:** mostró el crecimiento más lento dentro del lote.

- Evolucionó desde 13.50 cm a 53.00 cm en seis semanas.
- Su altura final fue 32.99 cm, con una tasa semanal de 11 cm.

El comportamiento general indica que, bajo una base edáfica relativamente fértil, la aplicación de efluentes orgánicos favoreció significativamente la elongación foliar, especialmente con el uso de biol, cuya mineralización rápida pudo haber acelerado la disponibilidad inmediata de nutrientes clave como N, K y Mg.

6.5.2. Comportamiento del crecimiento en el Lote Hernando



A diferencia del Biodigestor, el Lote Hernando inició el ciclo con condiciones químicas menos favorables, especialmente en pH, P, K, Ca y Mg, lo que se reflejó en un crecimiento más moderado.

Ilustración 34 lote Hernando día 45



- **Tratamiento Biol:** fue el de mejor desempeño dentro del lote.
 - Pasó de 13.00 cm en la semana 1 a 56.00 cm en la semana 6.
 - La altura final alcanzó 34.09 cm, con una tasa semanal de 11 cm.
- **Tratamiento Porcinaza líquida:** mostró una respuesta estable.
 - Creció de 12.83 cm a 52.00 cm.
 - Obtuvo una altura final de 31.52 cm y una tasa de 10 cm por semana.
- **Testigo:** mantuvo los valores más bajos.
 - Aumentó desde 11.83 cm a 50.00 cm.
 - La altura final fue de 30.70 cm, con 10 cm por semana.

El crecimiento más moderado observado en este lote se asocia a la menor capacidad de intercambio catiónico y baja disponibilidad de macronutrientes esenciales, condiciones que limitan el potencial fisiológico del pasto a pesar de los tratamientos aplicados. No obstante, el

biol demostró capacidad de mejorar la respuesta productiva en ambientes edáficamente limitantes.

6.5.3. Síntesis comparativa entre lotes

La comparación entre ambos lotes permite identificar dos tendencias claras:

- Mayor crecimiento en el Lote Biodigestor, donde tanto biol como porcinaza potenciaron significativamente la expansión foliar frente al testigo.
- Diferencias moderadas pero consistentes en el Lote Hernando, donde la fertilidad basal más baja redujo la amplitud de respuesta, aunque los tratamientos orgánicos mantuvieron ventaja respecto al control.
- El Biol fue el tratamiento de mejor desempeño en ambos lotes, con:
 - Altura final más elevada,
 - Mayor velocidad semanal,
 - Mayor coherencia en la progresión del crecimiento.

6.6. Análisis multivariado del suelo, forraje y productividad (PCoA, CCA y PCA)

La presente sección expone los resultados obtenidos a partir del análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo y de los indicadores productivos y bromatológicos del pasto *Cynodon nlemfuensis* durante el ciclo experimental de 45 días. Los hallazgos se estructuran a partir de un enfoque multivariado, que permite evaluar simultáneamente la respuesta del suelo y del forraje frente a los tratamientos de fertirriego (Biol, Porcinaza y Testigo) en dos lotes con historial de manejo contrastante. Se presentan inicialmente las correlaciones exploratorias entre variables edáficas como punto de partida para la interpretación de los patrones de covariación.

Posteriormente, se incluyen los análisis multivariados (PCoA, CCA y PCA), los cuales permiten identificar gradientes de fertilidad, calidad bromatológica, productividad y efectos diferenciales del tratamiento y del lote sobre la dinámica del sistema suelo–planta. Esta organización facilita una lectura integral de los resultados y permite determinar si los tratamientos evaluados generaron cambios significativos en la salud del suelo y en la productividad del pasto, tal como lo plantean los objetivos de la investigación.

6.6.1 Análisis exploratorio de correlación entre variables del suelo (Spearman)

Antes de aplicar los métodos multivariados, se realizó un análisis exploratorio de las asociaciones entre las variables fisicoquímicas del suelo mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Este análisis preliminar formó parte de la construcción del PCoA, el cual permitió identificar patrones iniciales de covariación entre los nutrientes y propiedades edáficas evaluadas en los dos lotes y bajo los tres tratamientos.

La matriz de correlación mostró agrupamientos definidos entre variables relacionadas con la fertilidad estructural del suelo. Se observaron correlaciones positivas fuertes entre la capacidad de intercambio catiónico (CICE) y los cationes intercambiables (Ca, Mg y K), lo que refleja su comportamiento conjunto frente a la disponibilidad de nutrientes y las dinámicas de retención del suelo. Asimismo, micronutrientes como Fe, Mn, Cu y Zn presentaron correlaciones altas entre sí, evidenciando respuestas similares a los procesos de acidez, mineralización y solubilidad.

Este análisis exploratorio permitió anticipar tendencias que posteriormente se confirmaron en los métodos multivariados. Aunque Spearman describe relaciones monotónicas,

su utilidad radica en destacar qué variables presentan comportamientos paralelos y cuáles podrían estar asociadas a los efectos del manejo diferencial de los lotes y a los tratamientos de fertirriego.

En el caso del el PCoA se construyó a partir de matrices de distancia 1-spearman, calculando primero la matriz de correlación spearman; tomando los datos y convirtiéndolos a rangos. Esta técnica descompone la matriz de distancias en valores propios (eigenvalues), los cuales indican la proporción de variación explicada por cada eje; así, los ejes PCoA1, PCoA2 y los subsecuentes constituyen gradientes sintéticos que no corresponden a las variables originales, sino a combinaciones multivariadas que reflejan la estructura interna de los datos.

En este estudio se aplicaron PCoA para:

- PCoA del suelo en función del Día (1 y 45) y los tres tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo) - Lote Biodigestor
- PCoA del suelo en función del Día (1 y 45) y los tres tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo) - Lote Hernando
- PCoA del suelo en función de los días, lotes y tratamientos (Lotes Biodigestor y Hernando)
- PCoA de la calidad bromatológica del forraje – Lote Biodigestor
- PCoA de la calidad bromatológica del forraje – Lote Hernando
- PCoA Análisis Multivariado Suelo–Crecimiento mediante

Para el CCA, las asociaciones se modelaron a partir de la relación directa entre las propiedades químicas del suelo y las variables ambientales (Lote, Día y Tratamiento).

En este estudio se aplicó CCA para:

- . CCA del suelo en función del Lote, Día y Tratamiento

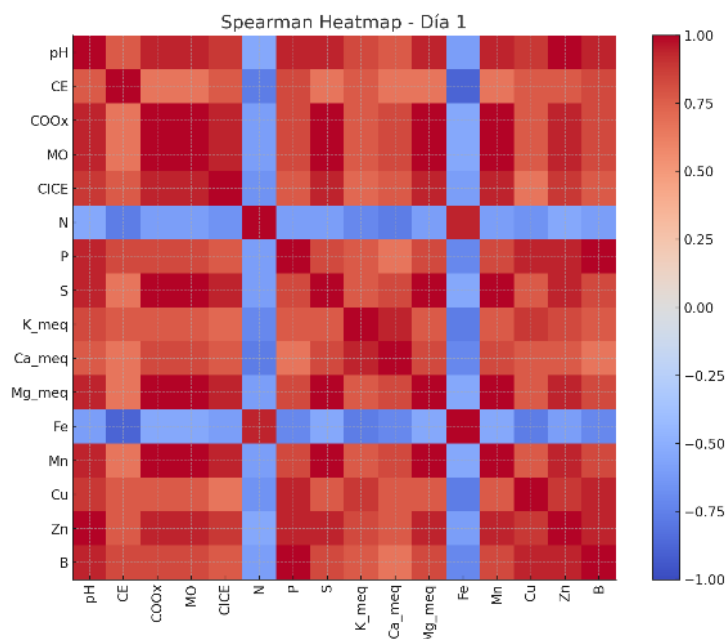
Finalmente, el PCA, la interpretación de los componentes principales se basó en la matriz de correlación de Pearson estandarizada, apropiada para evaluar patrones de covariación general entre variables de magnitudes diferentes

En este estudio se aplicó PCA para:

- (PCA) del Crecimiento del Pasto Estrella Africana, Día 1 y Día 45 en relación con las propiedades fisicoquímicas del suelo.

En este contexto, el análisis de Spearman cumple una función descriptiva que complementa y fortalece la interpretación de los análisis multivariados, al ofrecer una visión preliminar de la estructura interna de las relaciones edáficas antes de la evaluación de gradientes y patrones complejos mediante PCoA, CCA y PCA.

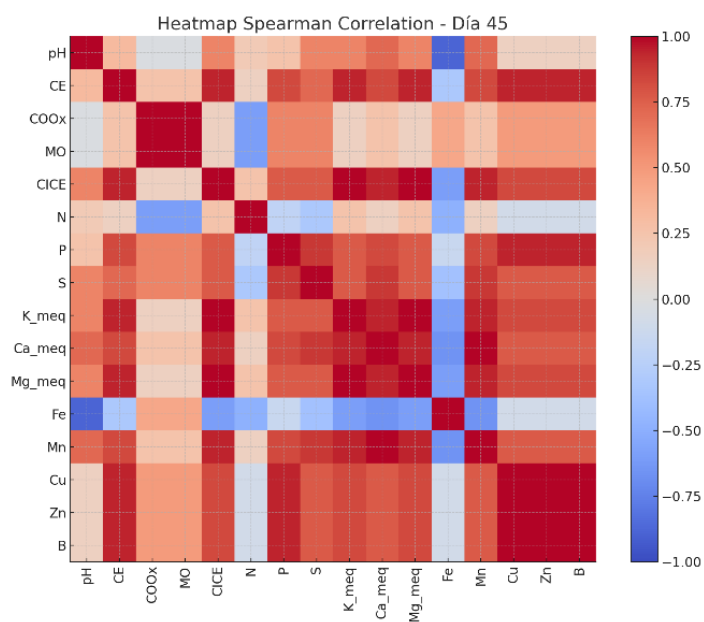
Ilustración 35 de correlación entre variables del suelo (Spearman) Día 1



***Nota:** Mapa de calor de correlaciones Spearman para las variables fisicoquímicas del suelo en el Día 1. El gráfico muestra la intensidad y dirección de las correlaciones monotónicas entre variables químicas del suelo en las seis parcelas evaluadas (tres del Lote Biodigestor y tres del Lote Hernando). Los valores positivos fuertes se representan en azul oscuro y los negativos en rojo. Elaborado con PAST v4.03.*

El mapa de calor correspondiente al Día 1 evidencia diferencias iniciales en la magnitud de las propiedades fisicoquímicas del suelo entre los tratamientos y los dos lotes. Las muestras del Lote Biodigestor presentan mayores intensidades en variables como Ca, Mg, Fe y Mn en comparación con el Lote Hernando. Las parcelas Testigo muestran valores más bajos en la mayoría de nutrientes, mientras que Porcinaza y Biol concentran las mayores intensidades en los elementos intercambiables y micronutrientes. La variación observada refleja la distribución inicial de nutrientes antes del periodo completo de fertirriego.

Ilustración 36 de correlación entre variables del suelo (Spearman) Día 45

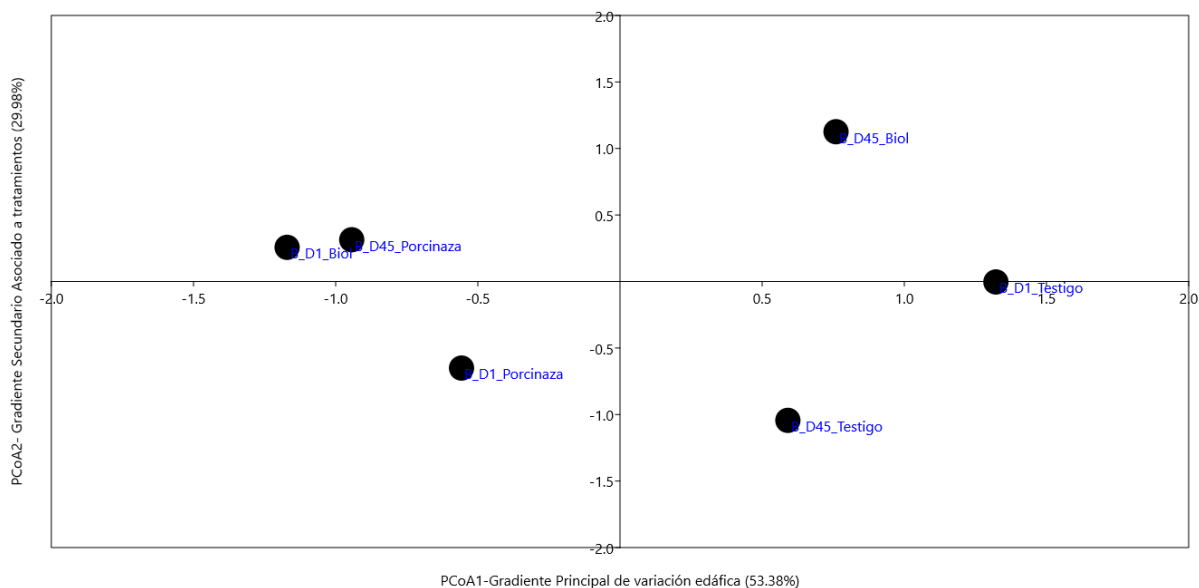


Nota: Matriz de correlación de Spearman entre variables fisicoquímicas del suelo para el Día 45. El mapa de calor muestra correlaciones monotónicas entre pH, CE, materia orgánica, CICE, macronutrientes y micronutrientes en las seis parcelas evaluadas. Elaboración propia.

El mapa de calor del Día 45 muestra diferencias claras en la magnitud de las propiedades químicas del suelo entre tratamientos y lotes. Las parcelas tratadas con Porcinaza y Biol presentan los valores más altos en variables como Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y MO, mientras que el Testigo mantiene los valores más bajos. También se observa una mayor intensidad en CICE y en los nutrientes expresados en mg/kg con respecto al Día 1 para la mayoría de las muestras del Lote Biodigestor y algunas del Lote Hernando. En conjunto, los patrones visuales evidencian una variación marcada en la composición química del suelo al finalizar el periodo de fertirriego

6.6.2. PCoA del suelo en función del Día (1 y 45) y los tres tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo) - Lote Biodigestor

Ilustración 11 PCoA- Suelos Día 1 Y Día 45, Lote Biodigestor



Nota: Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) del suelo en el Lote Biodigestor para los días 1 y 45, construido a partir de una matriz de disimilitud $1-\rho$ derivada de la correlación de Spearman entre variables fisicoquímicas. El eje PCoA1 (53.38 %) representa el gradiente principal de variación edáfica asociado a los cambios temporales entre Día 1 y Día 45, mientras que el PCoA2 (29.98 %) refleja diferencias secundarias vinculadas a los tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo).

El Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) evidenció una separación marcada entre los muestreos del Día 1 y Día 45 en el Lote Biodigestor. El eje PCoA1, que explica el 53.38 % de la variación total, distinguió principalmente los cambios edáficos asociados al tiempo de muestreo. En este eje, las muestras del Día 45 tendieron a ubicarse hacia valores positivos (especialmente Biol y Testigo), mientras que las muestras del Día 1 se concentraron hacia valores

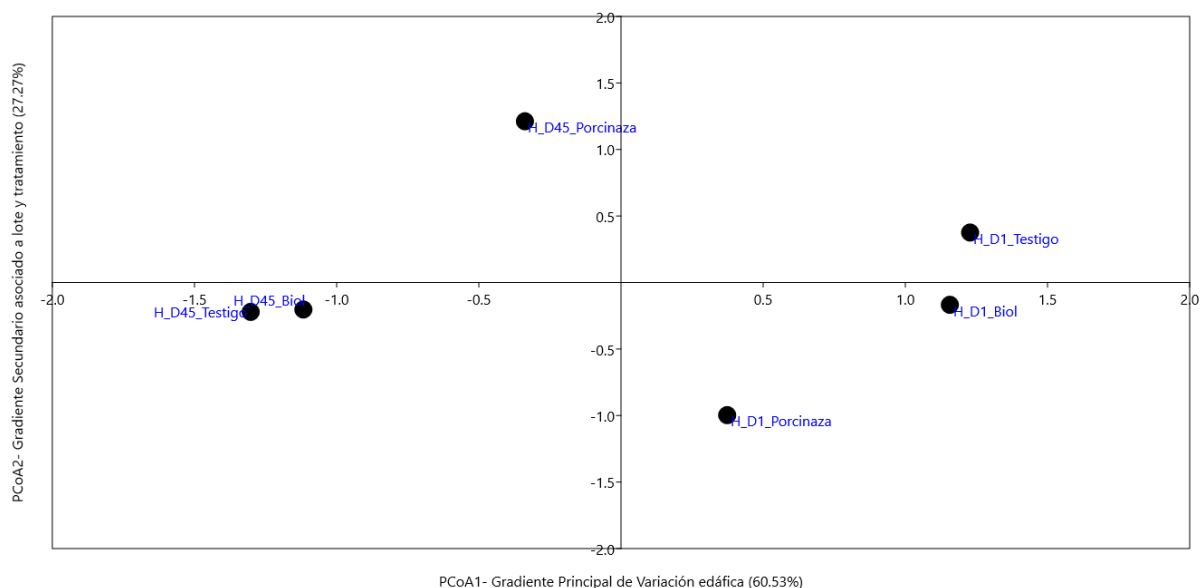
negativos, indicando una modificación sustancial en las propiedades del suelo tras la aplicación de los tratamientos y el paso del tiempo.

Por su parte, el PCoA2, que representa el 29.98 % de la variabilidad, diferenció las parcelas según el tipo de tratamiento. En este eje se observó que, en ambos días, las parcelas Biol, Porcinaza y Testigo mantuvieron posiciones relativamente consistentes entre sí, reflejando patrones específicos asociados a cada tratamiento. Las muestras B_D45_Biol y B_D45_Testigo presentaron la mayor separación en PCoA2, lo que sugiere que la respuesta del suelo a estos tratamientos fue más contrastante hacia el Día 45.

En conjunto, los dos primeros ejes explicaron más del 83 % de la variación, mostrando que la estructura multivariada del suelo en este lote estuvo determinada principalmente por los cambios temporales (Día 1 vs. Día 45) y, en segundo lugar, por las diferencias entre tratamientos.

6.6.3. PCoA del suelo en función del Día (1 y 45) y los tres tratamientos (Biol, Porcinaza y Testigo) - Lote Hernando

Ilustración 12 PCoA- Suelos Día 1 Y Día 45, Lote Hernando



Nota: Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) global del suelo para los lotes Biodigestor y Hernando en los días 1 y 45. La matriz de disimilitud se construyó a partir de $1 - \rho$ (correlación de Spearman). El eje PCoA1 explica el 60.53 % de la variación total y refleja el gradiente principal de cambio edáfico entre días y lotes, mientras que el eje PCoA2 aporta el 27.27 % y distingue principalmente los tratamientos Porcinaza, Biol y Testigo.

El Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) basado en la matriz de disimilitud $1 - \rho$ (Spearman) permitió identificar los principales gradientes de variación edáfica entre los tratamientos Porcinaza, Biol y Testigo durante el ciclo experimental.

El eje PCoA1 explicó el 53.38 % de la variación total y representó el gradiente principal asociado a los cambios edáficos entre los días de muestreo. En este eje se observó una separación clara entre las muestras del Día 1 y las del Día 45, reflejando modificaciones globales en la composición química del suelo tras la aplicación de los tratamientos. Las muestras del Día 45 tendieron a desplazarse hacia valores positivos del eje, mientras que las del Día 1 permanecieron hacia valores negativos.

El eje PCoA2 explicó el 29.98 % adicional de la variación y capturó principalmente la diferenciación entre tratamientos dentro del lote, destacando contrastes entre Porcinaza, Biol y Testigo tanto en el Día 1 como en el Día 45.

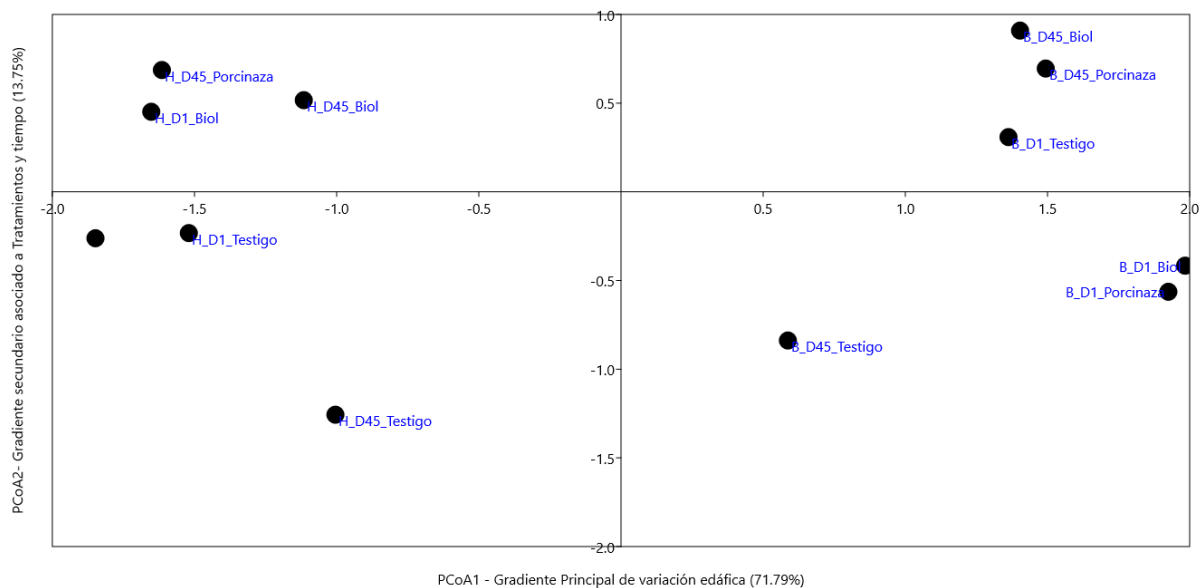
En el plano bidimensional:

- B_D45_Biol se ubicó en la parte superior derecha, indicando un patrón edáfico diferenciado y mayor disimilitud respecto a los demás tratamientos al final del ciclo.
- B_D45_Porcinaza y B_D45_Testigo mostraron posiciones más dispersas entre sí, reflejando respuestas edáficas contrastantes en el Día 45.
- B_D1_Biol, B_D1_Porcinaza y B_D1_Testigo se agruparon en el cuadrante inferior izquierdo, evidenciando mayor semejanza multivariada en las condiciones iniciales.
- B_D1_Testigo mostró la posición más extrema entre las muestras del Día 1, aunque manteniendo proximidad relativa al resto del grupo inicial.

En conjunto, el PCoA evidenció que en el Lote Biodigestor los cambios edáficos entre el Día 1 y el Día 45 fueron más marcados que las diferencias entre tratamientos, aunque Biol y Porcinaza presentaron contrastes definidos a lo largo del gradiente principal y secundario. Asimismo, el movimiento de las muestras hacia el Día 45 sugiere una reorganización química importante derivada de la aplicación de los efluentes.

6.6.4. PCoA del suelo en función de los días, lotes y tratamientos (Lotes Biodigestor y Hernando)

Ilustración 12 PCoA- Suelos Día 1 Y Día 45, Lotes Biodigestor Y Hernando



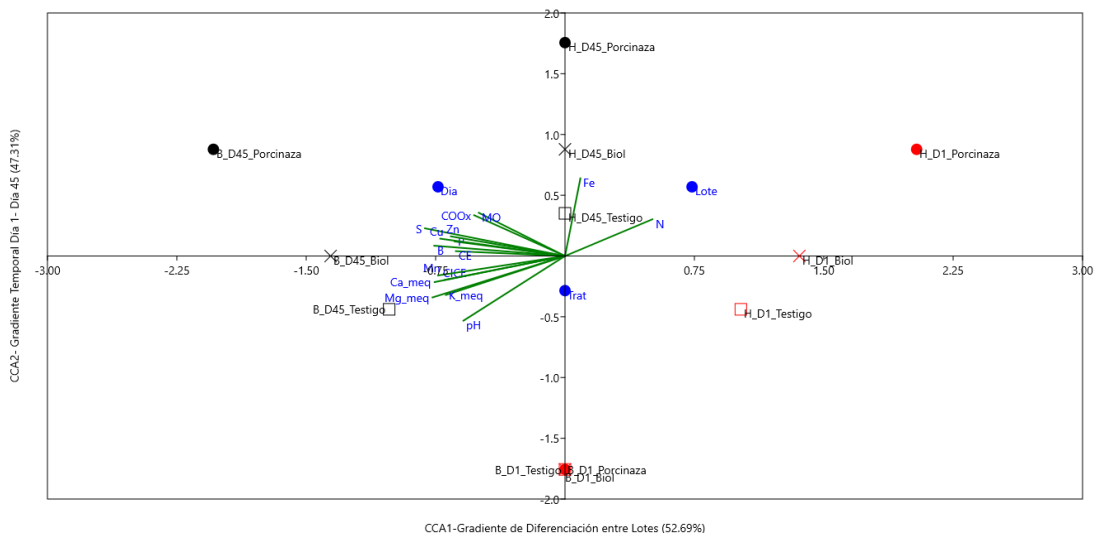
Nota: Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) de las 12 muestras de suelo correspondientes a los lotes Biodigestor y Hernando en los días 1 y 45. El análisis se construyó a partir de una matriz de disimilitud $1-p$ derivada de la correlación de Spearman. El eje PCoA1 explica el 71.79 % de la variación total y representa el gradiente principal asociado a diferencias edáficas entre lotes y condiciones iniciales del experimento. El PCoA2 explica el 13.75 % y refleja variaciones secundarias relacionadas con los tratamientos (Porcinaza, Biol y Testigo) y los cambios ocurridos entre días.

El PCoA construido a partir de la matriz de disimilitud $1-\rho$ (correlación de Spearman) mostró una estructura multivariada definida para las 12 muestras combinadas (Día 1 y Día 45 de ambos lotes). El eje PCoA1 explicó el 71.79 % de la variación total y el PCoA2 el 13.75 %, acumulando más del 85 % de la variación edáfica representada en los dos primeros ejes.

En el plano bidimensional, las muestras del Lote Biodigestor y Lote Hernando se distribuyeron en agrupamientos diferenciados, mientras que también se observó separación consistente entre los días de muestreo (Día 1 vs. Día 45) y entre los tratamientos (Porcinaza, Biol y Testigo). Las muestras del Día 1 tendieron a ubicarse hacia los extremos opuestos de PCoA1 respecto a las del Día 45, mientras que las diferencias entre tratamientos se reflejaron principalmente sobre PCoA2.

6.6.5. CCA del suelo en función del Lote, Día y Tratamiento

Ilustración 37 CCA global: suelo vs. Lote, día y tratamiento



Nota: Análisis de Correspondencia Canónica (CCA) de las propiedades químicas del suelo en relación con los factores ambientales Lote, Día y Tratamiento. CCA1 (52.69 %) corresponde al gradiente de diferenciación entre lotes, mientras que CCA2 (47.31 %) representa el gradiente temporal entre el Día 1 y el Día 45. Las flechas indican la dirección y magnitud de la contribución de cada variable química a los ejes canónicos

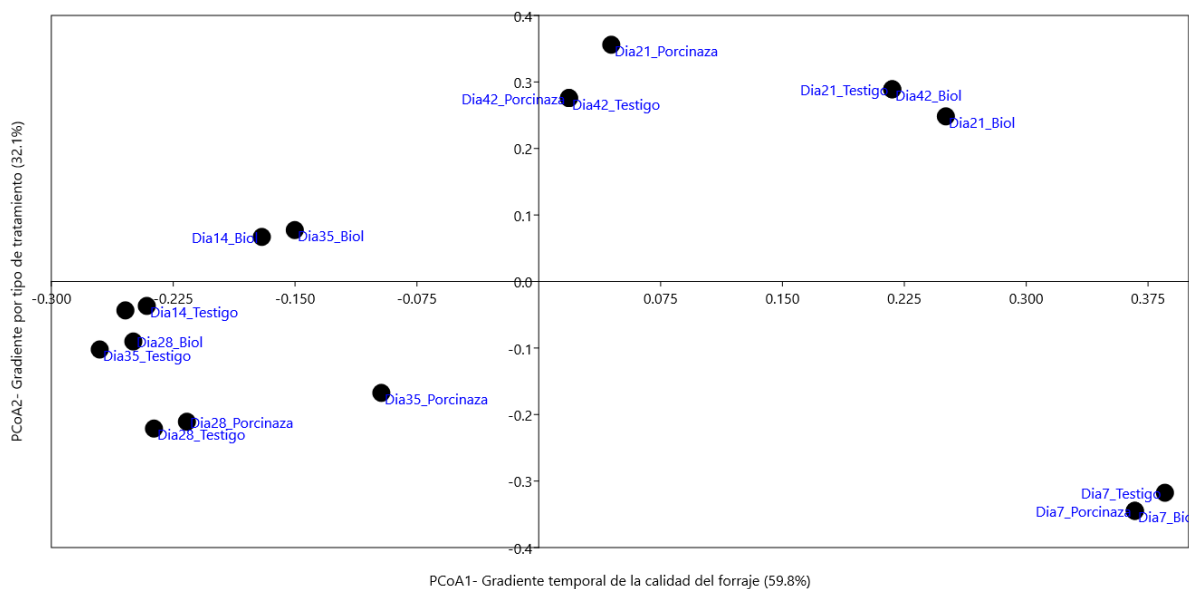
El análisis CCA permitió identificar los principales gradientes de variación en las propiedades químicas del suelo en función del lote, el tiempo de muestreo (Día 1 y Día 45) y los tratamientos evaluados (Biol, Porcinaza y Testigo). El primer eje canónico (CCA1) explicó el 52.69 % de la variación total y representó un gradiente de diferenciación entre Lotes, evidenciando la influencia del historial de manejo del suelo en la distribución de los nutrientes. El lote Hernando se proyectó hacia valores positivos de CCA1, mientras que el lote Biodigestor se ubicó en valores negativos, reflejando contrastes en la disponibilidad de cationes (Ca_meq, Mg_meq, K_meq) y micronutrientes (Zn, Fe, Mn, Cu).

El segundo eje canónico (CCA2) explicó el 47.31 % de la variación y representó un gradiente temporal entre el Día 1 y el Día 45, asociado a los cambios generados por el fertirriego. Las muestras del Día 45 se agruparon en la parte superior del eje, mientras que las del Día 1 se ubicaron en valores negativos, lo cual indica una respuesta del suelo a los tratamientos durante el ciclo experimental.

Las variables pH, CICE y CE mostraron una mayor contribución hacia CCA1, mientras que nutrientes como P, S y MO se asociaron principalmente con CCA2. En conjunto, el CCA reveló que las diferencias entre lotes constituyen el principal gradiente de variación en el suelo, mientras que el tiempo de exposición a los tratamientos conforma el segundo gradiente más importante.

6.6.6. PCoA de la calidad bromatológica del forraje – Lote Biodigestor

Ilustración 38 PCoA de las variables bromatológicas del forraje (MS, FC, FDA, FDN y PC) en el Lote Biodigestor entre los días 7 y 42.



Nota. *Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) basado en las variables bromatológicas del forraje (MS, FC, FDA, FDN y PC). El eje 1 (PCoA1) explica el 59.8% de la variación total y representa el gradiente temporal del ciclo experimental (Día 7 a Día 42). El eje 2 (PCoA2) explica el 32.1% de la variación y corresponde al gradiente de tratamiento generado por los fertirriegos con Porcinaza, Biol y el Testigo. La posición de cada muestra refleja su similitud multivariada en la calidad nutricional del pasto Estrella africana.*

El PCoA basado en las variables bromatológicas (MS, FC, FDA, FDN y PC) explicó el 92% de la variación total en los dos primeros ejes.

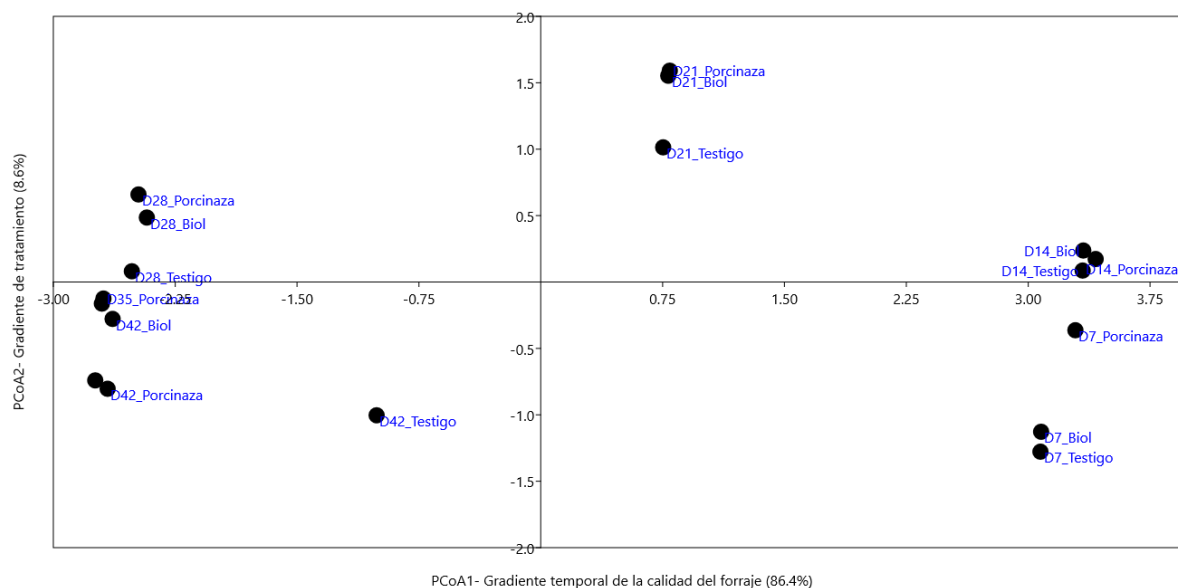
El PCoA1 (59.8%) describió un gradiente temporal, en el cual las muestras del Día 7 se ubicaron en el extremo positivo y las del Día 42 en el extremo negativo, reflejando el aumento progresivo de la materia seca y la fibra (FDN y FDA) conforme avanzó el ciclo de crecimiento del pasto.

El PCoA2 (32.1%) representó el gradiente de tratamiento, separando las muestras según el tipo de fertirriego. Porcinaza tendió a ubicarse hacia valores más altos de MS y FDN, Biol se asoció con mayor proteína cruda, y Testigo ocupó posiciones intermedias.

Estos resultados indican que tanto el avance temporal como el tipo de fertilización ejercen efectos diferenciados sobre la composición nutricional del pasto Estrella africana.

6.6.7. PCoA de la calidad bromatológica del forraje- Lote Hernando

Ilustración 14 PCoA de las variables bromatológicas del forraje (MS, FC, FDA, FDN y PC) en el Lote Hernando entre los días 7 y 42.



Nota: Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) aplicado a las variables bromatológicas del forraje (MS, FC, FDA, FDN y PC) en el Lote Hernando. El eje 1 (PCoA1) explicó el 86.4% de la variación total y representó un marcado gradiente temporal, diferenciando claramente las muestras desde el Día 7 hasta el Día 42. El eje 2 (PCoA2), que explicó el 8.6% de la variación, correspondió al gradiente de tratamiento, separando las muestras según el fertirriego aplicado (Porcinaza, Biol y Testigo). La posición relativa de los puntos indica la similitud multivariada entre muestras en términos de la calidad nutricional del pasto Estrella africana.

La gráfica del PCoA correspondiente al Lote Hernando muestra que las muestras del Día 7 se ubican en el extremo derecho del eje 1, agrupadas entre sí y distribuidas en posiciones bajas del eje 2. Las muestras del Día 14 también aparecen en el lado derecho del eje 1, aunque más próximas a la región central del gráfico y con valores ligeramente positivos en el eje 2. Las muestras del Día 21 se localizan en la parte superior central del plano, con valores positivos tanto en el eje 1 como en el eje 2.

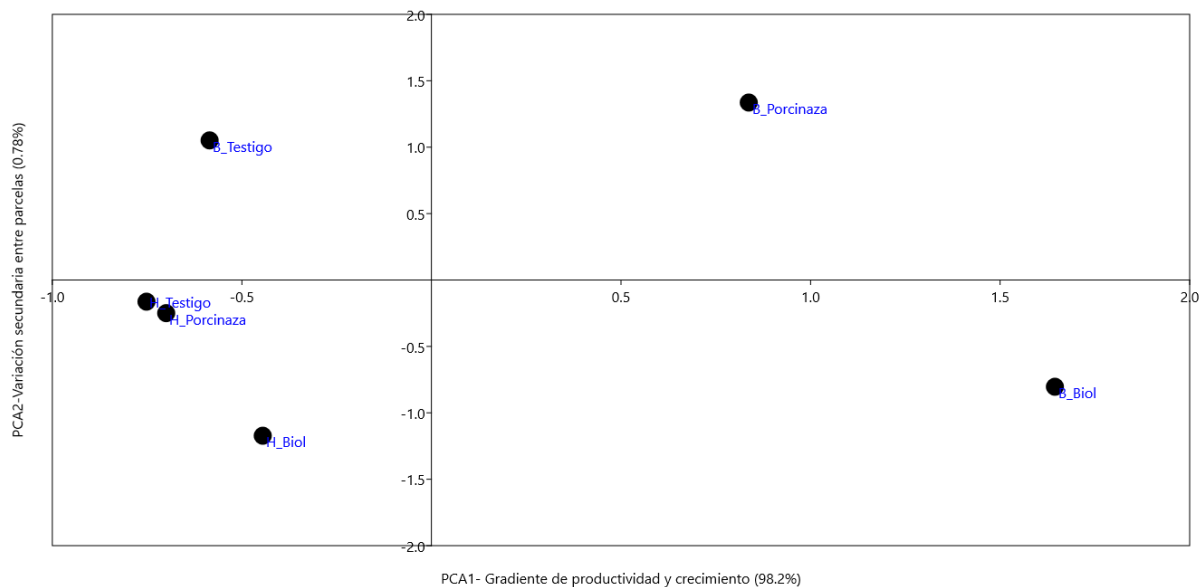
Por su parte, las muestras del Día 28 se posicionan hacia el lado izquierdo del eje 1, ocupando niveles cercanos a cero o ligeramente positivos en el eje 2. Las muestras del Día 35 permanecen igualmente en el sector izquierdo del eje 1, ubicándose cerca del eje horizontal y con valores negativos en el eje 2. Finalmente, las muestras del Día 42 aparecen en la parte inferior izquierda del gráfico, con valores negativos en ambos ejes.

En conjunto, se observa que las muestras de cada día forman agrupamientos definidos y ocupan zonas diferenciadas dentro del plano bidimensional generado por el análisis.

Análisis de Componentes Principales del Crecimiento del Pasto Estrella Africana

6.6.8. (PCA) del Crecimiento del Pasto Estrella Africana, Día 1 y Día 45 en relación a los lotes y propiedades fisicoquímicas del suelo.

Ilustración 39 Análisis de Componentes Principales (PCA) del crecimiento del pasto durante los 45 días experimentales.



Nota. Análisis de Componentes Principales (PCA) basado en las variables de crecimiento (promedios semanales de altura, altura final y crecimiento promedio por semana) correspondientes a los lotes Biodigestor y Hernando. El componente 1 (PC1), que explica el 98.2% de la variación total, establece un gradiente de productividad que separa claramente los tratamientos del Lote Biodigestor y del Lote Hernando. El componente 2 (PC2), que aporta el 0.78% de la variación, refleja diferencias secundarias entre parcelas dentro de cada lote. La distribución de las muestras en el plano bidimensional indica patrones de similitud multivariada en el desempeño del pasto durante el ciclo de 45 días.

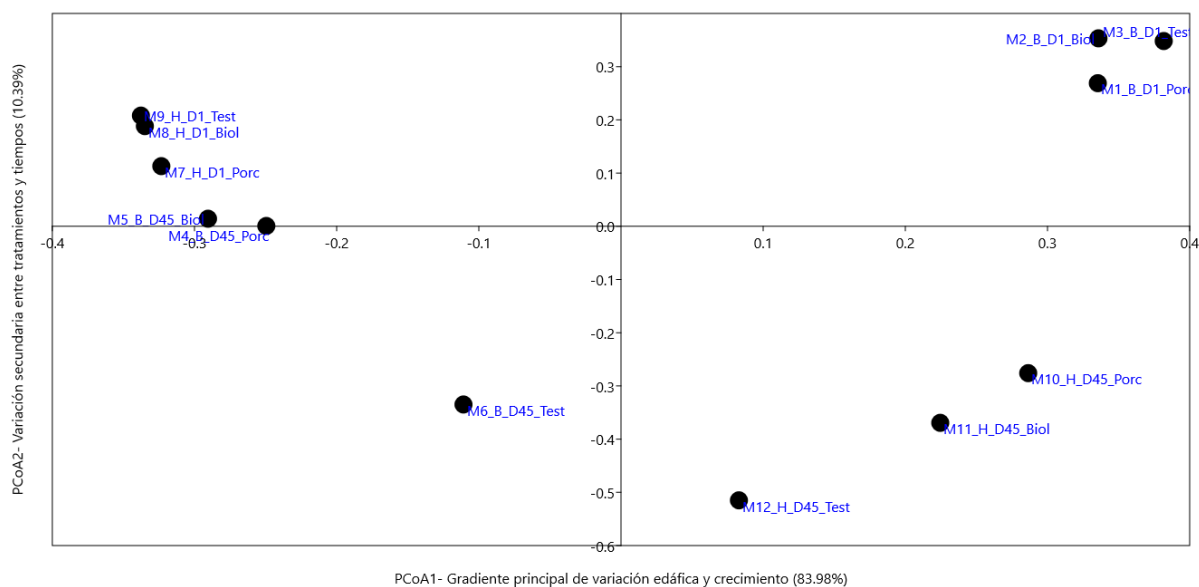
La gráfica del PCA muestra que las muestras correspondientes al Lote Biodigestor se ubican hacia el lado derecho del eje 1, mientras que todas las muestras del Lote Hernando se localizan hacia el lado izquierdo del mismo eje. Esta separación horizontal constituye el patrón dominante, ya que el componente 1 explica el 98.2% de la variación total.

Las muestras del Lote Biodigestor (B_Porcinaza, B_Biol y B_Testigo) se encuentran más dispersas a lo largo de PC1, mientras que las del Lote Hernando forman un grupo más compacto hacia valores negativos. En el componente 2, que representa una variación mínima (0.78%), se observan ligeras diferencias verticales entre algunas parcelas, especialmente con B_Testigo ubicado en la zona superior del gráfico y H_Biol en la inferior, aunque estas variaciones son pequeñas en comparación con el patrón principal representado por PC1.

En conjunto, el plano PCA evidencia dos agrupamientos bien definidos asociados a los lotes y una dispersión menor entre parcelas dentro de cada lote.

6.6.9. PCoA Análisis Multivariado Suelo–Crecimiento mediante

Ilustración 40 Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) basado en propiedades químicas del suelo y crecimiento del forraje.



Nota. Representación bidimensional del Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) basado en una matriz de distancias 1 – Spearman construida a partir de las propiedades químicas del suelo y el crecimiento del forraje. El eje 1 (PCoA1) explica el 83.98% de la variación total y refleja el gradiente principal de cambio entre las muestras del Día 1 y Día 45. El eje 2 (PCoA2) explica el 10.39% de la variación y muestra diferencias secundarias entre tratamientos dentro de cada lote. La distribución de los puntos indica patrones de similitud y separación multivariada en función del comportamiento químico del suelo y el crecimiento del forraje.

El Análisis de Coordenadas Principales (PCoA) realizado a partir de la matriz de distancias 1 – Spearman, construida con las propiedades químicas del suelo y el crecimiento del forraje, mostró una estructura clara en la ordenación de las muestras. El componente 1 (PCoA1), que explica el 83.98% de la variación total, separa de manera marcada las muestras del Día 1 respecto a las del Día 45, lo cual indica que los cambios químicos ocurridos durante el ciclo

experimental tuvieron un efecto acumulado y consistente sobre la similitud multivariada entre las muestras. Las muestras iniciales de ambos lotes (B_D1 y H_D1) se agrupan en el cuadrante derecho del plano, mientras que las muestras finales, especialmente H_D45_Biol, H_D45_Porcinaza y H_D45_Testigo, se desplazan hacia valores negativos del eje 1.

El eje 2 (PCoA2), que explica el 10.39% de la variación, revela diferencias internas entre tratamientos y entre lotes. En este eje, las muestras H_D1_Biol y H_D1_Testigo ocupan posiciones superiores, mientras que H_D45_Test y H_D45_Biol se ubican en la parte inferior. Esta distribución indica que, además del cambio temporal general capturado por PCoA1, existen variaciones específicas entre parcelas asociadas principalmente a elementos como Fe, Mn, CICE y P, que son los nutrientes que mostraron mayor cambio entre Día 1 y Día 45 en el Lote Hernando.

Desde una perspectiva de interpretación preliminar, la separación entre Día 1 y Día 45 sugiere que el proceso de fertirriego modificó de forma considerable la composición química del suelo, particularmente en variables asociadas a fertilidad y disponibilidad de nutrientes (P, S, K, CICE, Fe, Mn). Además, la ubicación diferenciada del Lote Hernando en el cuadrante inferior izquierdo, especialmente en las muestras finales, indica que este lote experimentó cambios más pronunciados, lo que coincide con el incremento en variables químicas como K, Fe y Mn reportados en los análisis de laboratorio.

Finalmente, la asociación espacial entre las muestras B_D45_Biol y B_D45_Porcinaza con valores de crecimiento altos (77–94 cm) sugiere que los tratamientos con mayor aporte de nutrientes se agruparon en zonas similares del PCoA.

Capítulos 7. Análisis de resultados

7.1. Cambios químicos del suelo bajo fertirriego con Biol y Porcinaza

Los resultados del Capítulo 6 mostraron que el fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida generó incrementos marcados en la fertilidad química del suelo entre el Día 1 y el Día 45, especialmente en el Lote Biodigestor. El análisis descriptivo y el PCA evidenciaron que las muestras B_D45_Biol y B_D45_Porcinaza se ubicaron en el extremo positivo del gradiente de fertilidad, asociadas a mayores contenidos de Ca, Mg, K, P, S, MO, COOx, CICE y CE, mientras que las muestras del Día 1 y los tratamientos Testigo permanecieron en la zona de menor riqueza nutrimental.

Este patrón es congruente con numerosos trabajos que reportan aumentos en la concentración de macro y micronutrientes, así como en la capacidad de intercambio catiónico, tras la aplicación de efluentes porcinos o abonos orgánicos líquidos en suelos de pasturas. En estudios con *Megathyrsus maximus* cv. Tanzania en el Caribe seco colombiano, la fertilización con bioles incrementó significativamente la disponibilidad de N, P, K, S, Ca, Mg, Zn, Mn y Cu, mejorando de manera consistente los indicadores de fertilidad y el crecimiento del forraje respecto al testigo sin fertilización. (Ramírez et al., 2024) Resultados similares se han descrito para el uso de purín porcino líquido en gramíneas como *Cynodon dactylon* (Bermuda grass), donde la aplicación de estiércol líquido elevó el contenido de nutrientes en el suelo y favoreció la estructura del cultivo frente a tratamientos sin N o solo con fertilización mineral. (Ames et al., 2014).

En el presente estudio, el Lote Biodigestor —con mayor contenido inicial de MO y CICE— respondió con incrementos más pronunciados en P, K, Ca y Mg que el Lote Hernando, lo que confirma que el historial de manejo y la condición basal del suelo modulan la magnitud de la respuesta al fertirriego. Esta interacción entre tipo de enmienda y contexto edáfico también ha sido resaltada en trabajos que comparan suelos con distinta historia de uso, donde la respuesta a los efluentes orgánicos es mayor en sistemas previamente enriquecidos o con mayor capacidad amortiguadora. (Solano-López & Villalobos-Villalobos, 2022)

En contraste, el Lote Hernando mantuvo pH más ácido y valores de CICE y P disponible marcadamente menores, aun después del ciclo de 45 días, lo que concuerda con la literatura que describe las limitaciones típicas de suelos ácidos en pasturas tropicales: baja disponibilidad de P, saturación de Al y lixiviación de bases, que restringen la eficiencia del fertilizante. (El-Naqme et al., 2019) A pesar de ello, los tratamientos con Biol y Porcinaza en este lote también mostraron desplazamientos positivos en el PCA y en las comparaciones Día 1–Día 45, indicando que incluso en ambientes edáficamente restrictivos los efluentes porcinos contribuyen a mejorar la calidad química del suelo, aunque en menor magnitud que en el Lote Biodigestor.

En síntesis, la comparación con otros estudios respalda la interpretación de que el Biol y la Porcinaza Líquida funcionan como mejoradores de la fertilidad edáfica, aumentando la disponibilidad de macro y micronutrientes y potenciando la capacidad del suelo para sostener un mayor crecimiento forrajero. La diferencia entre lotes observada en esta tesis no contradice la literatura, sino que la matiza al mostrar que la eficiencia del fertirriego depende fuertemente del estado inicial del suelo.

7.2. Productividad y calidad bromatológica del forraje

Los resultados de biomasa fresca a los 45 días mostraron que el Biol fue el tratamiento de mayor productividad en ambos lotes, seguido por la Porcinaza y, finalmente, por el Testigo. En el Lote Biodigestor, las producciones de 5.469 kg/m² (Biol) y 3.807 kg/m² (Porcinaza) equivalen aproximadamente a 54,7 y 38,1 t/ha de forraje fresco, mientras que el testigo alcanzó 30,6 t/ha. En el Lote Hernando los valores fueron menores, pero se mantuvo la misma jerarquía de tratamientos.

Aunque las especies y condiciones experimentales no son idénticas, estos rendimientos son comparables e incluso superiores a los reportados para *Megathyrsus maximus* fertilizado con biol en el Caribe seco, donde se obtuvieron alrededor de 19–26 t/ha de forraje fresco bajo combinaciones de Biol y urea, frente a 6–7 t/ha en el testigo sin fertilización. (Gómez-Ramírez et al., 2025) También se sitúan dentro del rango descrito para praderas fertilizadas con purín porcino en gramíneas del género *Cynodon*, en las que la aplicación de estiércol líquido incrementa el rendimiento de materia seca y la biomasa cosechada respecto a los controles sin N. (Ames et al., 2014)

Desde el punto de vista de la calidad bromatológica, los PCA del forraje mostraron un patrón consistente con la fisiología de las gramíneas tropicales: conforme avanzó el ciclo de rebrote (Día 7 a Día 42), aumentaron la materia seca (MS), la fibra cruda (FC), la fibra detergente neutra (FDN) y la fibra detergente ácida (FDA), mientras que la proteína cruda (PC) tendió a disminuir. Esta trayectoria temporal ha sido ampliamente documentada en especies como *Cynodon* spp., *Panicum maximum* y otras gramíneas de clima cálido, donde el incremento

de la fracción estructural con la madurez se acompaña de una dilución de la proteína y una reducción de la digestibilidad. (Apollon et al., 2022)

No obstante, los tratamientos con Biol y Porcinaza no solo aumentaron la cantidad de biomasa, sino que en varios cortes mantuvieron niveles de PC relativamente superiores al testigo, especialmente en los días intermedios del ciclo. Este comportamiento coincide con resultados que atribuyen a los bioles la capacidad de estimular el crecimiento vegetal mediante la combinación de nutrientes minerales y compuestos bioactivos (fitorreguladores, ácidos orgánicos, etc.), lo que se traduce en un balance más favorable entre producción y calidad nutritiva del forraje frente a la ausencia de fertilización. (Gómez-Ramírez et al., 2025)

Así, la comparación con otras investigaciones sugiere que los valores de producción y calidad obtenidos en esta tesis son coherentes con el potencial agronómico del Biol y de la Porcinaza Líquida, y refuerzan la idea de que estos efluentes pueden sustituir parcial o totalmente a fertilizantes minerales en sistemas de pasturas tropicales, siempre que se atienda a las condiciones específicas de cada lote.

7.3. Crecimiento del pasto y capacidad de carga

El seguimiento de la altura semanal del pasto permitió describir con precisión la dinámica del crecimiento en cada tratamiento. En el Lote Biodigestor, el tratamiento Biol presentó la curva de crecimiento más pronunciada, pasando de 16 cm en la primera semana a 94 cm en la sexta, con una tasa media de 19 cm/semana. La Porcinaza alcanzó 77 cm (15 cm/semana) y el Testigo

53 cm (11 cm/semana). En el Lote Hernando las tasas fueron menores, pero se mantuvo la misma jerarquía: Biol > Porcinaza \approx Testigo.

Estos resultados son coherentes con estudios donde la aplicación de bioles o purín porcino incrementa la altura de las plantas y la cobertura de las pasturas frente a tratamientos sin fertilización, efecto que se ha asociado a la rápida disponibilidad de N, P, K y a la presencia de micronutrientes y compuestos promotores del crecimiento. (Gómez-Ramírez et al., 2025) La menor respuesta relativa observada en el Lote Hernando se alinea con la evidencia de que, en suelos ácidos y con baja CICE, la eficiencia del fertilizante orgánico se ve limitada por la saturación de Al y la posible fijación de P, reduciendo el potencial de crecimiento a pesar del aporte de nutrientes. (El-Naqme et al., 2019)

La estimación de la capacidad de carga, a partir de la biomasa fresca por metro cuadrado, refuerza esta interpretación. En el Lote Biodigestor, el Biol alcanzó valores cercanos a 55 t/ha de forraje fresco, lo que implica, bajo supuestos razonables de consumo y rotación, una capacidad de carga superior a la del testigo y comparable a la reportada en pasturas bien manejadas con fertilización mineral. En el Lote Hernando los valores fueron más moderados, pero aun así el Biol y la Porcinaza duplicaron aproximadamente la producción del testigo, sugiriendo que el uso de efluentes porcinos puede mejorar la oferta de forraje incluso en ambientes edáficamente limitados.

7.4. Aporte de los análisis multivariados (PCoA, CCA y PCA)

El uso combinado de matrices de correlación de Spearman, PCoA, CCA y PCA permitió ir más allá de comparaciones univariadas y capturar la estructura multivariada del sistema suelo-planta. Este enfoque es consistente con recomendaciones metodológicas en ciencia del suelo y

ecología, donde el PCoA y el CCA se emplean para sintetizar gradientes de fertilidad, acidez y manejo a partir de múltiples variables químicas y ambientales.(Anderson, 2001)

Los análisis multivariados aplicados (PCoA, CCA y PCA) permitieron identificar de manera integrada los patrones principales de variación en el suelo y en la calidad del forraje durante el ciclo experimental. En general, los resultados mostraron tres tendencias consistentes:

- El tiempo (Día 1 vs. Día 45) fue el factor que más modificó la composición del suelo.

En ambos lotes, el PCoA evidenció una separación clara entre los muestreos iniciales y finales, indicando cambios multivariados importantes asociados al fertirriego, especialmente en CE, CICE, MO y nutrientes como P, K, S, Fe y Mn.

- Los tratamientos generaron diferencias detectables, aunque secundarias frente al gradiente temporal.

El eje secundario de los PCoA separó a Biol, Porcinaza y Testigo, siendo Biol el que mostró los cambios químicos más pronunciados en el Día 45, seguido por Porcinaza. El Testigo mantuvo patrones más cercanos a las condiciones iniciales.

- Las diferencias entre lotes fueron confirmadas por el CCA y el PCA.

El CCA ubicó al Lote Biodigestor y al Lote Hernando en extremos opuestos del gradiente edáfico, explicado principalmente por CICE, Ca, Mg y K.

El PCA del crecimiento del forraje también separó claramente los lotes, mostrando mayor productividad en el Lote Biodigestor.

En conjunto, los análisis multivariados demostraron que la dinámica del suelo estuvo determinada principalmente por el paso del tiempo, seguida por las diferencias intrínsecas entre lotes y, finalmente, por el efecto de los tratamientos. Asimismo, los patrones observados en suelo se relacionaron con la productividad y la calidad nutricional del pasto, confirmando la utilidad de estos métodos para interpretar respuestas complejas en sistemas de fertirriego

7.5.1. Implicaciones agronómicas principales

Los resultados del estudio evidenciaron que el fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida mejoró de manera significativa la fertilidad química del suelo en el corto plazo. Estos incrementos fueron más notorios en parámetros asociados a la disponibilidad de nutrientes— particularmente P, K, Ca, Mg y S—y en variables edáficas relacionadas con la capacidad del suelo para retener y suministrar cationes, como la materia orgánica, el carbono oxidable y la capacidad de intercambio catiónico. Este comportamiento coincide con lo reportado en la literatura sobre la eficiencia de bioles y efluentes porcinos como estrategias de nutrición orgánica (Ramírez et al., 2024)

En paralelo, el aumento de nutrientes en el suelo se reflejó en una mayor productividad del pasto Estrella africana, especialmente en biomasa fresca, tasa de crecimiento y acumulación de nutrientes en el tejido vegetal. Aunque la calidad bromatológica mostró variaciones más moderadas, se observaron mejoras consistentes en proteína cruda y estabilidad en los valores de fibra, lo cual es coherente con el comportamiento esperado para gramíneas tropicales fertilizadas con fuentes orgánicas o minerales.

La magnitud de la respuesta dependió fuertemente de las características iniciales del suelo. El Lote Biodigestor, con mayor CICE, contenido de materia orgánica y menor acidez, expresó con claridad el potencial de los efluentes, mostrando mejoras amplias y sostenidas. En contraste, el Lote Hernando, caracterizado por acidez marcada y baja capacidad amortiguadora, presentó incrementos relevantes, pero menos pronunciados. Este comportamiento resalta la importancia del contexto edáfico como modulador del efecto de los insumos orgánicos.

Los análisis multivariados reforzaron esta interpretación. El PCA sintetizó los gradientes principales asociados a fertilidad y absorción de nutrientes, diferenciando claramente el desempeño de los tratamientos. El PCoA permitió visualizar la estructura temporal de los cambios y la proximidad entre parcelas según su dinámica de crecimiento y composición nutricional. Finalmente, el CCA vinculó de manera directa los cambios edáficos con los factores ambientales (lote, tratamiento y tiempo), revelando que las mejoras observadas responden tanto a los aportes del fertirriego como a las características intrínsecas de cada ambiente. En conjunto, estos métodos aportaron una visión robusta del sistema y fortalecieron la interpretación agronómica del estudio.

7.5.1.1. Recomendaciones operativas para un fertirriego sostenible con efluentes porcinos

A partir de los resultados obtenidos en suelo, forraje y análisis multivariado, se elaboró un procedimiento operativo recomendado orientado a minimizar riesgos ambientales, optimizar la eficiencia agronómica del biol y asegurar un manejo sostenible del fertirriego en suelos arcillo-arenosos. Este procedimiento considera parámetros de diagnóstico, aplicación, monitoreo

y bioseguridad, alineados con literatura técnica y con los resultados observados en los lotes evaluados.

Tabla 12 Procedimiento operativo recomendado para fertirriego sostenible en suelos arcillo-arenosos aplicando biol

Etapa del Manejo	Parámetro clave a monitorear	Frecuencia de monitoreo	Condiciones óptimas	Acción correctiva recomendada
Diagnóstico inicial	Análisis de suelo completo (pH, MO, N, P, K, CE, Cu, Zn)	Anual (antes del ciclo principal)	pH 5.5–6.5; CE < 2 dS/m; Cu ≤ 0.60 ppm; Zn ≤ 11.80 ppm	Aplicar enmiendas calcáreas si pH < 5.5. Si Cu o Zn exceden niveles, ajustar dosis de biol y promover uso de micorrizas para mejorar absorción. Mantener franjas de protección (3–5 m) frente a fuentes de agua. En verano, aplicar sin generar empozamientos; en invierno no aplicar sobre suelo saturado. Dosis recomendada: 10 L/m ² .
Aplicación del biol	Requerimiento nutricional del pasto Estrella; demanda alta de N, P y K	Por ciclo de cultivo	Evitar encharcamientos; suelo bien drenado	En caso de acidificación, aplicar cal y suspender temporalmente el biol. Ingreso de ganado después de 8 días de la última aplicación. Respetar periodo de espera de mínimo 8 días antes del pastoreo para reducir riesgo sanitario.
Monitoreo post-aplicación	pH y Conductividad Eléctrica (CE)	Cada 45 días	Tendencia estable sin acidificación severa ni salinización	
Bioseguridad	<i>E. coli</i> , <i>Shigella</i> , <i>Salmonella</i>	Antes del ingreso de ganado y al finalizar el ciclo	Pradera libre de patógenos	

Nota. Tabla elaborada a partir de los resultados analíticos del presente estudio y de lineamientos técnicos internacionales sobre el manejo seguro de efluentes en sistemas agropecuarios (The State of Food and Agriculture, 2025).

7.5.2. Riesgos ambientales y consideraciones de sostenibilidad

Si bien los resultados del estudio muestran efectos positivos en el corto plazo, es fundamental considerar los riesgos ambientales asociados al uso recurrente de efluentes porcinos como fuentes de fertilización líquida. Estos riesgos deben ser gestionados adecuadamente para garantizar la sostenibilidad del sistema.

– Riesgo de salinización del suelo

- El uso continuo de efluentes con mayor conductividad eléctrica que el agua de riego convencional puede generar acumulación gradual de sales en la zona radicular, especialmente en suelos con drenaje limitado o alta evaporación (Núñez-Arroyo et al., 2022) Aunque en los 45 días del experimento no se observaron efectos adversos, la salinización es un riesgo documentado para aplicaciones reiteradas. La mitigación requiere un monitoreo sistemático de la CE y, en caso necesario, la implementación de riegos de lavado o la reducción de dosis.

– Acumulación de metales pesados

- La Porcinaza Líquida y otros efluentes porcinos pueden contener niveles relevantes de Cu y Zn debido a su uso en la alimentación animal. Aplicaciones continuas pueden generar acumulación en las capas superficiales del suelo y potencial interferencia con la microbiota o entrada a la cadena trófica (The State of Food and Agriculture, 2025) Si bien los incrementos detectados en este estudio no superan niveles críticos, la acumulación a largo plazo es un riesgo potencial.

Se recomienda realizar análisis periódicos y ajustar las dosis para mantenerse dentro de los límites establecidos.

– **Riesgos de bioseguridad y patógenos**

- Los efluentes porcinos pueden transportar microorganismos patógenos capaces de sobrevivir en el ambiente y representar riesgos para animales y seres humanos. Aunque la digestión anaeróbica reduce la carga patógena, no la elimina completamente (Corrales et al., 2015). Para mitigar riesgos, se recomienda evitar la aplicación en cultivos de consumo en fresco, mantener periodos de espera antes del pastoreo y prevenir escorrentías hacia cuerpos de agua.

7.5.3. Síntesis general

La evidencia obtenida indica que el fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida constituye una estrategia eficaz para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la productividad del pasto Estrella africana en el corto plazo, especialmente en ambientes con mayor capacidad de retención y amortiguación edáfica. Sin embargo, su implementación prolongada debe acompañarse con prácticas de monitoreo y manejo orientadas a la sostenibilidad ambiental. La integración de análisis univariados y multivariados permitió captar la complejidad del sistema suelo-planta y ofrece una base sólida para la toma de decisiones técnicas en sistemas ganaderos que buscan optimizar el uso de efluentes y avanzar hacia modelos circulares de producción.

Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1. Conclusiones

8.1.1. Cambios químicos del suelo bajo fertirriego con Biol y Porcinaza

- El fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida mejoró de manera significativa la fertilidad del suelo en un periodo de 45 días, incrementando variables clave como Ca, Mg, K, P, S, CICE, COOx, MO, CE y micronutrientes esenciales (Zn, Cu, Mn).
 - Este enriquecimiento fue particularmente evidente en el Lote Biodigestor, cuya mayor capacidad amortiguadora permitió respuestas más intensas frente a los tratamientos.
 - El Lote Hernando, a pesar de sus condiciones iniciales de acidez alta, baja CICE y bajo contenido de nutrientes, también mostró incrementos, aunque en menor magnitud.
- Los análisis PCA y CCA evidenciaron una separación clara entre Día 1 y Día 45, confirmando que la aplicación de efluentes impulsa un cambio multivariado integral en la estructura química del suelo.
 - Las muestras del Día 45 bajo Biol y Porcinaza se ubicaron sistemáticamente en el extremo positivo del gradiente de fertilidad.
 - Los testigos y las muestras del Día 1 se asociaron a los niveles más bajos del gradiente nutricional.
- El efecto de los tratamientos estuvo modulado por el historial de manejo de cada lote, lo que valida la hipótesis de interacción Tratamiento × Suelo.

Los suelos con mejor condición inicial respondieron con incrementos más pronunciados.

8.1.2. Productividad y calidad bromatológica del forraje

- El Biol fue el tratamiento más efectivo en términos de productividad del pasto Estrella africana, seguido por la Porcinaza Líquida y finalmente el Testigo.
 - En el Lote Biodigestor se alcanzaron producciones cercanas a 5.5 kg/m² (≈55 t/ha), valores superiores a los reportados en praderas tropicales sin fertilización.
 - En el Lote Hernando las producciones fueron más bajas, pero la jerarquía Biol > Porcinaza > Testigo se mantuvo.

- Los tratamientos orgánicos no solo incrementaron la biomasa, sino que modificaron la composición bromatológica, aumentando MS, FC, FDN y FDA con la madurez del forraje.
 - La PC disminuyó con el tiempo, como es típico en gramíneas tropicales, pero los tratamientos con Biol mantuvieron niveles relativamente superiores frente al testigo.

- En ambos lotes se observó una trayectoria bromatológica coherente con el proceso de maduración fisiológica, pero más marcada bajo Biol y Porcinaza.
 - Esto evidencia que los efluentes orgánicos influyen tanto en cantidad como en calidad del forraje.

8.1.3. Crecimiento semanal, dinámica del rebrote y capacidad de carga

- El crecimiento semanal del pasto mostró patrones diferenciados por tratamiento y lote.

- El Biol generó las curvas de crecimiento más pronunciadas en ambos lotes (hasta 94 cm al Día 45 en el Biodigestor).
 - La Porcinaza mostró respuestas vigorosas pero ligeramente inferiores al Biol.
 - El Testigo presentó las menores alturas y tasas semanales.
- La capacidad de carga derivada de la biomasa fresca mostró un incremento sustancial en los tratamientos con efluentes, especialmente en el Lote Biodigestor, donde la oferta forrajera superó en más del 40% a la del tratamiento Testigo.
 - El PCoA integrando altura y biomasa reveló gradientes claros de productividad, separando Biol y Porcinaza del Testigo y distinguiendo la dinámica de ambos lotes.

8.1.4. Síntesis general

El fertirriego con Biol y Porcinaza Líquida constituye una alternativa agronómica eficiente y sostenible, capaz de mejorar la fertilidad del suelo, incrementar la producción de biomasa y modificar favorablemente la calidad del forraje.

Las respuestas dependen fuertemente de las condiciones iniciales del suelo, siendo más pronunciadas en sistemas con mayor CICE, MO y bases intercambiables.

Los análisis multivariados brindaron un soporte estadístico sólido, demostrando que las mejoras observadas no son aleatorias, sino asociadas directamente al efecto de los tratamientos y al avance temporal del ciclo de crecimiento.

8.2. Recomendaciones

8.2.1. Recomendaciones agronómicas

- Continuar utilizando Biol como tratamiento preferente cuando el objetivo sea maximizar el crecimiento del pasto y la producción de biomasa, especialmente en suelos con fertilidad media o alta.
- Implementar fertirriego con Porcinaza Líquida en suelos con limitaciones moderadas, ya que presenta efectos positivos sostenidos, aunque inferiores al Biol.
- Aplicar correcciones adicionales (encalado, fósforo mineral, materia orgánica sólida) en suelos muy ácidos como el Lote Hernando, para potenciar la eficiencia de los efluentes líquidos.
- Integrar planes de rotación de potreros basados en altura óptima de cosecha, ya que los datos mostraron variaciones importantes en calidad bromatológica según la madurez.

8.2.2. Recomendaciones para futuros estudios

- Extender la duración del ciclo experimental a periodos mayores (60–90 días) para evaluar efectos prolongados en la dinámica del suelo y del forraje.
- Incorporar análisis de digestibilidad (DIVMS) y energía metabolizable, variables esenciales para establecer el valor nutricional real del forraje producido.
- Evaluar fracciones nitrogenadas (N-NO_3^- y N-NH_4^+) con mayor resolución temporal, ya que su dinámica fue clave en los gradientes químicos del suelo.

- Aplicar técnicas moleculares o microbiológicas, como actividad enzimática o perfiles microbianos, para comprender mejor la descomposición y mineralización inducida por bioles.
- Modelar la interacción Tratamiento × Lote bajo escenarios de cambio climático, considerando estrés hídrico y variabilidad en temperatura.

8.2.3. Recomendaciones de manejo sostenible

- Promover el uso de efluentes porcinos como herramienta de economía circular, minimizando residuos y aprovechando nutrientes dentro del sistema productivo.
- Garantizar el tratamiento previo adecuado del Biol y la Porcinaza, asegurando inocuidad y estabilidad química antes de su aplicación.
- Capacitar a productores y operarios en calibración de dosis, frecuencia de fertirriego y manejo de suelos ácidos, para asegurar una implementación correcta.

8.2.4. Cierre general del capítulo

En conclusión, los hallazgos de este estudio demuestran que los efluentes porcinos — particularmente el Biol— representan insumos valiosos para mejorar la salud del suelo y elevar la productividad del pasto Estrella africana bajo condiciones reales de campo. Las diferencias entre lotes resaltan la importancia de considerar el contexto edáfico en la toma de decisiones agronómicas, mientras que las herramientas multivariadas empleadas permiten dar solidez científica y reproducible a estas conclusiones.

Referencias

- Abdalla, M., Hastings, A., Chadwick, D. R., Jones, D. L., Evans, C. D., Jones, M. B., Rees, R. M., & Smith, P. (2018). Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253, 62-81.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.023>
- Alabi, O., Bukola, T., Alabi, O., & Bukola, T. (2023). Introduction to Descriptive Statistics. En *Recent Advances in Biostatistics*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.1002475>
- Ames, J. P., Abbado Neres, M., Dalazen Castagnara, D., Mufatto, L. M., Ducati, C., Cabrera Jobim, C., & Tres, T. T. (2014). Dry matter production, chemical composition, dry matter digestibility and occurrence of fungi in Bermuda grass hay (*Cynodon dactylon*) under different fertilization systems or associated with pea plantings in winter. *Ciencia e Investigación Agraria*, 41(2), 5-6. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202014000200003>
- Anderson, M. J. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26(1), 32-46. <https://doi.org/10.1046/j.1442-9993.2001.01070.x>
- Apollon, W., Jean-Baptiste, Y., Wagner, B., Luna-Maldonado, A., & Silos-Espino, H. (2022). Effect of organic and inorganic fertilization on the production and quality of *Brachiaria brizantha*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13, 1-13.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2637>
- Armijos Jose, D. J. B. (2023). *UNIVERSIDAD AGRARIA DEL ECUADOR*.

- Atoloye, I. A. (2020). *Soil Health, Phosphorus and Carbon Dynamics in Response to a One-Time Compost Application and Cover Crops in Organic Dryland Winter Wheat*. 243.
- Cali Moya, K. A. (2025). *Evaluación de indicadores de salud del suelo en cuatro sistemas productivos en tres localidades, 2024*. [Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/14504>
- Cordero, L. P., Hernández, P. C., & Figueroa, C. B. (2016). Evaluación de la calidad del ensilado de pasto estrella africana (*Cynodon nlemfluensis*) mezclado con tres diferentes aditivos. *Agronomía Costarricense*, 40(1), 11-27.
- Corrales, L. C., Antolinez Romero, D. M., Bohórquez Macías, J. A., & Corredor Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: Procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(24), 55-81.
- Cruz, A. B., Barra, J. E., Castillo, R. F. del, & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13(2).
<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/572>
- Cuastumal, C. M. I., Gómez-Ramírez, L. F., & Tauta-Muñoz, J. L. (2023). Productividad hídrica de *Megathyrus maximus* cv bajo fertirriego en un suelo con pH variable en el Caribe seco colombiano. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3), e-21013019.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.13019>
- Detmann, E., & Valadares Filho, S. C. (2010). On the estimation of non-fibrous carbohydrates in feeds and diets. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*.
<https://doi.org/10.1590/S0102-09352010000400030>
- El-Naqme, K., El-Dissoky, R. A., & Aiad, M. A. (2019). Soil Fertility, Onion-Maize Productivity and N-Use Efficiency as Affected by Green Manure, Mineral and Bio Fertilizers.

- Environment, Biodiversity and Soil Security*, 3(2019), 11-20.
<https://doi.org/10.21608/jenvbs.2019.7507.1051>
- FAO. (2019). *Silvopastoral Systems and their Contribution to Improved Resource Use and Sustainable Development Goals: Evidence from Latin America*. FAO.
- Ferrufino-Suárez, A. J., Mora-Valverde, D., & Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Biomasa y bromatología del pasto Estrella Africana (*Cynodon nlemfuensis* Vanderyst) con cinco períodos de rebrote. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2).
<https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47746>
- Flórez Traslaviña, Z. (2023). *Ganadería regenerativa como una alternativa productiva sostenible a través del pastoreo ultra alta densidad*. <http://hdl.handle.net/10567/3461>
- Gaddis, M. L., & Gaddis, G. M. (1990). Introduction to biostatistics: Part 6, correlation and regression. *Annals of Emergency Medicine*, 19(12), 1462-1468.
[https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(05\)82622-8](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(05)82622-8)
- Gamez, M. J. (s. f.). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. *Desarrollo Sostenible*.
 Recuperado 25 de noviembre de 2025, de
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- García, A. R. R., Peralta, M. de los Á. M., Acosta, S. Á. O., Alberto, F. P., Hernández, H. P., & Ríos, J. V. (2024). Dinámica de formación de tallos, rendimiento y análisis bromatológico del pasto Mulato II (*Urochloa* híbrido) en el Trópico Seco de México: Pasto Mulato II en el Trópico Seco de México. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 12(1), 1-10.
[https://doi.org/10.17138/tgft\(12\)1-10](https://doi.org/10.17138/tgft(12)1-10)
- Gómez-Ramírez, L. F., Castro, J. L. A., & Cañas-Álvarez, J. J. (2025). EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BIOL COMO FERTILIZANTE ORGÁNICO EN *Megathyrsus*

- maximus, BAJO CONDICIONES DEL CARIBE SECO COLOMBIANO. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 229-246.
- Hammer, O., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). *PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis*.
- Hernández Rodríguez, V. M., Escalona Maurice, M. J., Pimentel Aguilar, S., León Merino, A., Ibarrola Rivas, M. J., & López Ridaura, S. (2023). Sustainability Assessment of Two Farming Systems. *Agro Productividad*, 16(12), 29-39.
- Jazmín-Marín, D. (2019). Impacto del Uso de Biofertilizantes a Base de Residuos Orgánicos en los Suelos. *Conciencia Tecnológica*, 58.
<https://www.redalyc.org/journal/944/94461547008/html/>
- Kulhánek, M., Asrade, D. A., Suran, P., Sedlář, O., Černý, J., & Balík, J. (2023). Plant Nutrition—New Methods Based on the Lessons of History: A Review. *Plants*, 12(24), 4150. <https://doi.org/10.3390/plants12244150>
- Laura Villegas. (2025). (PDF) Soil quality—A critical review. *ResearchGate*.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Lopez, M. J. S., & Villalobos, L. A. V. (2024). Respuesta fenológica y productiva del pasto estrella a la fertilización orgánica e inorgánica. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 32(1), 15-27. <https://doi.org/10.53588/alpa.320103>
- Lorenzo Kómová, E., Palacios Hidalgo, Á., Souza Viamontes, C. M., Lorenzo Kómová, E., Palacios Hidalgo, Á., & Souza Viamontes, C. M. (2023). La economía circular en la gestión de residuos ganaderos. *Economía y Desarrollo*, 167(2).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0252-85842023000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=en

- Maher, S., Sweeney, T., & O'Doherty, J. V. (2025). Optimising Nutrition for Sustainable Pig Production: Strategies to Quantify and Mitigate Environmental Impact. *Animals*, 15(10), 1403. <https://doi.org/10.3390/ani15101403>
- Maya Mazorra, G. E., Durán Castro, C. V., & Ararat, J. E. (2005). *Valor nutritivo del pasto estrella solo y en asociación con leucaena a diferentes edades de corte durante el año*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8435>
- Mejía Salazar, J. R., Nieto Sierra, D. F., Mejía Kerguelen, S. L., Arango, M., Burbano Erazo, E., & Higuera Corrales, I. D. J. (2021). Evaluación agronómica y nutricional de genotipos de *Chloris gayana* para la ganadería Colombiana. *Agronomía Mesoamericana*, 382-398. <https://doi.org/10.15517/am.v32i2.44042>
- Min ambiente. (2019). *Resolucion-076-del-15-de-abril-de-2019-1*.
- Minambiente. (2021). *Resolución 1256 de 2021*. Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-1256-de-2021/>
- Nations, F. A. A. O. O. T. U. (2011). *Ahorrar para crecer: Guía para los responsables de las políticas de intensificación sostenible de*. Food & Agriculture Organi.
- Navarro Flores, J. R., & Vargas Rojas, J. C. (2015). Eficiencia relativa del diseño de bloques completos al azar para ensayos de arroz en Bagaces, Guanacaste, Costa Rica. *InterSedes*, 16(34). <https://doi.org/10.15517/isucr.v16i34.22572>
- Noreña-Grisales, J. M., Osorio Vega, N. W., & Gómez Yarce, J. P. (2016). *Manual de uso de la porcínaza en la agricultura: De la granja al cultivo*. Porkcolombia – Fondo Nacional de la Porcicultura.
- Núñez-Arroyo, J. M., Jiménez-Castro, J. P., Tobía-Rivero, C. M., Arias-Gamboa, L. M., Jiménez-Alfaro, E., & Padilla-Fallas, J. E. (2022). Efecto de la edad de rebrote y época del año

- sobre los componentes de la pared celular y la digestibilidad in vitro de gramíneas (II PARTE). *Nutrición Animal Tropical*, 16(2), 91-114.
<https://doi.org/10.15517/nat.v16i2.52729>
- Olaya, J. L. Q., León, A. R., & Yauyo, M. M. A. (2025). La sombra ambiental de la carne: Desafíos y soluciones para un futuro sostenible. *Revista Científica Pakamuros*, 13(2), 80-95. <https://doi.org/10.37787/2evgey06>
- Palarea-Albaladejo, J., & Martín-Fernández, J. A. (2015). zCompositions—R package for multivariate imputation of left-censored data under a compositional approach. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 143, 85-96.
<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2015.02.019>
- Parlamento Europeo. (2023, mayo 24). *Economía circular: Definición, importancia y beneficios*. Temas | Parlamento Europeo.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- Patarroyo Moreno, L. M. (2022). *Diseño de biodigestor a partir de porcinaza*.
<https://hdl.handle.net/20.500.11839/9087>
- Porkcolombia. (2016). VI Benchmarking 2016-III Semestre – Porkcolombia. *VI Benchmarking*.
<https://porkcolombia.co/bioseguridad/vi-benchmarking-2016-iii-semester/>
- Quishpe Cushicondor, F. J. (2021). “*Aplicación de tres dosis de biol con fertirriego en cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) en el cantón Quito provincia de Pichincha*.”
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7690>
- Ramírez, L. F. G., Castro, J. L. A., & Álvarez, J. J. C. (2024). Efecto de la aplicación de biol como fertilizante orgánico en *Megathyrus maximus*, bajo condiciones del caribe seco

- colombiano. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 229-246.
<https://doi.org/10.22490/21456453.7676>
- Rodríguez Rodríguez, G. F., & Sánchez Camargo, Á. M. (2017). *Evaluación ambiental de los usos potenciales de la porcinaza posterior a su tratamiento de estabilización*.
<https://hdl.handle.net/20.500.14625/20997>
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T., & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145-163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Sandoval, J. A. M., Ovalle, M. C. B., Urrego, L. M. A., & Estepa, D. A. R. (2022). *Evaluación de bioles en pasto estrella (Cynodon nlemfluensis), para el subsector ganadero. Caso Fusagasugá-Colombia*. 31(4).
- Solano-López, M. J., & Villalobos-Villalobos, L. A. (2022). Fertilización nitrogenada en pastos del género *Cynodon*. *Nutrición Animal Tropical*, 16(1), 82-104.
<https://doi.org/10.15517/nat.v16i1.51542>
- The State of Food and Agriculture. (2025). *The State of Food and Agriculture*. Publications.
<https://doi.org/10.4060/cd7067en>
- Werker, A., Lorini, L., Villano, M., Valentino, F., & Majone, M. (2022). Modelling Mixed Microbial Culture Polyhydroxyalkanoate Accumulation Bioprocess towards Novel Methods for Polymer Production Using Dilute Volatile Fatty Acid Rich Feedstocks. *Bioengineering*, 9(3), 125. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9030125>
- Yin, D., Yu, S., Ju, Y., Wang, Y., & Yin, D. (2025). *Integrated Management Practices Foster Soil Health, Productivity, and Agroecosystem Resilience* (No. 2025062355). Preprints.
<https://doi.org/10.20944/preprints202506.2355.v1>

Youssef, M. M. A. & Eissa, M. F. M. (2014, enero). *Biofertilizers and their role in management of plant parasitic nematodes: A review*. 5(1), 1-6.