

**EFEECTO DE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE FÓSFORO EN EL
CRECIMIENTO (DIÁMETRO, NDVI Y NÚMERO DE HOJAS) DE PLANTAS DE
MAÍZ (*ZEA MAYS L.*) EN CONDICIONES CONTROLADAS EN EL MUNICIPIO
DE TIMBÍO, CAUCA.**

EDUARD FABIAN RIVERA MONTENEGRO

VICTOR EDUARDO MUÑOZ DIAZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERAS

POPAYÁN – CAUCA

2025

**EFEECTO DE BACTERIAS SOLUBILIZADORAS DE FÓSFORO EN EL
CRECIMIENTO (DIÁMETRO, NDVI Y NÚMERO DE HOJAS) DE PLANTAS DE
MAÍZ (*ZEA MAYS L.*) EN CONDICIONES CONTROLADAS EN EL MUNICIPIO
DE TIMBÍO, CAUCA.**

**EDUARD FABIAN RIVERA MONTENEGRO
VICTOR EDUARDO MUÑOZ DIAZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OBTAR POR EL TITULO DE
INGENIERO AGROAMBIENTAL**

Director:

**Ph.D JUAN CARLOS AGUIRRE NEIRA
CORPORACION UNIVERSITARIA COMFACAUCO UNICOMFACAUCO**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCO UNICOMFACAUCO
FACULTAD DE INGENIERAS
POPAYÁN – CAUCA**

2025

DEDICATORIA

Eduard Fabian Rivera Montenegro

Dedico este trabajo con profundo amor y gratitud a Dios, por haberme dado la fortaleza, la salud y la sabiduría para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres Maria Montenegro y Carlos Rivera, por su amor incondicional, su ejemplo de esfuerzo y sus constantes palabras de aliento. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba, por apoyarme en los momentos difíciles y por ser el pilar fundamental de mi formación.

A mis hermanos, por su compañía, comprensión y apoyo silencioso durante este proceso.

A mis profesores y tutores, quienes con su guía, exigencia y conocimientos contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y personal.

Y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, hicieron parte de este camino.

Víctor Eduardo Muñoz Díaz

El presente trabajo es dedicado especialmente a Dios por ser el inspirador para continuar en este proceso tan importante para mi vida el cual es obtener uno de los anhelos más deseados como mi trabajo de grado.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. A mis padres Emilce Díaz y Jesús Muñoz por confiar en mis expectativas, por los consejos, valores y principios que me han brindado. Agradezco sinceramente a mis profesores y tutores por su apoyo, orientación y compromiso durante el desarrollo de este proyecto de grado. Su acompañamiento fue clave para alcanzar este logro.

Agradecemos de manera muy especial al profesor **Efrén Venancio Ramos**, por su acompañamiento, orientación y compromiso durante el desarrollo de este proyecto de grado. Su experiencia, disposición y valiosas recomendaciones fueron fundamentales para el diseño, ejecución y análisis de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRAC	9
1. INTRODUCCION	11
CAPITULO I GENERALIDADES	13
1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	13
1.2. JUSTIFICACION	15
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.4. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	18
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	19
2.1 MARCO TEORICO Y ANTECEDENTES.....	19
2.2 LOCALIZACION.....	23
2.3 METODOLOGIA	24
3. RESULTADOS Y DISCUSION.....	35
4. CONCLUSIONES.....	57
5. RECOMENDACIONES.....	59
6. REFERENCIAS.....	60
7. ANEXOS.....	63

Listado de Figuras

Figura		
Figura 1	Localización Vereda la Cabaña, Timbío Cauca.	23
Figura 2	Cepas seleccionadas	25
Figura 3	Procesos de laboratorio para reactivación de cepas	25
Figura 4	Procesos de laboratorio para evaluación de solubilización de fósforo	26
Figura 5	Proceso de agitación y preparación para los ensayos	27
Figura 6	Establecimiento en campo	28
Figura 7	Localización aleatoria de los tratamientos en campo	29
Figura 8	Aplicación de las cepas seleccionadas	30
Figura 9	Diámetro del tallo: medida con pie de rey digital	31
Figura 10	Número de hojas: medida a conteo	32
Figura 11	Índice de vegetación: medida con TRIMBLEGREENSEEKER	32
Figura 12	Valor promedio consolidado en las cinco semanas para cada tratamiento por variable	34

Lista de Tablas

Tabla		
Tabla 1	Descripción de los tratamientos	28
Tabla 2	Variables de crecimiento evaluadas en las plantas	30
Tabla 3	Valores promedio consolidados para las 5 semanas de cada una de las variables por tratamiento	33
Tabla 4	Valores promedio de cada una de las variables por tratamiento para la semana 1	35
Tabla 5	Análisis de varianza variables semana 1	36
Tabla 6	Prueba de Tukey: Diámetro de tallo por planta (semana 1)	37
Tabla 7	NDVI (semana 1)	37
Tabla 8	Número de hojas por planta (semana 1)	38
Tabla 9	Promedios de la semana 2	39
Tabla 10	Análisis de varianza variables semana 2	39
Tabla 11	Prueba de Tukey: Diámetro de tallo por planta (semana 2)	40
Tabla 12	NDVI (semana 2)	40
Tabla 13	Número de hojas por planta (semana 2)	42
Tabla 14	Promedios de la semana 3	42
Tabla 15	Análisis de varianza variables semana 3	43
Tabla 16	Prueba de Tukey: Diámetro de tallo por planta (semana 3)	44
Tabla 17	NDVI (semana 3)	44
Tabla 18	Número de hojas por planta (semana 3)	45
Tabla 19	Promedios de la semana 4	46
Tabla 20	Análisis de varianza variables semana 4	46
Tabla 21	Prueba de Tukey: Diámetro de tallo por planta (semana 4)	47
Tabla 22	NDVI (semana 4)	48
Tabla 23	Número de hojas por planta (semana 4)	48
Tabla 24	Promedios de la semana 5	49
Tabla 25	Análisis de varianza variables semana 5	50

Tabla		
Tabla 1	Descripción de los tratamientos	28
Tabla 2	Variables de crecimiento evaluadas en las plantas	30
Tabla 3	Valores promedio consolidados para las 5 semanas de cada una de las variables por tratamiento	33
Tabla 26	Prueba de Tukey: Diámetro de tallo por planta (semana 5)	51
Tabla 27	NDVI (semana 5)	51
Tabla 28	Número de hojas por planta (semana 5)	51

RESUMEN

El interés en el estudio de bacterias con capacidad para solubilizar el fósforo en suelos surge debido a la limitante que representa este nutriente para la producción agrícola en el departamento del Cauca. No obstante, dicha restricción trasciende el ámbito regional, ya que el fósforo es considerado un elemento esencial, pero de baja disponibilidad en la mayoría de los suelos agrícolas a nivel global. Estos suelos, en su mayoría ácidos, presentan problemas de disponibilidad de fósforo debido a sus propiedades fisicoquímicas, lo que impide que el fósforo presente en el suelo esté accesible para las plantas.

El propósito de este proyecto es evaluar microorganismos con la capacidad de solubilizar fósforo, aumentando así su disponibilidad para las plantas. Estos microorganismos podrían ser empleados como inoculantes biológicos, promoviendo el crecimiento de las plantas de maíz mediante el suministro eficiente de fósforo. Además, se pretende encontrar alternativas biotecnológicas que reduzcan la dependencia de fertilizantes químicos fosfatados, minimizando así el impacto ambiental negativo sobre los agroecosistemas, y fomentando una agricultura más sostenible y responsable.

Para llevar a cabo este trabajo, se realizó un ensayo experimental que incluyó la inoculación de dos cepas bacterianas denominadas End-F34 y Claudia 7, con capacidad para solubilizar fósforo (BSP - Bacterias solubilizadoras de Fósforo) en las plantas de maíz, con y sin la aplicación de fuentes químicas de fósforo (Fosfato Diamónico -DAP). El experimento también incluyó un grupo de control que no recibirá fertilización ni inoculación bacteriana. Las variables evaluadas durante 5 semanas fueron diámetro del tallo de la planta, número de hojas, e índice de vegetación (NDVI).

Los resultados más relevantes indicaron que las plantas fertilizadas con DAP e inoculadas con la cepa Claudia 7 obtuvieron mejor desempeño en las tres variables evaluadas, alcanzando un diámetro promedio de 11.01 mm, 6.09 hojas por planta y un NDVI de 0.705, lo que puede evidenciar un efecto sinérgico entre el fertilizante químico y la actividad biológica de la cepa. Por otro lado, plantas fertilizadas con DAP e inoculadas con la cepa End-F34 mostraron el valor más alto de NDVI (0.72), lo que sugiere una mejora fisiológica de la planta, posiblemente vinculada a la eficiencia fotosintética inducida por la bacteria. En contraste, los tratamientos que utilizaron únicamente las bacterias sin fertilización química

(T3, T4 y T5) no presentaron diferencias significativas respecto al control absoluto (T1), evidenciando que el uso exclusivo de BSP puede requerir de un soporte inicial de fósforo disponible para mostrar mayor efectividad en etapas tempranas del cultivo. Sin embargo, el análisis estadístico no evidenció diferencias estadísticas significativas.

Palabras clave: Solubilizar fosforo, biofertilizantes, agricultura sostenible, Suelos andinos

ABSTRAC

The interest in studying bacteria with the ability to solubilize phosphorus in soils arises from the limitation that this nutrient represents for agricultural production in the department of Cauca. However, this restriction goes beyond the regional scope, since phosphorus is considered an essential element but with low availability in most agricultural soils worldwide. These soils, mostly acidic, present problems of phosphorus availability due to their physicochemical properties, which prevent the phosphorus present in the soil from being accessible to plants.

The purpose of this project is to evaluate microorganisms with the capacity to solubilize phosphorus, thereby increasing its availability to plants. These microorganisms could be used as biological inoculants, promoting the growth of maize plants through the efficient supply of phosphorus. In addition, the project seeks to identify biotechnological alternatives that reduce dependence on chemical phosphate fertilizers, thus minimizing the negative environmental impact on agroecosystems and fostering a more sustainable and responsible agriculture.

To carry out this work, an experimental trial was conducted that included the inoculation of two bacterial strains, named End-F34 and Claudia 7, with the capacity to solubilize phosphorus (PSB – Phosphate-Solubilizing Bacteria) in maize plants, with and without the application of chemical sources of phosphorus (Diammonium Phosphate – DAP). The experiment also included a control group that did not receive fertilization or bacterial inoculation. The variables evaluated over five weeks were stem diameter, number of leaves, and vegetation index (NDVI).

The most relevant results indicated that plants fertilized with DAP and inoculated with the strain Claudia 7 achieved the best performance in the three variables evaluated, reaching an average stem diameter of 11.01 mm, 6.09 leaves per plant, and an NDVI of 0.705, which may reflect a synergistic effect between the chemical fertilizer and the biological activity of the strain. On the other hand, plants fertilized with DAP and inoculated with the strain End-F34 showed the highest NDVI value (0.72), suggesting a physiological

improvement in the plant, possibly linked to photosynthetic efficiency induced by the bacterium. In contrast, treatments that used only the bacteria without chemical fertilization (T3, T4, and T5) did not show significant differences compared to the absolute control (T1), evidencing that the exclusive use of PSB may require an initial support of available phosphorus to display greater effectiveness in early stages of the crop. However, statistical analysis did not reveal significant differences.

Keywords: Phosphorus solubilization, biofertilizers, sustainable agriculture, Andean soils.

1. INTRODUCCIÓN:

El fósforo (P) es un nutriente esencial para las plantas, ya que participa en procesos fundamentales de su metabolismo. Forma parte de los ácidos nucleicos, fosfolípidos y coenzimas, además de intervenir en moléculas energéticas como el ATP, indispensables para la división celular, la fotosíntesis y la formación de estructuras vegetales (Newton et al., 2000). Por lo tanto, su disponibilidad en el suelo es determinante para el crecimiento y productividad de los cultivos.

No obstante, la dinámica del fósforo en el suelo presenta limitaciones importantes. En suelos ácidos característicos de amplias zonas del departamento del Cauca gran parte del fósforo aplicado como fertilizante se inmoviliza rápidamente en formas no disponibles para las plantas, tales como fosfato de hierro (FePO_4) y fosfato de aluminio (AlPO_4), lo que reduce drásticamente su eficiencia (Rodríguez & Fraga, 1999). Esta baja disponibilidad obliga a los agricultores a incrementar las dosis de fertilizantes fosforados, lo cual no solo eleva los costos de producción, sino que también genera impactos ambientales negativos, como la eutrofización de cuerpos de agua y alteraciones en la microbiota del suelo (Bravo, 2013).

En este contexto, la fertilidad de los suelos en el departamento del Cauca, Colombia, se caracteriza por una alta variabilidad condicionada por factores climáticos, topográficos y de uso del suelo, que en conjunto limitan de manera significativa la producción agrícola (Bastidas, 2016). Estos suelos, en su mayoría de origen andisol, presentan acidez elevada, bajos niveles de materia orgánica y una limitada disponibilidad de nutrientes esenciales, entre ellos el fósforo, cuya deficiencia se considera uno de los principales factores que afectan el crecimiento y rendimiento de cultivos como el maíz (*Zea mays*) en la región (Riascos, 2024).

De manera particular, en el municipio de Timbío, Cauca, área de estudio de la presente investigación, los suelos presentan un porcentaje de humedad higroscópica de 10.37%, valor por debajo del rango normal (15 a 25%). Su textura es franco-arenosa, con un alto contenido de arena (67.06%), lo que se traduce en baja retención de humedad debido al tamaño de las partículas. Además, el pH los clasifica como suelos fuertemente ácidos (Silva,

2000). Estas condiciones restringen la disponibilidad de fósforo y, en consecuencia, limitan el desarrollo óptimo de los cultivos establecidos en la zona.

Frente a esta problemática, las bacterias solubilizadoras de fósforo (PSB, por sus siglas en inglés) representan una alternativa biotecnológica sostenible para mejorar la disponibilidad de fósforo en suelos ácidos como los de Timbío. Estas bacterias, que hacen parte de los microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR), poseen la capacidad de liberar fósforo de compuestos insolubles mediante la producción de ácidos orgánicos, enzimas fosfatasas y sustancias quelantes (Rosas et al., 2006). De manera complementaria, pueden estimular el crecimiento vegetal mediante la síntesis de fitohormonas y metabolitos secundarios (Patiño, 2010). Cabe resaltar que varias de estas bacterias presentan afinidad por ambientes ácidos, lo que las hace particularmente viables y adaptadas para suelos con características como las de esta región.

Diversos estudios han demostrado la eficacia de las PSB en la mejora de la absorción de fósforo y en el incremento del rendimiento agrícola en diferentes cultivos (Ahemad & Kibret, 2014). En este marco, la presente investigación busca evaluar el impacto de la inoculación de dos cepas bacterianas solubilizadoras de fósforo (Claudia 7 y End-F34) en el crecimiento y desarrollo de plantas de maíz bajo condiciones controladas de invernadero. Para ello, se llevó a cabo un experimento de microcosmos que incluyó la caracterización de las cepas bacterianas, su inoculación en plantas de maíz y la evaluación de variables agronómicas y nutricionales.

De esta manera, el estudio pretende aportar soluciones prácticas y sostenibles que permitan optimizar el uso del fósforo en suelos ácidos del Cauca. Se propone una evaluación experimental orientada a determinar el impacto real de las PSB bajo condiciones controladas, promoviendo prácticas agrícolas ambientalmente responsables y con beneficios potenciales tanto para la productividad del cultivo como para la conservación del ecosistema agrícola local.

1.1.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La situación general de la fertilidad de los suelos en el Cauca se caracteriza por una notable variabilidad debido a las diversas condiciones climáticas, topográficas y los diferentes usos y manejo del suelo. Estos suelos presentan limitaciones importantes como acidez elevada, baja saturación de bases y escaso contenido de materia orgánica, factores que afectan negativamente la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas. Además, se observa una tendencia a la degradación del suelo, especialmente en áreas con prácticas agrícolas intensivas y manejo inadecuado, lo que subraya la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible para mejorar y conservar la fertilidad del suelo en la región (Bastidas, 2016).

Dentro de este contexto, el municipio de Timbío (Cauca) no es ajeno a esta problemática. Sus suelos, en su mayoría de origen volcánico y con características ácidas, presentan una baja disponibilidad de fósforo, lo cual afecta de manera directa la producción de maíz (*Zea mays*), cultivo de gran importancia económica y alimentaria para la zona. Este nutriente es considerado uno de los principales elementos limitantes para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que participa en procesos esenciales como la formación de ácidos nucleicos, fosfolípidos y compuestos energéticos (ATP). Sin embargo, debido a las características fisicoquímicas de los suelos de la zona, especialmente su pH ácido, gran parte del fósforo presente se encuentra en formas no disponibles para la absorción vegetal. En consecuencia, los agricultores recurren a la aplicación de fertilizantes fosforados para suplir las necesidades nutricionales del maíz, lo que incrementa los costos de producción y genera impactos ambientales negativos, tanto en el suelo como en los ecosistemas acuáticos (Bravo, 2013).

Por lo tanto, la baja disponibilidad de fósforo en los suelos de Timbío Cauca constituye un factor limitante para el desarrollo del cultivo de maíz y plantea la necesidad de evaluar alternativas biológicas, como el uso de bacterias solubilizadoras de fósforo, que contribuyan a mejorar la nutrición de las plantas de manera sostenible y con menor impacto ambiental.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los suelos del departamento del Cauca, predominantemente de origen andisol, presentan características particulares como altos contenidos de hierro y aluminio, así como un pH ácido, condiciones que limitan la disponibilidad de nutrientes esenciales para los cultivos (Bastidas, 2016). Esta situación se acentúa en un territorio con gran diversidad de pisos térmicos, lo que genera variaciones en fertilidad, profundidad y vocación de uso de los suelos (Lewis Torres, 2015). En consecuencia, la mayoría de los suelos del Cauca están clasificados como de baja o muy baja fertilidad: cerca del 32% se encuentran en la primera categoría, un 25% en la segunda y menos del 3% muestran una fertilidad alta (IGAC, 2005-2009).

En este contexto, el municipio de Timbío Cauca refleja de manera particular dichas limitaciones, lo cual impacta directamente la producción de maíz, cultivo fundamental para la seguridad alimentaria y la economía local. Frente a esta problemática, se hace necesario explorar alternativas sostenibles que permitan mejorar la disponibilidad de nutrientes, en especial fósforo, dentro de los sistemas agrícolas de la región.

Una de las alternativas más prometedoras surge del avance de la biotecnología microbiana. Diversos estudios han demostrado que los microorganismos solubilizadores de fósforo, incluidos dentro del grupo de promotores del crecimiento vegetal (PGPR), pueden contribuir a mejorar la disponibilidad de este nutriente en el suelo. Estos organismos transforman el fósforo no disponible en formas asimilables para las plantas mediante la producción de enzimas y sustancias quelatantes (Rosas et al., 2006). Adicionalmente, aportan al desarrollo vegetal a través de la síntesis de fitohormonas y otros metabolitos benéficos (Patiño, 2010). La eficacia de estas bacterias ha sido documentada en diferentes cultivos, mostrando incrementos en la eficiencia de los fertilizantes aplicados y mejoras en los rendimientos agrícolas (Ahemad & Kibret, 2014).

Con base en lo anterior, la presente investigación propone evaluar el efecto de bacterias solubilizadoras de fósforo en la producción de maíz variedad ICA 305, cultivado en condiciones controladas en la vereda La Cabaña, municipio de Timbío, Cauca. Se plantea que estas cepas pueden constituirse en una estrategia biotecnológica complementaria al uso de fertilizantes convencionales, favoreciendo un manejo más eficiente del fósforo,

reduciendo la dependencia exclusiva de insumos químicos y contribuyendo a la sostenibilidad agrícola.

Finalmente, el trabajo se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente con el ODS 2 (Hambre cero), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima), al promover prácticas agrícolas sostenibles que favorecen la seguridad alimentaria y la protección del medio ambiente (ONU, 2015).

OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto de la inoculación de bacterias solubilizadoras de fósforo en el crecimiento y desarrollo de plantas de maíz (*Zea mays L.*) en un entorno controlado de invernadero, en el municipio de Timbío, Cauca.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reactivar bacterias identificadas previamente con potencial para solubilizar fósforo en el suelo en cultivos de maíz (*Zea Mays*).
- Cuantificar el efecto de la inoculación con bacterias con potencial para solubilizar de fósforo en el crecimiento de plantas de maíz (*Zea Mays*) en invernadero.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

Este documento está estructurado en cuatro capítulos donde se evidencian cada uno de los procesos realizados durante la investigación. El capítulo I presenta la baja disponibilidad de fósforo en los suelos del departamento del Cauca, lo cual afecta negativamente la producción de maíz, debido a la problemática se evaluó el impacto de la inoculación de dos cepas solubilizadoras de fosforo (Claudia 7 y End-34) de igual manera contextualiza la formulación del problema, la justificación y los objetivos propuestos.

El capítulo II expone el marco conceptual y teórico, abordando los antecedentes en estudios previos alrededor de bacterias solubilizadoras de fosforo, teniendo en cuenta la importancia del fósforo en el suelo y factores que afectan su solubilidad.

De igual manera describe la metodología empleada, sobre la reactivación y evaluación de las cepas seleccionadas (Claudia 7 y End-34) en el trabajo de campo detallando la ubicación geográfica, los tratamientos experimentales y la evaluación de variables de crecimiento.

El capítulo III representa el consolidado de los resultados obtenidos durante las 5 semanas para cada uno de los tratamientos, donde se realizaron análisis de varianza en las variables de numero de hojas, diámetro de tallo y NDVI.

El capítulo IV describe cada una las conclusiones, recomendaciones y referencias bibliográficas derivadas del estudio.

En conjunto, este documento no solo organiza de manera sistemática los procedimientos y hallazgos, sino que también respalda una alternativa de fertilización más sostenible para productores y comunidades del departamento del Cauca.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

El cultivo de maíz (*Zea mays L.*) y la importancia del fósforo en su nutrición

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial debido a su amplio uso en la alimentación humana, animal e industrial. En América Latina, ocupa un papel fundamental en la dieta básica y en la economía agrícola, siendo considerado un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria (FAO, 2018). En Colombia, el maíz se produce en diversas regiones, destacándose el departamento del Cauca por sus condiciones agroecológicas y su importancia en la economía campesina y de pequeña escala (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR, 2020).

El rendimiento del maíz depende en gran medida de la disponibilidad de nutrientes esenciales, entre los cuales el fósforo (P) juega un papel clave. Este macronutriente interviene en procesos fundamentales como la fotosíntesis, la transferencia de energía (ATP y ADP), la síntesis de ácidos nucleicos, el desarrollo radicular y la maduración de los granos (Hernández et al., 2015). La deficiencia de fósforo en el cultivo de maíz se traduce en un retraso en la emergencia, bajo crecimiento radicular, menor eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, y reducción significativa en la producción de biomasa y rendimiento de grano (Viveros-Viveros et al., 2021).

En suelos ácidos y de origen volcánico, como los presentes en el departamento del Cauca, el fósforo aplicado como fertilizante tiende a quedar fijado en formas insolubles (fosfatos de hierro y aluminio), lo cual reduce su disponibilidad para el cultivo de maíz (Rodríguez & Fraga, 1999). Esto obliga a los agricultores a aplicar dosis altas de fertilizantes fosfatados para suplir las necesidades del cultivo, incrementando los costos de producción y generando riesgos ambientales. Frente a esta problemática, el uso de microorganismos solubilizadores de fósforo surge como una alternativa sostenible para mejorar la nutrición fosforada del maíz y contribuir a un manejo más eficiente de los recursos del suelo.

El fósforo en el suelo

El fósforo (P) es considerado uno de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, dado a que sus funciones no pueden ser reemplazadas por ningún otro mineral. Además, es considerado junto con el Nitrógeno y el Potasio, un macronutriente, ya que las plantas requieren cantidades relativamente grandes de este mineral para sus funciones básicas. Habitualmente la concentración total de P en los cultivos varía de 0.1 a 0.5 % y es absorbido por las plantas en forma fosfato (P_2O_5) (Múnera y Meza, 2012).

El P ingresa a la planta generalmente a través de las capas externas de las células de los pelos radiculares y de la punta de la raíz, aunque también la absorción se produce con la intervención biológica de microorganismos del suelo como las micorrizas, que son hongos que crecen en asociación con las raíces de muchos cultivos. El P es absorbido por la planta principalmente como ion orto fosfato primario ($H_2PO_4^-$), pero también se absorbe como ion fosfato secundario ($HPO_4^{=}$), la absorción de esta última forma se incrementa a medida que se sube el pH. Una vez dentro de la raíz, el P puede quedarse almacenado en esta área o puede ser transportado a las partes superiores de la planta. A través de varias reacciones químicas el P se incorpora a compuestos orgánicos como ácidos nucleicos (ADN y ARN), fosfoproteínas, fosfolípidos, enzimas y compuestos fosfatados ricos en energía como la adenosina trifosfato (ATF). De esta forma el P se mueve a otras partes de la planta donde estará disponible para más reacciones (Múnera y Meza, 2012).

Aspectos químicos y formas minerales del fósforo del suelo en regiones tropicales.

Muchos de los suelos en las regiones tropicales, tienen un nivel muy bajo de fosforo aprovechable. Los rendimientos de los cultivos generalmente son muy bajos, a menos que se apliquen fertilizantes fosfatados, con el fin de aumentar el nivel de fósforo aprovechable en el suelo, es necesario añadir altas cantidades de fertilizantes fosfatados a los suelos rojos y a los derivados de cenizas volcánicas. Estos suelos tienen la capacidad de inmovilizar grandes cantidades de fertilizante fosfatados. El desarrollo de prácticas de fertilización seguras y la interpretación de análisis de suelos para fósforo, deben tener en cuenta la química y la reacción del fósforo en el suelo. (Múnera y Meza, 2012)

El fósforo (P) desempeña funciones bioquímicas y fisiológicas esenciales en las plantas, ya que participa en procesos como la transferencia de energía (ATP), la fotosíntesis, la síntesis de ácidos nucleicos, la división celular y el desarrollo radicular. Su deficiencia es común en suelos ácidos, alcalinos o con alta fijación de P, como los Andisoles, limitando su disponibilidad para las plantas (Múnera y Meza, 2012). Para evitar la deficiencia de P en los suelos agrícolas, los fertilizantes fosfatados son ampliamente aplicados. Sin embargo, una parte significativa de P añadido se inmoviliza rápidamente como formas insolubles y se hace no disponible para las plantas (Goldstein, 1986). La movilización de P por la acción microbiana es una forma posible de proporcionar P soluble a las mismas y a las plantas ya un componente importante de estas bacterias se encuentra asociadas a las raíces vegetales (sección de asociación y colonización de los tejidos de las plantas).

Ante esta problemática, una estrategia sostenible y biotecnológica es el uso de bacterias solubilizadoras de fósforo (BSP), las cuales mejoran la disponibilidad del P al transformarlo desde formas inorgánicas insolubles (como el fosfato de calcio, hierro o aluminio) hacia formas asimilables por la planta. Esto lo logran a través de la producción de ácidos orgánicos, enzimas fosfatasa, fitasa y compuestos quelantes, promoviendo el crecimiento vegetal y reduciendo la dependencia de fertilizantes fosfatados sintéticos (Ramos E., et al., 2024).

Fijación del fósforo en suelos ácidos.

Muchos investigadores han realizado ensayos para comprender el mecanismo de fijación del fósforo en los suelos ácidos. Sin embargo, los procesos que intervienen en este fenómeno aún no se conocen completamente. Sin embargo, se ha identificado que la retención de fósforo se debe a factores de naturaleza química, física y biológica. Entre ellos, se destacan las altas concentraciones de hierro y aluminio, elementos característicos de este tipo de suelos, que reaccionan con los iones fosfato formando compuestos insolubles y poco disponibles para la planta. En estos suelos se presenta una alta fijación de fósforo, la cual se atribuye a la formación de ortofosfatos complejos de hierro y aluminio (Soto, 1961).

Es importante aclarar que los procesos bioquímicos de fijación y solubilización son diferentes. La fijación, en algunos contextos, puede estar relacionada con el ciclo del nitrógeno, mientras que la solubilización del fósforo se refiere a procesos químicos o microbiológicos que transforman compuestos insolubles en formas disponibles para la planta. En el caso del fósforo, la solubilización involucra mecanismos que liberan el nutriente desde compuestos fijados, haciéndolo accesible para la absorción radicular.(Soto, 1961).

Factores que afectan la solubilidad de fósforo en el suelo.

Existen varios factores que influyen en la solubilidad del suelo. Por ejemplo, suelos con una alta cantidad de arcilla fijan más fósforo que aquellos que contienen menos arcilla, por otra parte encontramos otros suelos con contenidos altos de ciertas arcillas como la caolinita, óxidos e hidróxidos de Fe y Al (comunes en las regiones con alta precipitación y temperatura), y arcillas amorfas como alófana, imogolita y complejos humus-Al (comunes en suelos formados de ceniza volcánica), son suelos que retienen proporciones altas de fósforo en comparación a otros suelos como los oxisoles y andisoles. Sin embargo, sin importar el tipo de arcilla presente, el fósforo aplicado al suelo pasa rápidamente a formas menos disponibles. (Guzman, 2011).

Los suelos que han recibido por varios años más fósforo que la cantidad removida en los cultivos presentando un incremento en los niveles de disponibilidad de fósforo lo suficiente para reducir su aplicación exógena pero estas reservas que se encuentra en el suelo de forma no disponible para la planta. Además, existe una dependencia muy estrecha entre el pH del suelo y la presencia de formas asimilables y formas bloqueadas de fósforo para la nutrición vegetal. En los suelos de pH ácido, el fósforo no asimilable suele presentarse en forma de fosfatos de hierro y aluminio. En los suelos de pH neutro, en cambio, existen fosfatos de calcio soluble, pero con un pH superior a 7.5 aumentan las formas insolubles del fósforo, no son asimilables por las plantas. (Guzman, 2011).

Fósforo activo

El fósforo activo es el que se encuentra en la fase sólida del suelo, es que compone la solución del suelo, en donde es absorbido por las plantas. Conforme la concentración de fosfatos en la solución decrece, parte del fósforo activo es descargado a la solución, debido

a que la cantidad de este es muy pequeña, el fósforo activo es la principal fuente de fósforo disponible para las cosechas (Carbajal, 2002).

La facilidad con que el fósforo activo pueda ser liberado a la solución del suelo depende de que un suelo sea fértil o no con respecto al fósforo. La forma de fósforo activo puede contener una cantidad de fósforo inorgánico, el que está adsorbido en sitios activos de la superficie de las partículas de suelo. Este fósforo reacciona con elementos como el calcio, y aluminio, para formar algunos sólidos solubles. Por otro lado, también puede contener fósforo orgánico que es fácilmente mineralizado (Carbajal, 2002).

Estudios previos alrededor de Bacterias Solubilizadoras de fósforo

La búsqueda de bacterias promotoras del crecimiento vegetal con potencial solubilizador de fósforo asociadas al pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) y *Brachiaria* (*Brachiaria decumbens*) se enfocó en el análisis de las rizosferas de estos pastos en la región del Cauca durante el año 2021. En este estudio se identificaron 20 cepas de bacterias solubilizadoras de fósforo, de las cuales dos destacaron por su alta capacidad de solubilización. Estas cepas fueron seleccionadas para ensayos de inoculación en maíz, con el fin de evaluar su efecto en el crecimiento vegetal y verificar si los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio se reproducen en campo (Rivera, 2021). Los ensayos demostraron que la inoculación con dichas cepas promovió un aumento significativo en variables agronómicas como altura de planta, diámetro del tallo y producción de biomasa, evidenciando que el uso de bacterias solubilizadoras de fósforo constituye una estrategia eficaz para mejorar el desarrollo del maíz bajo condiciones locales.

En otra investigación, se estudió la caracterización y evaluación de bacterias *Pseudomonas spp.* solubilizadoras de fósforo en la rizósfera de maíz (*Zea mays* L.) en diversas provincias de Ecuador. (Pincay Verdezoto, A. K. (2014). Aislaron 24 cepas de *Pseudomonas* de suelos con y sin manejo agrícola y se realizaron pruebas in vitro e invernadero para medir su capacidad de solubilizar fósforo. Los resultados demostraron que estas bacterias tienen un alto potencial para mejorar la disponibilidad de fósforo en el suelo, lo cual es crucial para la producción agrícola, especialmente en suelos donde este nutriente es limitado.

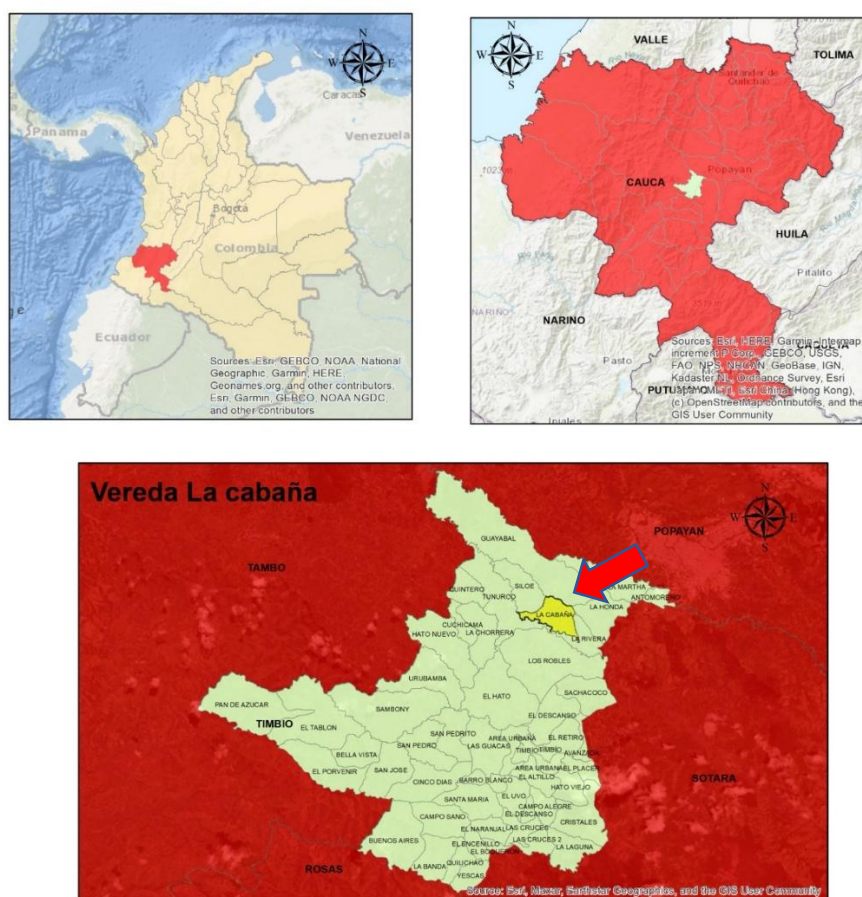
Por otro lado, un estudio en el Noroeste Argentino se enfocó en la identificación y caracterización de bacterias solubilizadoras de fosfatos en suelos de tres localidades. (García, R. A., Lovaisa, N. C., & Ulla, E. L. (2015). Se aislaron bacterias como *Pseudomonas* spp., *Bacillus subtilis*, y *Serratia fonticola*, que mostraron alta eficiencia en la solubilización de fosfatos. Se evaluó el efecto de estas bacterias en el crecimiento de maíz, observándose un incremento significativo en la longitud y peso seco de tallo y raíz en plantas inoculadas, lo que sugiere su potencial uso como bioinoculantes para mejorar la eficiencia del uso de fósforo en la agricultura.

2.2 METODOLOGIA

LOCALIZACION

El montaje del invernadero y el establecimiento de los tratamientos para este estudio se establecieron en la finca San Martín, Vereda la Cabaña municipio de Timbío, a 7 km al suroeste del casco urbano del municipio, con una altitud de 1.737 msnm, a 2.40597° N latitud norte y 76.6586° O longitud oeste (Figura 1). Timbío se encuentra a 13km al sur de Popayán, ciudad capital del departamento del Cauca, del cual hace parte del área metropolitana de la ciudad.

Figura 1. Localización Vereda la Cabaña, Timbío Cauca.



Fuente: Elaboración propia usando Software QGIS (2025).

Para cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto, se desarrolló una metodología cuantitativa, apoyada en un proceso experimental que permitió establecer el

potencial de solubilización de fósforo a nivel de vivero. Las etapas de la metodología se describen a continuación:

Etapas 1: Revisión bibliográfica

En esta fase se realizó una revisión bibliográfica orientada a comprender los mecanismos de interacción entre bacterias solubilizadoras de fósforo (BSP) y las plantas huésped, con énfasis en los procesos rizosféricos y la movilización de formas insolubles de fósforo hacia formas asimilables. Las BSP actúan mediante la secreción de ácidos orgánicos, producción de sideróforos, enzimas fosfatasas y otras sustancias que modifican el pH del entorno y liberan fósforo disponible para la planta, lo cual las convierte en una herramienta clave dentro de la biotecnología agrícola sostenible (Ramos E., et al., 2024).

Asimismo, se revisaron trabajos previos realizados por los autores, en los que se evidencian los avances en la identificación y evaluación de cepas con potencial solubilizador en condiciones locales (Muñoz, V., 2021; Rivera, E., 2021).

Etapas 2: Selección y manejo de cepas bacterianas

A partir de los resultados de las investigaciones previas hechas por Muñoz, V. (2021) y Rivera, E. (2021), se seleccionaron dos cepas bacterianas que obtuvieron los mejores resultados con alta capacidad solubilizadora de fósforo: Claudia 7 (*Enterobacter sp.*), asociada en pasto Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum*), y Brachiaria (*Brachiaria decumbens*). y End-F34 (*Enterobacter sp.*), . En cultivos de café (*Coffea arabica*) Variedad Borbón (Figura 2). El género *Enterobacter sp.* pertenece a la familia *Enterobacteriaceae* y está conformado por bacterias Gram negativas, en forma de bacilos rectos, móviles por flagelos peritricos y facultativamente anaerobias (Janda & Abbott, 2006), cuya pared celular presenta una delgada capa de peptidoglicano recubierta por una membrana externa con lipopolisacáridos, lo que les confiere capacidad de adaptación y resistencia en diversos ambientes (Podschun & Ullmann, 1998).

Figura 2. *Cepas seleccionadas*

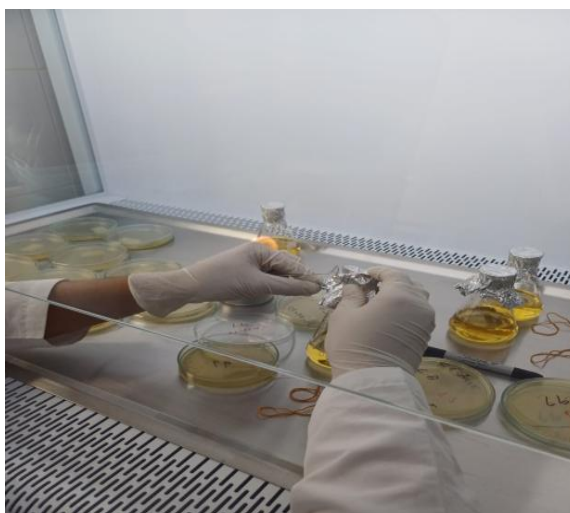


Fuente: autores (2025)

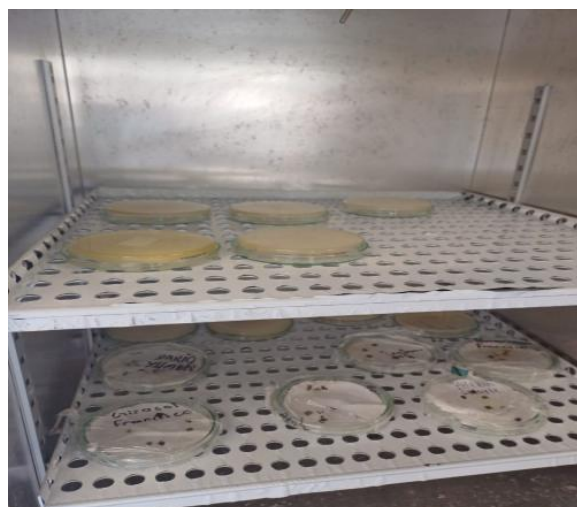
Etapa 3: Reactivación de cepas solubilizadoras de fósforo

En la Corporación Universitaria Comfacaucá se contó con un consorcio de bacterias solubilizadoras de fósforo conservadas en glicerol al 20% a -20 °C. Las cepas *Claudia 7* y *End-F34* fueron reactivadas en medio sólido LB, compuesto por 10 g/L de triptona, 5 g/L de extracto de levadura y 10 g/L de NaCl, solidificado con 15 g/L de agar. Se sembró una alícuota de las bacterias en placas e incubaron a 28 °C durante 72 horas. (Figura 3).

Figura 3. Procesos de laboratorio para reactivación de cepas



A



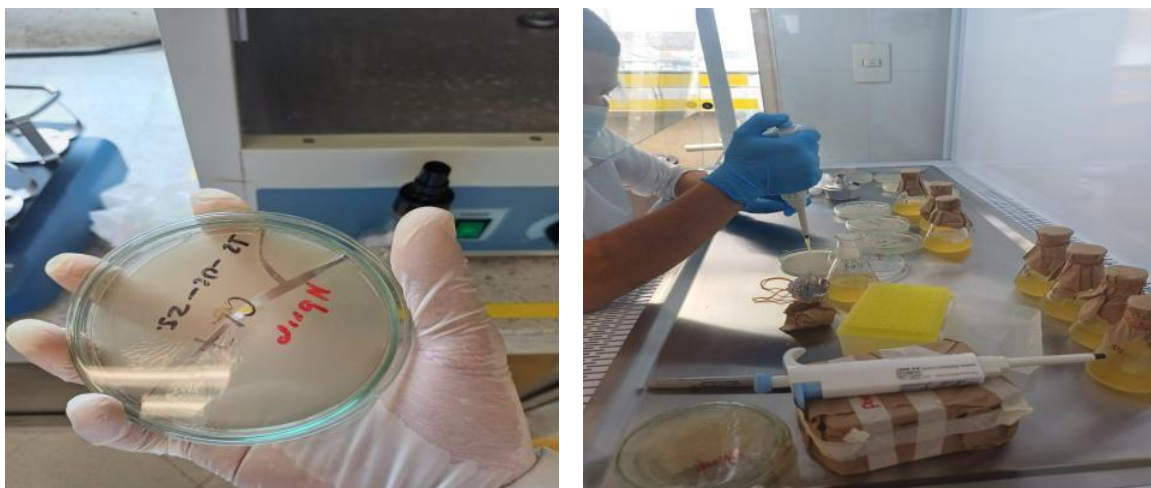
B)

A) Reactivación Medio solido LB. B) Incubadora. Fuente: los autores (2025).

Etapla 4: Evaluación de la solubilización de fósforo

Una vez reactivadas, las cepas fueron evaluadas en medio de cultivo NBRIP suplementado con fosfato tricálcico $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$, incubándose a 28 °C durante 72 horas. La capacidad solubilizadora fue confirmada mediante la formación de halos claros de solubilización alrededor de las colonias. Se calculó el índice de solubilización (IS) como el cociente entre el diámetro total del halo (colonia + halo) y el diámetro de la colonia, siguiendo el método descrito por (Nautiyal (1999), siendo este un indicador cuantitativo de la eficiencia solubilizadora. (Figura 4).

Figura 4. Procesos de laboratorio para reactivación de cepas



A

B

A Medio Cultivo NBRIP. B) Aplicación Cepas medio cultivo. Fuente: los autores (2025).

Etapla 5: Cultivo en medio líquido y preparación para inoculación

Las cepas fueron cultivadas en medio líquido LB las cuales se dejaron en un agitador orbital y en incubación durante 5 días hasta alcanzar la fase tardía. Las suspensiones bacterianas fueron ajustadas en el espectrofotómetro a una densidad óptica de 0,4 a 600 nm (DO_{600}), correspondiente a una concentración aproximada de 4×10^7 UFC/mL. Una vez estandarizadas, se mantuvieron en refrigeración a 4 °C hasta el momento de su aplicación en campo, con el fin de preservar la viabilidad y estabilidad celular. (Figura 5).

Figura 5. Proceso de preparación para los ensayos



Fuente: los autores (2025).

Etapas 6: Establecimiento del ensayo en campo

Se escogió un área plana de la finca para la instalación del montaje para la cobertura del experimento con polisombra, garantizando condiciones homogéneas para los tratamientos (figura 6A). De la misma finca se tomó suelo para llenar las bolsas de 1kg en donde se sembraron las semillas de maíz. Dicho suelo fue tamizado para eliminar residuos y dar condiciones homogéneas para la germinación (Figura 6B). De este suelo se obtuvo una muestra homogénea que fue enviada a los laboratorios de Agrosavia (Centro experimental Tibaitatá, Mosquera, Cundinamarca) para su caracterización en términos de pH, textura, materia orgánica y concentración de fósforo disponible (Análisis completo en Anexo 2).

Figura 6. Establecimiento en campo



A

B

A Estructura del vivero con Polisombra B) Embolsado para posterior siembra.

Fuente: autores (2025)

Diseño experimental y tratamientos

Se montó un diseño completamente al azar (DCA) con ocho tratamientos (Tabla 1) y tres repeticiones por tratamiento, totalizando 24 unidades experimentales, las cuales se establecieron en campo de manera aleatoria (Figura 7). La semilla utilizada fue Maíz amarillo ICA V-305, de la marca SGA. Las bacterias seleccionadas para el estudio fueron previamente aisladas de rizósferas de diferentes especies vegetales: la cepa Claudia 7 (CL7) proviene de kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), una gramínea monocotiledónea, mientras que la cepa End-34 fue aislada de la rizósfera de una planta dicotiledónea. Esta combinación permitió evaluar la capacidad de ambas cepas para adaptarse a un cultivo distinto a su origen, en este caso, el maíz, lo que ofrece un panorama sobre su versatilidad y potencial de uso agrícola.

Tabla 1.

Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Descripción
T1:	Testigo absoluto
T2:	Fertilización con DAP (50 kg P_2O_5 /ha)
T3:	Inoculación con cepa Claudia 7
T4:	Inoculación con cepa End-F34
T5:	Inoculación con cepa Claudia 7 + cepa End-F34
T6:	Fertilización DAP + Inoculación cepa Claudia 7
T7:	Fertilización DAP + Inoculación cepa End-F34
T8:	Fertilización DAP + Inoculación cepa End-F34 + Claudia 7

Fuente: autores (2025)

Figura 7. Localización aleatoria de los tratamientos en campo

DISTRIBUCION DE TRATAMIENTOS		
T6 R2 (D7)	T3R1 (7)	T1 = TESTIGO (T) T2 = DAP (D) T3 = CL7 (7) T4 = ENDO34 (34) T5 = CL7 + ENDO34 (7.34) T6 = DAP + CL7 (D.7) T7 = DAP + ENDO34 (D.34) T8 = DAP + CL7 + ENDO34 (D.7.34)
T1 R3 (T)	T2R2 (D)	
T5 R3 (7.34)	T7R3 (D.34)	
T4 R3 (34)	T7R1 (D.34)	
T8 R3 (D.7.34)	T8R2 (D.7.34)	
T1R2 (T)	T5R1 (7.34)	
T6R1 (D.7)	T5R2 (7.34)	
T3R2 (7)	T6R3 (D.7)	
T8R1 (D.7.34)	T2R3 (D)	
T3R3 (7)	T7R2 (D.34)	
T1R1 (T)	T4R2 (34)	
T4R1 (34)	T2R1 (D)	

T: Tratamientos; R: Repeticiones

Fuente: autores (2025)

La suspensión bacteriana se ajustó a una concentración de 1×10^8 UFC/mL y se aplicaron 4 mL por bolsa (total $\approx 4 \times 10^8$ UFC/bolsa) a los 15 días después de la siembra, cuando las plántulas alcanzaron aproximadamente 5 cm de altura. Esta concentración se seleccionó porque se encuentra dentro del rango reportado en la literatura (10^6 – 10^9 UFC/mL) como efectivo para la colonización de la rizósfera y la promoción del crecimiento vegetal por bacterias solubilizadoras de fósforo y otros PGPR, garantizando un número suficiente de células viables para competir con la microbiota nativa y producir metabolitos que favorecen la disponibilidad de nutrientes sin generar efectos fitotóxicos

(Ahemad & Kibret, 2014; Bashan et al., 2014; Hungria et al., 2010). El volumen aplicado por bolsa fue definido para asegurar el contacto uniforme del inóculo con el sistema radicular en desarrollo, evitando encharcamientos o pérdidas por lixiviación.

De manera complementaria, a los tratamientos que incluían fertilización química se les aplicó fosfato diamónico (DAP) como fuente de fósforo soluble. Se suministraron 3 g de DAP por planta en los tratamientos exclusivos con fertilización química, mientras que en los tratamientos combinados con bacterias solubilizadoras de fósforo se aplicó una dosis reducida de 1.5 g por planta. Estas cantidades se definieron con el fin de establecer un contraste entre el efecto de la fertilización completa y la reducción de la dosis fosfatada en presencia de inoculación bacteriana, permitiendo evaluar la eficiencia de las cepas en la solubilización de fósforo y su potencial para disminuir el uso de fertilizantes sintéticos sin comprometer el desarrollo inicial del cultivo. La inoculación bacteriana se realizó a los 15 días después de la siembra, coincidiendo con una etapa de alto desarrollo de pelos radicales, condición que favorece tanto el establecimiento microbiano como la absorción de fósforo durante fases críticas de crecimiento temprano (Richardson & Simpson, 2011).

Figura 8. Aplicación de las cepas seleccionadas



Fuente: Los autores (2025).

Evaluación de variables de crecimiento.

15 días después de siembra, momento en el cual las plantas alcanzaron en promedio 5cm de altura, se procedió a realizar mediciones semanales de las siguientes variables:

- Diámetro del tallo: medición utilizando instrumento pie de rey digital (Figura 9)
- Numero de hojas: medición manual por conteo (Figura 10).
- Índice de vegetación (NDVI): medición *con TRIMBLEGREENSEEKER* (Figura 11).

Tabla 2. Variables de crecimiento evaluadas en las plantas

Variable	Método de medición	Instrumento utilizado	Frecuencia de evaluación
Diámetro del tallo	Medición directa en la base del tallo	Pie de rey digital	Semanal
Número de hojas	Conteo manual de hojas visibles por planta	Observación directa	Semanal
Índice de vegetación (NDVI)	Lectura del índice de reflectancia en la planta	Sensor óptico Trimble GreenSeeker	Semanal

Fuente: Los autores (2025).

Figura 9. Medición diámetro del tallo.



Fuente: Los autores (2025).

Figura 10. Numero de hojas: medida a conteo.



Fuente: Los autores (2025).

Figura 11. Índice de vegetación: medida con TRIMBLEGREENSEEKER.



A



B

A) Calibración del equipo, B) Lectura y registro de datos

Fuente: autores. (2025)

Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) utilizando los paquetes estadísticos Data Análisis y Xrealstats (4) en el programa Excel de Microsoft ®. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ANÁLISIS DE SUELO

El análisis químico del suelo se llevó a cabo de manera diferida, una vez el cultivo de maíz ya se había establecido en campo y se habían realizado las inoculaciones bacterianas. Esto obedeció a limitaciones presupuestales que impidieron ejecutar el análisis de manera inmediata al inicio del ensayo, por lo cual la muestra de suelo recolectada permaneció almacenada bajo condiciones estables hasta que fue posible enviarla al laboratorio

Con base en el informe de análisis de suelo realizado por AGROSAVIA (Informe No. 51086, en el anexo 2) para el cultivo de maíz en la Finca San Martín, Vereda La Cabaña (municipio de Timbío, Cauca), se presenta la siguiente interpretación técnica y análisis integral de los parámetros físicos y químicos obtenidos a una profundidad de muestreo de 0 a 30 cm.

Reacción del suelo (pH)

El suelo presentó un pH de 5.94, clasificado como moderadamente ácido. Este rango puede limitar la disponibilidad de nutrientes como P, Mn y Mo (Fageria & Baligar, 2008; IGAC, 2006). Por ello se recomienda aplicar cal dolomítica para corregir el pH hacia valores neutros (6.2–6.5) (FAO, 2015). Sin embargo, una acidez moderada no constituye una limitante inmediata para el establecimiento del cultivo, y de hecho puede generar un ambiente favorable para el crecimiento de bacterias del género *Enterobacter*, que se adaptan bien a condiciones ligeramente ácidas. Considerando que el maíz prefiere valores cercanos a la neutralidad, mientras que estas bacterias toleran mejor la acidez, el pH encontrado representa un punto intermedio que beneficia tanto a las plantas como a los microorganismos inoculados.

Materia orgánica y carbono orgánico

El contenido de materia orgánica fue del 7.64%, clasificado como alto. Este valor refleja un suelo con buena estructura, alta actividad microbiana y capacidad de retención de

humedad. El carbono orgánico fue de 4.43%, lo que también indica una excelente fertilidad natural del suelo. Se sugiere continuar con prácticas de manejo que favorezcan el aporte constante de residuos orgánicos.

Conductividad eléctrica (salinidad)

La conductividad eléctrica fue de 0.91 dS/m, indicando que el suelo no presenta salinidad. Esta condición favorece el desarrollo radicular del cultivo sin riesgo de estrés osmótico.

Macronutrientes disponibles

“El P disponible fue de 95.93 mg/kg, considerado alto (IGAC, 2006). Este nivel puede cubrir la demanda del cultivo de maíz, aunque su disponibilidad puede verse afectada por el pH ácido (Fixen & Johnston, 2012).”

Capacidad de intercambio catiónico (CICE) y saturación de bases

El suelo presenta una capacidad de intercambio catiónico efectiva alta (22,44 cmol(+)/kg), lo que refleja un buen potencial para retener y suministrar nutrientes a los cultivos. La saturación de calcio fue elevada (76%) y la de potasio también se encontró en un nivel alto (10%); sin embargo, la saturación de magnesio resultó baja (13%). Aunque el contenido total de magnesio es adecuado, este desequilibrio en la proporción de bases puede afectar la absorción eficiente de nutrientes, por lo que se recomienda la aplicación de cal dolomítica como correctivo. Además, no se detectó presencia de aluminio intercambiable, lo cual es favorable, ya que elimina el riesgo de toxicidad por este elemento en el suelo.

Micronutrientes

Los niveles de micronutrientes fueron adecuados en hierro (82.53 mg/kg), cobre (5.75 mg/kg), y zinc (8.91 mg/kg). El manganeso presentó un valor bajo (4.28 mg/kg), lo que puede afectar la fisiología del maíz si no se corrige. Se sugiere monitorear y aplicar manganeso foliar si se observan síntomas de deficiencia. El boro estuvo en nivel medio (0.39 mg/kg), suficiente para el maíz, aunque debe observarse en otros cultivos sensibles como frutales.

Análisis general

Aunque el análisis de suelo reflejó niveles altos de fósforo disponible, es importante considerar que en suelos ácidos como los Andisoles del Cauca gran parte de este fósforo puede quedar fijado a complejos de hierro y aluminio, reduciendo su disponibilidad real para el cultivo (Rodríguez & Fraga, 1999). En este contexto, el uso de bacterias solubilizadoras de fósforo resulta pertinente como estrategia para incrementar la fracción disponible y mejorar la eficiencia en la absorción por parte del maíz (Richardson & Simpson, 2011).”

3.2 MEDIAS GENERALES DE LAS VARIABLES EVALUADAS

El consolidado de los resultados promedio obtenidos durante las 5 semanas para cada uno de los tratamientos y de las variables se presenta en la (tabla 3).

Tabla 3. Valores promedio consolidados para las 5 semanas de cada una de las variables por tratamiento

Tratamiento	Diámetro (mm)	NDVI	Número de Hojas
T1 (Control)	8.44	0.58	5.21
T2 (Fertilización DAP)	10.17	0.70	5.95
T3 (Inoculación Claudia 7)	8.96	0.63	5.44
T4 (Inoculación End-F34)	8.48	0.61	5.39
T5 (Claudia 7 + End-F34)	7.96	0.64	5.47
T6 (DAP + Claudia 7)	11.01	0.70	6.09
T7 (DAP + End-F34)	9.80	0.72	6.03
T8 (DAP + Claudia 7 + End-F34)	9.09	0.66	5.59

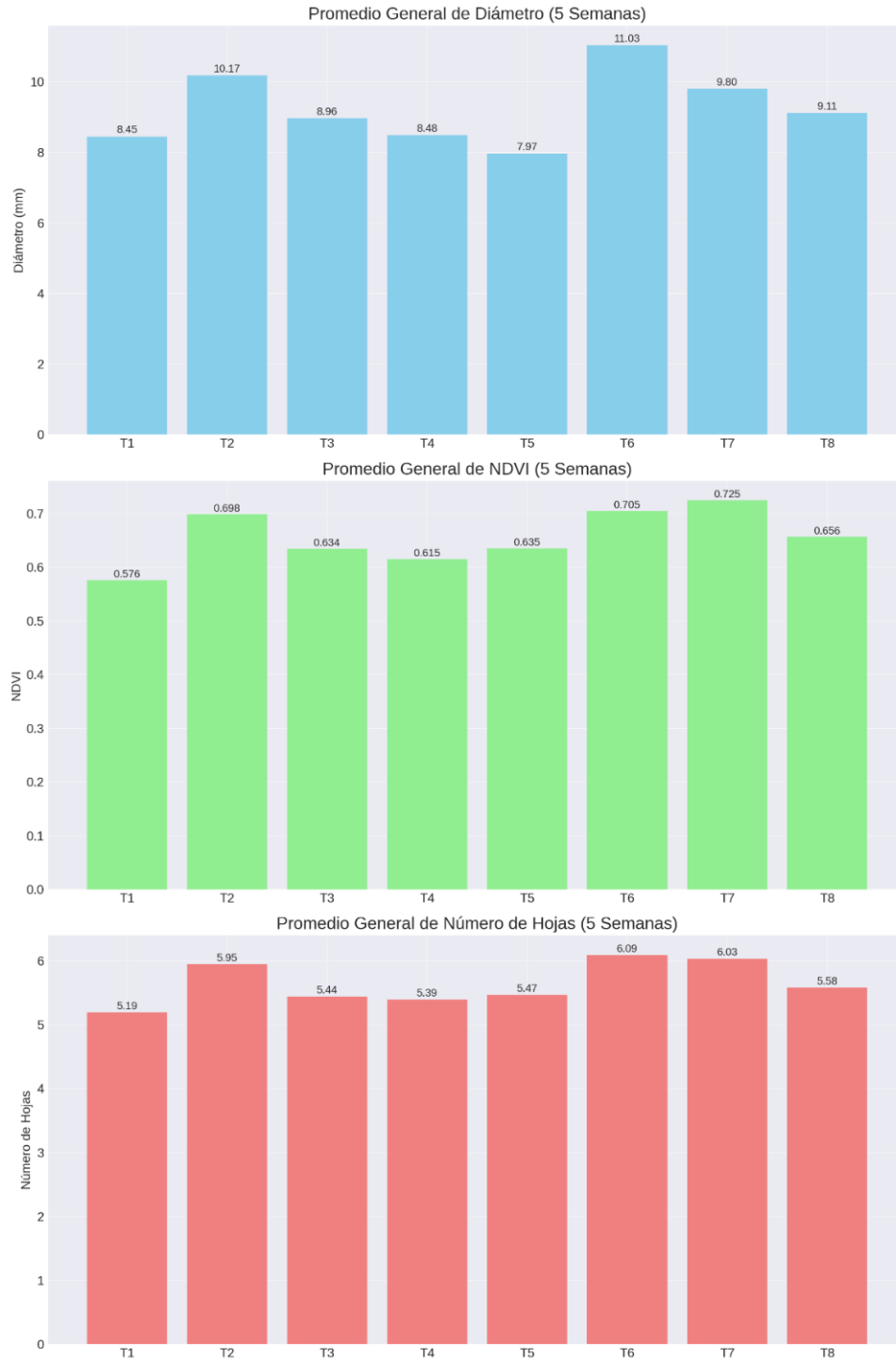
Fuente: los autores (2025).

Como se puede observar en la (figura 12), el tratamiento T6 mostró el mejor desempeño general en diámetro del tallo (11.01 mm) y número de hojas (6.09), indicando que la combinación de fertilización química con bacterias potencia el crecimiento. Por otro lado, el tratamiento T2 también presentó resultados superiores, solo ligeramente inferiores a

T6. Por su parte el tratamiento T7 destacó en el índice de vegetación (NDVI 0.72), sugiriendo un mejor estado de salud de las plantas.

Las inoculaciones bacterianas individuales (T3 y T4) no superaron al control (T1) de manera significativa, indicando que las bacterias solas podrían no ser suficientes para mejorar el crecimiento sin una fuente adicional de fósforo.

Figura 12. Valor promedio consolidado en las cinco semanas para cada tratamiento por variable.



En la presente investigación, los tratamientos con combinación de fertilización química e inoculación bacteriana (T6 y T7) evidenciaron los mejores resultados en crecimiento y desarrollo del maíz, lo cual coincide con lo reportado en otros estudios donde

la interacción entre fertilizantes fosforados e inoculantes microbianos mostró efectos sinérgicos sobre el desarrollo vegetal (Hungria et al., 2010; Bashan et al., 2014). Esta sinergia puede explicarse porque el DAP aporta una fracción inmediata de fósforo disponible, mientras que las bacterias solubilizadoras favorecen la liberación progresiva del fósforo no disponible, manteniendo una oferta más sostenida del nutriente a lo largo del ciclo del cultivo.

En contraste, los tratamientos con inoculación bacteriana exclusiva (T3, T4 y T5) no superaron al control absoluto (T1). Esto podría atribuirse a que, a pesar del alto contenido de fósforo total en el suelo, gran parte de este se encuentra en formas insolubles ligadas a hierro y aluminio, lo que limita la acción inmediata de las bacterias (Rodríguez & Fraga, 1999). Además, estudios previos han evidenciado que la efectividad de las bacterias solubilizadoras de fósforo depende fuertemente de las condiciones edáficas, como pH, textura y contenido de materia orgánica, que pueden limitar la colonización y la actividad metabólica de los microorganismos inoculados (Richardson & Simpson, 2011; Ahemad & Kibret, 2014).

Asimismo, investigaciones con maíz inoculado con bacterias solubilizadoras han demostrado resultados variables: mientras algunos autores reportan incrementos significativos en biomasa y absorción de nutrientes (Hernández et al., 2016; Zulfiqar et al., 2019), otros no observaron efectos destacados cuando no se aplicó una fuente complementaria de fósforo mineral (Osorio et al., 2012). Esto sugiere que el éxito de la inoculación depende del balance entre la oferta inicial de fósforo y la capacidad de las bacterias para transformar las fracciones insolubles en formas disponibles.

En este caso, es posible que las cepas utilizadas (C7 y End-F34) no hayan logrado establecer una colonización rizosférica suficientemente eficiente para compensar la falta de fósforo disponible, lo cual explicaría que los tratamientos bacterianos individuales no superaran al testigo. Por el contrario, cuando las bacterias fueron aplicadas en conjunto con DAP (T6 y T7), su efecto se potenció, evidenciando que la estrategia más efectiva para optimizar el crecimiento del maíz en condiciones similares es la co-aplicación de fertilizantes químicos con inoculantes microbianos, en lugar de depender únicamente de la actividad biológica.

3.3 RESULTADOS POR SEMANA DE LAS VARIABLES EVALUADAS

3.3.1 Semana 1

Durante la primera semana, el tratamiento T6 (DAP + Claudia 7) mostró los mejores resultados en diámetro (7.38 mm) y número de hojas (6.1). Este resultado indica que la combinación del fertilizante químico DAP y las bacterias Claudia 7 favoreció un crecimiento inicial más acelerado en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento T7 (DAP + End-F34) destacó por tener el mejor NDVI (0.72), lo que sugiere una mejor salud inicial de las plantas.

Tabla 4. Valores promedio de cada una de las variables por tratamiento para la semana 1

Tratamiento	Diámetro (mm)	NDVI	Número de Hojas
T1	6.37	0.50	5.57
T2	7.10	0.68	5.80
T3	5.82	0.56	5.57
T4	6.04	0.58	5.40
T5	5.90	0.62	5.50
T6	7.38	0.63	6.10
T7	6.79	0.72	6.03
T8	5.97	0.58	5.27

Fuente: autores (2025)

Realizando el análisis de varianza para la primera semana, se observaron diferencias estadísticamente significativas en las tres variables evaluadas: diámetro del tallo, NDVI y número de hojas por planta (tabla 5).

Tabla 5. Análisis de varianza variables semana 1

Variable diámetro de tallo por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	74,6313183	7	10,6616169	4,608686822	2,0491952

Error	536,7028	232	2,31337414		
Total	611,334118	239			
Variable NDVI					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	1,00958	7	0,14422571	7,312920601	2,0491952
Error	4,57551333	232	0,01972204		
Total	5,58509333	239			
Variable número de hojas por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	18,5291667	7	2,64702381	4,80649249	2,0491952
Error	127,766667	232	0,55071839		
Total	146,295833	239			

Fuente: autores (2025)

En la primera semana, el tratamiento T6 (DAP + cepa Claudia 7) presentó diferencias estadísticas significativas respecto a los tratamientos T3, T4, T5 y T8, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Estas diferencias no son atribuibles únicamente a la inoculación con la cepa Claudia 7, ya que, por ejemplo, el tratamiento T3 también contenía esta misma cepa pero sin la adición del fertilizante DAP, y aun así sus resultados fueron significativamente inferiores a los de T6. Esto indica que la superioridad de T6 no se debe a la cepa en sí misma, sino al efecto del fertilizante químico fosfatado (DAP), el cual proporcionó una fuente inmediata de fósforo disponible para las plantas en esta etapa inicial del cultivo.

Asimismo, al comparar T6 con T8 (que también recibió DAP, pero en combinación con ambas cepas), se observa que T6 fue estadísticamente superior. Este comportamiento podría estar relacionado con un efecto antagonista entre las cepas Claudia 7 y End-F34 al ser aplicadas en conjunto, lo que habría reducido la eficacia individual de cada una. En la literatura se ha reportado que la co-inoculación de bacterias solubilizadoras de fósforo u otros PGPR no siempre genera efectos sinérgicos, ya que en algunos casos se producen interacciones competitivas por nutrientes, espacio o secreción de metabolitos que limitan su desempeño (Vessey, 2003; Piromyou et al., 2011). De igual forma, Mitter et al. (2013) y Trabelsi & Mhamdi (2013) señalan que la compatibilidad entre cepas es un factor crítico en

la formulación de consorcios microbianos, pues la presencia de antagonismo puede disminuir el efecto biofertilizante esperado. Estos resultados sugieren que, antes de recomendar la aplicación conjunta de cepas, es necesario realizar estudios de compatibilidad y de interacción microbiana, a fin de evitar que el consorcio reduzca en lugar de potenciar el desarrollo del cultivo.

Por otro lado, aunque el tratamiento T2 (DAP sin bacterias) solo mostró diferencia estadística frente a T3, es importante destacar que este tratamiento también presentó un desempeño superior respecto a los tratamientos sin DAP (T3, T4 y T5), aunque en menor magnitud comparado con T6. Esto refuerza la conclusión de que los tratamientos que incluyen DAP tienden a ser estadísticamente superiores a aquellos que no lo incluyen, debido a la rápida disponibilidad del fósforo para la planta, especialmente en suelos ácidos como los del Cauca, donde este nutriente suele estar inmovilizado. (tabla 6).

Tabla 6. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 1, variable Diámetro de tallo por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T2	T3	0,029136922
T3	T6	0,002507757
T4	T6	0,017428415
T5	T6	0,004994646
T6	T8	0,009643331

Fuente: autores (2025)

Teniendo en cuenta la prueba de Tukey para el NDVI mostró diferencias significativas entre varios tratamientos. Donde el T7 ($p = 0.000000238$) se destacó notablemente de casi todos los demás (T1, T3, T4 y T8) (tabla 7).

Tabla 7. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 1, variable NDVI

TRATAMIENTOS	VALOR P
--------------	---------

T1	T2	3,79251E-05
T1	T5	0,048380469
T1	T6	0,014797958
T1	T7	2,38612E-07
T2	T3	0,017703757
T3	T7	0,000396225
T4	T7	0,003374996
T7	T8	0,002943452

Fuente: autores (2025)

De acuerdo al análisis del número de hojas mediante la prueba de Tukey, se encontraron diferencias significativas. El T4 mostró diferencias estadísticas frente a T6 ($P = 0,0076$) y T7 ($P = 0,0240$), lo que indica un efecto distinto en el desarrollo foliar. De igual manera se observó diferencia entre T5 y T6 ($P = 0,0406$), aunque de menor intensidad. Las diferencias más destacadas se dieron entre T6 y T8 ($P = 0,0005$), y entre T7 y T8 ($P = 0,0021$), resaltando a T6 (DAP + Claudia 7) como uno de los tratamientos con mayor efecto sobre la producción de hojas (tabla 8).

Tabla 8. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 1, variable Numero de hojas por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T4	T6	0,007606998
T4	T7	0,024000547
T5	T6	0,040580174
T6	T8	0,000535838
T7	T8	0,002134757

Fuente: autores (2025)

3.3.2 Semana 2

En la segunda semana, el tratamiento T6 continuó sobresaliendo, alcanzando un diámetro promedio de 11.86 mm y un número de hojas de 6.37, evidenciando una tendencia clara de superioridad frente a los demás. Por su parte, T7 mantuvo el mejor NDVI (0.76), consolidando su ventaja en salud de las plantas (tabla 9).

Tabla 9. Promedios de la semana 2.

Tratamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio NDVI	Promedio N. Hojas
T1	8.90	0.63	5.57
T2	9.18	0.74	6.10
T3	9.73	0.66	5.90
T4	8.31	0.66	5.77
T5	7.59	0.69	6.10
T6	11.86	0.71	6.37
T7	8.45	0.76	6.23
T8	8.55	0.67	5.80

Fuente: autores (2025)

Tabla 10. Análisis de varianza variables semana 2.

Variable diámetro de tallo por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	351,548793	7	50,22125613	10,1537882	2,0491952
Error	1147,48616	232	4,94606102		
Total	1499,03495	239			
Variable NDVI					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	0,41746667	7	0,059638095	8,38534211	2,0491952
Error	1,65002667	232	0,007112184		
Total	2,06749333	239			
Variable número de hojas por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	14,9291667	7	2,132738095	5,38015844	2,0491952

Error	91,9666667	232	0,396408046		
Total	106,895833	239			

Fuente: autores (2025)

Los resultados de la segunda semana mostraron un incremento considerable en la magnitud de las diferencias entre tratamientos (tabla 10). El tratamiento T6 continuó liderando en diámetro del tallo y número de hojas, mientras que T7 mantuvo el valor más alto en NDVI. El análisis estadístico reflejó un aumento en la F calculada para todas las variables, destacándose la variable diámetro, lo que confirma un efecto acumulativo de los tratamientos.

La prueba de Tukey para el diámetro presenta diferencias significativas (tabla 11), con valores $p < 0.05$. El T6 es el más notable ya que presenta diferencias significativas con T1 ($p = 0.0000143$), T2 ($p = 0.000137$), T3 ($p = 0.0059$), T4 ($p = 0.000000072$), T5 ($p = 0.000000000051$), T7 ($p = 0.00000029$) y T8 ($p = 0.00000068$). Esto aclara que T6 se comportó de forma significativamente diferente en comparación con todos los demás tratamientos

Tabla 11. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 2, variable Diámetro de tallo por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T6	1,43562E-05
T2	T6	0,000137333
T3	T5	0,00584903
T3	T6	0,005983272
T4	T6	7,21596E-08
T5	T6	5,13556E-11
T6	T7	2,90112E-07
T6	T8	6,82966E-07

Fuente: autores (2025)

Se puede efectuar que el T7 presentó el mayor cambio en NDVI respecto a los demás tratamientos. El mantenimiento de un NDVI alto en T7 puede deberse a que la cepa End-F34 favoreció la formación de clorofila o mejoró la absorción de micronutrientes relacionados con la fotosíntesis. (tabla 12)

Tabla 12. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 2, variable NDVI

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	1,68764E-05
T1	T6	0,003084694
T1	T7	1,2751E-07
T2	T3	0,013238847
T2	T4	0,004091345
T3	T7	0,00034505
T4	T7	7,9738E-05
T5	T7	0,041596948
T7	T8	0,002312916

Fuente: autores (2025)

La prueba de Tukey muestra diferencias significativas en el número de hojas entre tratamientos (tabla 13). El tratamiento T6 es el más destacado, con diferencias frente a T1 ($p = 0.0000443$), T4 ($p = 0.0067$) y T8 ($p = 0.0134$). También T1 difiere significativamente de T2 ($p = 0.0259$), T5 ($p = 0.0259$) y T7 ($p = 0.0015$). Estos resultados indican que T6 y T1 presentan respuestas distintas al resto en cuanto al número de hojas. (Tabla 13)

Tabla 13. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 2, variable Numero de hojas por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	0,025901704
T1	T5	0,025901704
T1	T6	4,42979E-05
T1	T7	0,001452097
T4	T6	0,006668682
T6	T8	0,013436045

Fuente: autores (2025)

3.3.3 Semana 3

Los resultados de la tercera semana confirmaron la superioridad del tratamiento T6, con el mayor diámetro (12.35 mm) y el mayor número de hojas (6.5). T7 y T6 mostraron un

alto NDVI (0.76), indicando que las plantas de estos tratamientos mantenían una excelente condición general (tabla 14).

Tabla 14. *Promedios de la semana 3.*

Tratamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio NDVI	Promedio N. Hojas
T1	9.17	0.58	5.33
T2	11.23	0.72	6.30
T3	10.21	0.70	5.70
T4	9.11	0.63	5.67
T5	8.60	0.66	5.70
T6	12.35	0.76	6.50
T7	11.16	0.76	6.43
T8	9.98	0.67	5.87

Fuente: autores (2025)

Tabla 15. *Análisis de varianza variables semana 3.*

Variable diámetro de tallo por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	344,089066	7	49,1555809	15,14690479	2,0491952
Error	752,89935	232	3,24525582		
Total	1096,98842	239			
Variable NDVI					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	0,82805625	7	0,11829375	11,69466788	2,0491952
Error	2,34672333	232	0,01011519		
Total	3,17477958	239			
Variable número de hojas por planta					

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	37,4958333	7	5,356547619	7,73958302	2,0491952
Error	160,566667	232	0,692097701		
Total	198,0625	239			

Fuente: autores (2025)

Durante la tercera semana, se observaron las diferencias más marcadas en todas las variables (tabla 15), con valores de F especialmente altos para el diámetro del tallo y NDVI. El tratamiento T6 mantuvo su superioridad en crecimiento estructural (diámetro y hojas), mientras que tanto T6 como T7 compartieron el valor más alto de NDVI.

Los resultados de la prueba de Tukey mostraron que T6 se mantuvo como el tratamiento con mayor engrosamiento del tallo, con diferencias frente a T1, T3, T4, T5 y T8 (tabla 16). La cepa Claudia 7 continuó liberando fósforo del suelo, lo que potenció el crecimiento estructural incluso en una etapa de alta demanda (Tabla 16).

Tabla 16. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 3, variable Diámetro de tallo por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	0,000389295
T1	T6	1,8175E-09
T1	T7	0,000681317
T2	T4	0,00023368
T2	T5	1,35434E-06
T3	T5	0,015157035
T3	T6	0,000171491
T4	T6	8,99318E-10
T4	T7	0,00041459
T5	T6	1,02662E-12
T5	T7	2,68245E-06
T6	T8	1,87426E-05

Fuente: autores (2025).

La prueba de Tukey para el NDVI muestra diferencias significativas entre varios tratamientos ($p < 0.05$) (tabla 17). El tratamiento T1 se diferencia claramente de T2 ($p = 0.0000035$), T3 ($p = 0.00017$), T5 ($p = 0.0376$), T6 ($p = 1.14e-09$), T7 ($p = 5.78e-10$) y T8 ($p = 0.0057$). También hay diferencias entre T2 y T4 ($p = 0.0163$), T4 y T6 ($p = 0.000048$), T4 y T7 ($p = 0.000028$), T5 y T6 ($p = 0.0050$), T5 y T7 ($p = 0.0033$), T6 y T8 ($p = 0.0335$) y T7 y T8 ($p = 0.0235$).

Los tratamientos T1, T6 y T7 mostraron los mayores cambios en NDVI, siendo significativamente distintos a varios otros tratamientos. (Tabla 17)

Tabla 17. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 3, variable NDVI

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	3,45059E-06
T1	T3	0,000169249
T1	T5	0,037558998
T1	T6	1,14117E-09
T1	T7	5,78233E-10
T1	T8	0,005696194
T2	T4	0,016279218
T4	T6	4,80317E-05
T4	T7	2,8191E-05
T5	T6	0,004962055
T5	T7	0,003252027
T6	T8	0,033496805
T7	T8	0,023523896

Fuente: autores (2025)

La prueba de Tukey muestra que los tratamientos T6 y T7 son los más diferentes en número de hojas (tabla 18). T6 presenta diferencias con T1, T3, T4 y T5, y T7 con T1, T3, T4 y T5, todos con valores p menores a 0.05. Además, T1 también se diferencia de T2 ($p = 0.00028$). se concluye que T6 y T7 tuvieron un comportamiento distinto al resto en el número de hojas. (Tabla 18)

Tabla 18. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 3, variable Numero de hojas por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	0,000284494
T1	T6	3,88726E-06
T1	T7	1,74643E-05
T3	T6	0,005923183
T3	T7	0,016995017
T4	T6	0,003372789
T4	T7	0,010157988
T5	T6	0,005923183
T5	T7	0,016995017

Fuente: autores (2025)

3.3.4 Semana 4

Durante la cuarta semana, T6 y T2 (solo DAP) lideraron en diámetro (12.18 mm y 11.75 mm respectivamente) (tabla 19). Sin embargo, T6 mostró una ventaja en NDVI (0.72), reafirmando su superioridad en salud vegetal. T2 mostró un buen desempeño en el número de hojas (5.97), evidenciando que el DAP por sí solo también promueve el crecimiento.

Tabla 19. Promedios de la semana 4.

Tratamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio NDVI	Promedio N. Hojas
T1	9.04	0.61	4.79
T2	11.75	0.70	5.97
T3	9.95	0.64	5.03
T4	9.56	0.61	5.10
T5	8.93	0.64	5.07
T6	12.18	0.72	5.93
T7	11.51	0.73	5.83
T8	10.69	0.72	5.62

Fuente: autores (2025)

Tabla 20. Análisis de varianza variables semana 4.

Variable diámetro de tallo por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	45,7333333	7	6,53333333	7,3271028	2,0491952
Error	206,866667	232	0,89166667		
Total	252,6	239			
Variable NDVI					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	0,53242667	7	0,07606095	5,78439357	2,0491952
Error	3,05064667	232	0,01314934		
Total	3,58307333	239			
Variable número de hojas por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	45,7333333	7	6,53333333	7,3271028	2,0491952
Error	206,866667	232	0,89166667		
Total	252,6	239			

Fuente: autores (2025)

En la cuarta semana, se observó una tendencia al mantenimiento de los efectos, aunque con ligera disminución en la magnitud de las diferencias entre tratamientos (tabla 20). T6 y T2 (solo DAP) presentaron valores altos en diámetro del tallo y número de hojas, mientras que T6 continuó destacándose en NDVI, seguido de cerca por T7 y T8.

La prueba de Tukey para el diámetro muestra diferencias significativas entre varios tratamientos ($p < 0.05$) (tabla 21). T1 se diferencia de T2 ($p = 0.0000021$), T6 ($p = 0.00000086$) y T7 ($p = 0.0000183$). T2 difiere de T3 ($p = 0.0234$), T4 ($p = 0.00186$) y T5 ($p = 0.0000122$). También hay diferencias entre T3 y T6 ($p = 0.0134$), T4 y T6 ($p = 0.00095$), T4 y T7 ($p = 0.0094$), T5 y T6 ($p = 0.0000053$) y T5 y T7 ($p = 0.000096$). los tratamientos T1, T2 y T6 fueron los más diferentes en cuanto al diámetro, destacándose por presentar más diferencias significativas con otros tratamientos.

(Tabla 21)

Tabla 21. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 4, variable Diámetro del tallo por planta

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	2,08244E-06
T1	T6	8,64621E-07
T1	T7	1,82586E-05
T2	T3	0,023408779
T2	T4	0,001864869
T2	T5	1,22374E-05
T3	T6	0,013428971
T4	T6	0,000946698
T4	T7	0,009409707
T5	T6	5,30145E-06
T5	T7	9,55538E-05

Fuente: autores (2025)

La prueba de Tukey para el NDVI muestra diferencias significativas entre varios tratamientos ($p < 0.05$) (tabla 22). T1 presenta diferencias con T2 ($p = 0.0056$), T6 ($p = 0.0038$), T7 ($p = 0.0000362$) y T8 ($p = 0.0061$). Además, T3 difiere de T7 ($p = 0.0421$) y T4 de T7 ($p = 0.0017$).

T1 y T7 son los tratamientos más diferentes en NDVI, ya que muestran varias diferencias significativas con otros tratamientos.

Tabla 22. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 4, variable NDVI

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	0,005647464
T1	T6	0,003756572
T1	T7	3,62194E-05
T1	T8	0,006118172
T3	T7	0,042122447

T4	T7	0,001674972
----	----	-------------

Fuente: autores (2025)

La prueba de Tukey para el número de hojas muestra diferencias significativas entre varios tratamientos ($p < 0.05$) (tabla 23). El tratamiento T1 se diferencia de T2 ($p = 0.0000032$), T6 ($p = 0.00027$), T7 ($p = 0.0000442$) y T8 ($p = 0.0259$). Además, T2 difiere de T3 ($p = 0.0041$), T4 ($p = 0.0107$) y T5 ($p = 0.0067$). También hay diferencias entre T3 y T7 ($p = 0.0259$) y entre T5 y T7 ($p = 0.0390$). Cabe resaltar que los tratamientos T1 y T2 son los más diferentes, ya que presentan más variaciones significativas en el número de hojas respecto a otros tratamientos.

Tabla 23. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 4, variable Numero de hojas por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	3,23001E-06
T1	T6	0,000271026
T1	T7	4,41572E-05
T1	T8	0,025864716
T2	T3	0,004075796
T2	T4	0,010670964
T2	T5	0,006656477
T3	T7	0,025864716
T5	T7	0,039048582

Fuente: autores (2025)

3.3.5 Semana 5

En la última semana, el tratamiento T6 continuó mostrando un alto rendimiento en diámetro (11.38 mm) y NDVI (0.70), manteniendo su ventaja general. El tratamiento T2 fue competitivo en número de hojas (5.57), pero sin superar a T6 en otras variables (tabla 24).

Tabla 24. Promedios de la semana 5.

Tratamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio NDVI	Promedio N. Hojas
T1	8.77	0.57	4.70
T2	11.60	0.65	5.57
T3	9.09	0.61	5.00
T4	9.40	0.60	5.03
T5	8.82	0.56	4.97
T6	11.38	0.70	5.55

Tratamiento	Promedio Diámetro (mm)	Promedio NDVI	Promedio N. Hojas
T7	11.08	0.65	5.63
T8	10.38	0.64	5.36

Fuente: autores (2025)

Tabla 25. Análisis de varianza variables semana 5

Variable diámetro de tallo por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	40,6666667	7	5,80952381	5,34703593	2,0491952
Error	252,066667	232	1,086494253		
Total	292,733333	239			
Variable NDVI					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	0,67612	7	0,096588571	4,38934043	2,0491952
Error	5,10522	232	0,022005259		
Total	5,78134	239			
Variable número de hojas por planta					
Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F Calculado (F)	F tabla (F crit)
Tratamientos	40,6666667	7	5,80952381	5,34703593	2,0491952
Error	252,066667	232	1,086494253		
Total	292,733333	239			

Fuente: autores (2025)

En la semana final de medición, se observaron diferencias significativas, pero más moderadas entre los tratamientos (tabla 25). El tratamiento T6 se mantuvo con los valores más altos en NDVI y diámetro del tallo, mientras que T2 y T7 también mostraron buen desempeño, especialmente en número de hojas.

La prueba de Tukey para el diámetro muestra diferencias significativas (tabla 26). T1 se diferencia de T2 ($p = 1.32e-08$), T6 ($p = 3.45e-06$), T7 ($p = 1.72e-06$) y T8 ($p = 0.0118$). T2 difiere de T3 ($p = 0.00042$), T4 ($p = 0.0036$) y T5 ($p = 4.43e-06$). Además, T3 se diferencia de T6 ($p = 0.0202$) y T7 ($p = 0.0129$), y T5 de T6 ($p = 0.00052$) y T7 ($p = 0.00029$).

T1 y T2 son los tratamientos más diferentes, con varios valores p muy bajos, lo que indica cambios significativos en el diámetro frente a otros tratamientos.

Tabla 26. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 5, variable Diámetro de tallo por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	1,32043E-08
T1	T6	3,44581E-06
T1	T7	1,72438E-06
T1	T8	0,011762018
T2	T3	0,000417268
T2	T4	0,003572575
T2	T5	4,4331E-06
T3	T6	0,020198399
T3	T7	0,012893009
T5	T6	0,000521811
T5	T7	0,000292632

Fuente: autores (2025)

La prueba de Tukey para el NDVI muestra diferencias significativas (tabla 27). T1 se diferencia de T2 ($p = 0.0059$), T6 ($p = 0.0005$) y T7 ($p = 0.0076$). Además, T5 difiere de T6 ($p = 0.0133$).

En resumen, T6 es el tratamiento más diferente, ya que muestra diferencias significativas con T1 y T5, indicando un comportamiento distinto en NDVI. (Tabla 27)

Tabla 27. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 5, variable NDVI

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	0,005913625
T1	T6	0,000511996
T1	T7	0,007555544
T5	T6	0,013257279

Fuente: autores (2025)

La prueba de Tukey para el número de hojas muestra que el tratamiento T1 es significativamente diferente de varios otros tratamientos (tabla 28). Específicamente, T1 se diferencia de T2 ($p = 0.0000381$), T6 ($p = 0.00094$), T7 ($p = 0.0000119$) y T8 ($p = 0.0213$).

De tal manera el T1 fue el tratamiento más diferente, mostrando cambios significativos en el número de hojas frente a T2, T6, T7 y T8. (Tabla 28)

Tabla 28. Comparaciones con diferencias estadísticas significativas según la prueba de Tukey para la semana 5, variable Numero de hojas por planta.

TRATAMIENTOS		VALOR P
T1	T2	3,80581E-05
T1	T6	0,000939264
T1	T7	1,18842E-05
T1	T8	0,021253063

Fuente: autores (2025)

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.4.1 Efecto de la ausencia total de insumos (T1 diferente de los demás)

El tratamiento T1, correspondiente al testigo absoluto (sin fertilización ni inoculación bacteriana), fue en general el que presentó los valores más bajos en todas las variables evaluadas (diámetro del tallo, número de hojas y NDVI), y se diferenció estadísticamente de los tratamientos restantes en la mayoría de las semanas, según lo muestran los análisis de varianza (ANOVA) y las pruebas de comparación múltiple de Tukey. Como este resultado era el esperado, se comprueba el efecto de los tratamientos y la eficacia del método estadístico para encontrar diferencias estadísticas.

Por otro lado, esto también confirma que, aunque el suelo presentaba un alto contenido de fósforo disponible (95.93 mg/kg) y un pH moderadamente ácido de 5.94, la sola disponibilidad química del fósforo no garantiza su absorción efectiva por parte de las plantas. Esto puede explicarse por factores como la baja intensidad de absorción en ausencia de estimulación radicular, la forma química del fósforo en la solución del suelo o la competencia con otras especies iónicas. Todo lo anterior refuerza la necesidad de desarrollar alternativas

(en este caso microbiológicas) para mejorar los procesos de fertilización en los suelos del Cauca, ya que, como lo señala Marschner (2012), el fósforo disponible en el suelo puede encontrarse fuera del rango efectivo de la rizosfera, o bien no estar en formas inmediatamente absorbibles, especialmente en las primeras etapas del cultivo, cuando el sistema radicular es incipiente. Sin embargo, el ver diferencias estadísticas con los tratamientos con DAP, evidencian la importancia de la fertilización en estados iniciales del cultivo para mejorar su producción y sanidad.

También se puede considerar que la ausencia de cualquier insumo en T1 limitó no solo el acceso a fósforo, sino también la estimulación fisiológica del cultivo, reduciendo la división celular, el desarrollo foliar y la síntesis de ATP, que son procesos fundamentales en el establecimiento temprano del maíz (Vance et al., 2003).

3.4.2 Efecto de la fertilización con DAP sin inoculación bacteriana (T2)

El tratamiento T2, con fertilización de DAP, presentó mejores resultados que T1 y que los tratamientos con bacterias sin fertilizante (T3, T4 y T5), pero fue superado en la semana 2 por las combinaciones de DAP + bacterias (T6 y T7). Este resultado puede ser un indicio que las cepas potencialmente pueden mejorar el desarrollo de las plantas y llegar a ser una alternativa real para los agricultores

Este resultado indica que la fertilización con DAP por sí sola logra mejorar el crecimiento del maíz, ya que el DAP proporciona fósforo soluble de rápida disponibilidad, lo cual favorece el crecimiento inicial de raíces, la expansión foliar y el desarrollo vegetativo (Richardson et al., 2009). Sin embargo, al no observar diferencias estadísticas con los tratamientos inoculados, se evidenció que las cepas no influyeron significativamente en el crecimiento de las plantas en la etapa fenológica evaluada. Esto difiere de lo observado en estudios previos realizados en condiciones de laboratorio, en los que la aplicación directa de estas cepas durante la germinación mostró efectos negativos en el desarrollo inicial de las plántulas (Rivera, 2021).

3.4.3 Efecto de la inoculación bacteriana sin DAP (T3, T4 y T5 significativamente menores que los tratamientos con DAP)

Los tratamientos T3, T4 y T5, que consistieron en la inoculación de cepas solubilizadoras de fósforo sin fertilización fosfatada, presentaron un desempeño significativamente menor que los tratamientos con DAP (T2, T6, T7), a pesar de que el suelo contiene fósforo disponible (Anexo 2). Este resultado sugiere que, bajo las condiciones del presente ensayo, las bacterias solubilizadoras de fósforo por sí solas no fueron suficientes para poner a disposición el fósforo que manera que se suplan las necesidades nutricionales del cultivo en etapas tempranas de desarrollo.

Esta situación puede deberse a diferentes aspectos:

- **Falta de una fuente estimulante de fósforo rápidamente asimilable**, como lo es el DAP. Es probable que la distribución o forma química del fósforo presente en el suelo no haya favorecido su disponibilidad inmediata, tal como lo mencionan Hinsinger (2001) y Múnera y Meza (2012).
- **Tiempo biológico de acción de las bacterias**. Estas requieren un periodo mayor para establecerse, colonizar la rizosfera, producir ácidos orgánicos y generar efectos medibles en el crecimiento vegetal. Si durante las fases iniciales del cultivo no se dispone de una fuente soluble de fósforo, el maíz puede experimentar deficiencias nutricionales que afectan su desarrollo (Zaidi et al., 2009).
- **Condiciones ambientales y microbiológicas**. Aunque el pH del suelo (5,94) resulta adecuado para la mayoría de cultivos, factores como la humedad, la temperatura y la competencia microbiana también pudieron limitar la expresión del potencial de las cepas utilizadas (Rodríguez y Fraga, 1999).

En consecuencia, los resultados indican que la inoculación bacteriana, aunque no reemplaza de manera inmediata a la fertilización fosfatada convencional, sí muestra un potencial complementario que podría aprovecharse mediante estrategias integradas. De hecho, los incrementos observados en la semana 2 sugieren que estas cepas poseen capacidad de estimular el desarrollo inicial del cultivo, siempre que se articulen con fuentes minerales de fósforo (como DAP) o con otros microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR) que actúen de forma sinérgica. De esta manera, se confirma lo planteado en la justificación: las bacterias solubilizadoras de fósforo constituyen una herramienta

biotecnológica con proyección para optimizar la nutrición fosfatada, reducir la dependencia exclusiva de fertilizantes de síntesis química y avanzar hacia un manejo agrícola más sostenible.

3.4.4 Posible efecto de antagonismo en la co-inoculación múltiple (T8 significativamente menor que T6 y T7)

El tratamiento T8, que combinó DAP con la inoculación simultánea de Claudia 7 y End-F34, obtuvo resultados inferiores a los de T6 (DAP + Claudia 7) y T7 (DAP + End-F34), a pesar de contener los mismos componentes.

Este resultado sugiere un posible efecto de interferencia o antagonismo entre las cepas bacterianas cuando se aplican simultáneamente, fenómeno ampliamente documentado en estudios sobre interacción microbiana (Fukami et al., 2018; Kumar et al., 2014). En este sentido, los hallazgos de la presente investigación no solo son coherentes con lo reportado en la literatura, sino que además refuerzan dichas posturas al evidenciar que la coexistencia de microorganismos no siempre genera efectos sinérgicos, sino que, en determinadas condiciones, puede limitar el desempeño individual de cada cepa.

Según estos autores, en lugar de potenciarse entre sí, las bacterias pueden:

- Competir por espacio y nutrientes en la rizosfera, dificultando la colonización eficiente de cada cepa.
- Producir compuestos inhibitorios como sideróforos o antibióticos que afecten la actividad de la otra.
- Alterar las señales químicas entre planta y microbios, afectando la expresión de genes beneficiosos.

Esto evidencia que no siempre más es mejor en consorcios microbianos, y que es crucial evaluar la compatibilidad entre cepas antes de formular bioinoculantes mixtos.

4 CONCLUSIONES

El presente estudio evidenció que la combinación de fertilizantes fosforados (DAP) con bacterias solubilizadoras de fósforo (en especial la cepa Claudia 7), genera efectos promisorios en el crecimiento y desarrollo de las plantas de maíz bajo condiciones controladas. Aunque las cepas bacterianas utilizadas mostraron potencial como bioinoculantes, su eficacia dependió de la presencia inicial de fósforo disponible en el suelo. Los tratamientos que no incluyeron fertilización química no lograron superar al testigo, lo que indica que, en su estado actual, las bacterias por sí solas no fueron suficientes para suplir las demandas nutricionales del cultivo.

Factores como un pH del suelo cercano a la neutralidad, la baja dosis aplicada de bacterias, y el corto tiempo de evaluación pudieron haber limitado la expresión completa de sus beneficios. No obstante, se establecieron diferencias significativas entre tratamientos, validando parcialmente la hipótesis del trabajo y sentando bases importantes para futuras investigaciones en condiciones de campo.

La evaluación semanal de las variables de crecimiento (diámetro del tallo, número de hojas y NDVI) demostró que los efectos de los tratamientos no fueron homogéneos a lo largo del tiempo. Se evidenció una respuesta progresiva y acumulativa en los tratamientos que incluyeron fertilizante fosforado y bacterias, lo cual sugiere que la interacción entre ambos factores se intensifica conforme avanza el desarrollo fenológico del maíz. Esto resalta la importancia de realizar mediciones continuas y de mayor duración para captar adecuadamente el comportamiento fisiológico del cultivo frente a la inoculación microbiana.

Los resultados de este estudio permiten plantear que, en la búsqueda de una sostenibilidad económica en la producción agrícola, es necesario continuar trabajando de manera complementaria con fertilizantes químicos y bioinsumos, como bacterias solubilizadoras de fósforo. Este enfoque integrado permite mantener la productividad mientras se avanza en la validación del potencial de los microorganismos como alternativa viable para reducir progresivamente la dependencia de insumos de síntesis química. En un escenario de mediano y largo plazo, se espera que el uso eficiente y masificado de estos microorganismos contribuya a disminuir o incluso prescindir de la aplicación de fertilizantes químicos, favoreciendo no solo la sostenibilidad económica de los agricultores, sino también la

sostenibilidad ambiental, al reducir impactos negativos sobre los ecosistemas y mejorar la salud del suelo.

El diseño experimental bajo condiciones controladas permitió aislar y analizar con precisión el efecto de los tratamientos, pero también reveló ciertas limitaciones para extrapolar los resultados directamente a campo abierto. La respuesta positiva observada en el invernadero podría verse influenciada por variables ambientales no contempladas, como la competencia microbiana natural, la variabilidad climática o las prácticas culturales propias de cada región. Además, en este ensayo no se evaluó la permanencia de las bacterias en el sustrato al finalizar el ciclo, lo cual impide confirmar si los efectos observados fueron producto de su establecimiento o si, por el contrario, la cepa no prosperó debido a condiciones adversas (pH, temperatura, interacciones competitivas, etc.). Este aspecto es particularmente relevante, dado que la eficacia de los biofertilizantes depende no solo de su capacidad de solubilización de fósforo, sino también de su adaptación y persistencia en el medio edáfico.

A pesar de que la selección de variables de crecimiento (diámetro del tallo, número de hojas y NDVI) resultó pertinente para evaluar tendencias fisiológicas iniciales, se reconoce que faltaron indicadores directos de rendimiento y nutrición, tales como el contenido de fósforo en tejido, la biomasa seca y la productividad final. Estos parámetros hubieran permitido validar con mayor certeza el impacto real de las bacterias sobre la eficiencia de uso de nutrientes y la respuesta productiva del maíz. Asimismo, factores metodológicos como el corto tiempo de evaluación y la forma de aplicación de los bioinoculantes en condiciones no del todo favorables para su establecimiento pudieron limitar la expresión completa de sus beneficios. En este sentido, los resultados deben interpretarse como un avance preliminar, que evidencia el potencial de las bacterias solubilizadoras de fósforo, pero que requiere de investigaciones complementarias con periodos más prolongados, dosis optimizadas y un conjunto más amplio de indicadores fisiológicos y productivos que permitan consolidar su aplicabilidad en campo.

5 RECOMENDACIONES

Aumentar el número de aplicaciones de las bacterias solubilizadoras de fósforo, para asegurar una mayor colonización del sistema radicular y potenciar su efecto durante el ciclo del cultivo.

Extender el periodo de evaluación del ensayo a más de cinco semanas, permitiendo observar efectos a mediano y largo plazo sobre el desarrollo y rendimiento del maíz.

Realizar nuevos ensayos en suelos con mayor representatividad de los que se hayan en el Cauca (pH, P no disponible y contenido de Materia Orgánica con mayor acidez, donde el potencial de solubilización bacteriana pueda expresarse con mayor claridad, ya que estas condiciones son más representativas de los suelos problemáticos del Cauca.

Se recomienda que, en futuros ensayos, además de ampliar el tiempo de evaluación y aumentar el número de aplicaciones de los microorganismos, se realice un muestreo de suelo al finalizar el experimento. Dicho muestreo debería analizarse con el fin de determinar cambios en las propiedades químicas y la disponibilidad de fósforo, lo que permitiría corroborar si la actividad de las bacterias inoculadas tuvo un efecto real y persistente en el suelo. Este procedimiento aportaría evidencias complementarias sobre la colonización funcional de las cepas y su capacidad de modificar el ambiente edáfico en beneficio del cultivo.

Validar la tecnología en condiciones reales de campo, con productores locales, para evaluar su viabilidad técnica, económica y su impacto en sistemas agrícolas reales.

Incluir variables de rendimiento como peso seco de la biomasa y producción de grano, en futuras investigaciones, para determinar con mayor precisión el beneficio agronómico de la inoculación bacteriana.

Fomentar alianzas entre centros de investigación, instituciones educativas y el sector productivo, para facilitar la transferencia de este tipo de biotecnologías hacia los sistemas agrícolas del Cauca.

6 REFERENCIAS

- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University - Science*, 26(1), 1–20.
- Bastidas, J. Y. (2016). Zonificación y agrupamiento de suelos dedicados a pasturas en las zonas ganaderas del departamento del Cauca. Obtenido de <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/bitstream/handle/123456789/1407/zonificacion%20y%20agrupamiento%20de%20suelos%20dedicados%20a%20pasturas%20en%20la%20zona%20ganadera%20del%20departamento%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20suelos%20de%20la>
- Bravo, I., Montoya, J. C., & Menjivar, J. C. (2013). Retención y disponibilidad de fósforo asociado a la materia orgánica en un Typic Melanudands del departamento del Cauca, Colombia. *Acta agronómica*, 62(3), 261-267.
- (Carbajal, 2002) H. Carbajal, Evolución temporal del contenido iónico foliar en nogal pecanero : (Carya illinoensis (Wangenh) K. Koch). L. Romero, 2002.
- Dopico, E., Linde, A.R., & Garcia-Vazquez, E. (2009). Traditional and modern practices of soil fertilization: Effects on cadmium pollution of river ecosystems in Spain. *Human Ecology*, 37, 235–240.

García, R. A., Lovaisa, N. C., & Ulla, E. L. (2015). Aislamiento y caracterización de bacterias solubilizadoras de fosfatos del Noroeste Argentino y su efecto en la promoción de crecimiento en maíz (*Zea mays L.*). Revista agronómica del noroeste argentino, 35(1), 13-28.

Guzman, E. (2011). Aislamiento y caracterización de bacterias solubilizadoras de fósforo a partir de cuatro suelos de la provincia de Chimborazo. Obtenido de dspace.esPOCH.edu.ec: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1827/1/13T0728%20.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). (2005-2009). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento del Cauca. Bogotá D.C.

Lewis Torres, Cynthia. (2015). El Cauca y la productividad de sus tierras: La última petición de las comunidades ancestrales del Cauca al gobierno Nacional, de 20 mil hectáreas de tierra, reabren la discusión en torno a la productividad que estas pueden tener. Periódico Nuevo Liberal.

Múnera, G., y Meza, D. (2012). El fósforo elemento indispensable para la vida vegetal. Manual. Universidad Tecnológica de Pereira. 52p.

Nautiyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. FEMS Microbiology Letters, 170(1), 265–270.

Newton, G. L., Gascho, G. J., Vellidis, G., Hubbard, R. K., Gates, R. N., & Lowrance, R. R. (2000).

Liquid dairy manure fertilization of triple-crop forage systems. Animal, Agricultural and Food Processing Wastes Symposium, Des Moines, IA. In: Moore, J.A.(ed.) Animal Ag. and Food Process Wastes ASAE. St. Joseph, MI, p. 273-280.

Patiño, C. (2010). Solubilización de fosfatos por poblaciones bacterianas aisladas de un suelo del Valle del Cauca. Estudio de biodiversidad y eficiencia (Tesis doctoral en Ciencias Agropecuarias - Manejo de Suelos y Aguas). Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

Podschun, R., & Ullmann, U. (1998). Klebsiella spp. as nosocomial pathogens: Epidemiology, taxonomy, typing methods, and pathogenicity factors. *Clinical Microbiology Reviews*, 11(4), 589–603.

Patiño, C. (2020). Efecto de la inoculación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en pasto Ryegrass perenne sometido a déficit hídrico.

Pérez-Cordero, A. C.-A.-M. (2018). Bacterias endófitas promotoras de crecimiento aisladas de pasto colosoana, departamento de Sucre, Colombia. *Revista MVZ Córdoba*, 23(2). Obtenido de <https://doi.org/10.21897/rmvz.1347>

Pincay Verdezoto, A. K. (2014). Caracterización y evaluación de bacterias Pseudomonas sp. solubilizadoras de fósforo, presentes en la rizósfera de maíz (Zea mays L). (Tesis de

Ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de las Ciencias de la Vida, Carrera de Ingeniería en Biotecnología, Sangolquí, Ecuador.

Ramos Cabrera, E. V. (2021). Evaluación de bacterias endofíticas solubilizadores de fósforo en café, una alternativa sostenible. *Biotecnología En El Sector Agropecuario*.

Ramos Cabrera, E. V., Delgado Espinosa, Z. Y., & Solis Pino, A. F. (2024). Use of phosphorus-solubilizing microorganisms as a biotechnological alternative: A review. *Microorganisms*, 12(8), 1591. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12081591>

Riascos Rubiano, C. (2024). Efectos del déficit de fósforo en plantas de maíz.

Rivera, E. (2019, diciembre 7). Búsqueda de bacterias promotoras de crecimientos vegetal con potencialidad solubilizadores de fósforo asociadas al pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), y *Brachiaria* (*Brachiaria decumbes*). [Tesis de Tecnología Agroambiental]. Corporación Universitaria ComfacaUCA UnicomfacaUCA, Popayán.

Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4–5), 319–339.

Rosas, S., Rovera, M., & Correa, J. (2006). Phosphate-solubilizing *Pseudomonas putida* can influence the rhizobia-legume symbiosis. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 3502–3505.

Soto, E. S. (1961, julio). Influencia del pH sobre la fijación de fósforo. Obtenido de file:///C:/Users/Equipo/Downloads/48957-Texto%20del%20art%C3%ADculo-239056-1-10-20150206.pdf

Villada-Bedoya, S., Córdoba-Aguilar, A., Escobar, F., Martínez-Morales, I., & González-Tokman, D. (2019). Dung Beetle Body Condition: A Tool for Disturbance Evaluation in Contaminated Pastures. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(11), 2392–2404.

Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013). *Plant and Soil*, 378(1–2), 1–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x>

Berendsen, R. L., Pieterse, C. M., & Bakker, P. A. (2012). The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17(8), 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>

Fukami, J., Ollero, F. J., Megías, M., & Hungria, M. (2018). Phytohormones and induction of plant-stress tolerance and defense genes by seed and root inoculation with beneficial bacteria. *Symbiosis*, 76(2), 185–200. <https://doi.org/10.1007/s13199-018-0551-2>

- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, 237(2), 173–195. <https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2009). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 43–54. <https://doi.org/10.1051/agro:2008024>
- Kumar, A., Kumar, A., Devi, S., Patil, S., Payal, C., & Negi, S. (2014). Isolation, screening and characterization of bacteria from rhizospheric soils for different plant growth promotion (PGP) activities: an in vitro study. *Recent Research in Science and Technology*, 6(1), 15–22.
- Marschner, P. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Múnera, A., & Meza, D. (2012). *El fósforo en los suelos y su importancia en la producción de cultivos en Colombia*. Boletín Técnico No. 16, ICA.
- Richardson, A. E., Barea, J. M., McNeill, A. M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1), 305–339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4–5), 319–339. [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)

- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Shen, J., Yuan, L., Zhang, J., Li, H., Bai, Z., Chen, X., ... & Zhang, F. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiology*, 156(3), 997–1005. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175232>
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571–586.
- Piromyou, P., et al. (2011). Interaction between Bradyrhizobium and co-inoculated PGPR strains affects soybean yield. *Soil Science and Plant Nutrition*, 57(4), 587–599.
- Mitter, B., Brader, G., Afzal, M., Compant, S., Naveed, M., Trognitz, F., & Sessitsch, A. (2013). Advances in elucidating beneficial interactions between plants, endophytes, and associated microbes. *Frontiers in Plant Science*, 4, 423.
- Trabelsi, D., & Mhamdi, R. (2013). Microbial inoculants and their impact on soil microbial communities: a review. *BioMed Research International*, 2013, 863240.

Gopalakrishnan, S., Sathya, A., Vijayabharathi, R., Varshney, R. K., Gowda, C. L. L., & Krishnamurthy, L. (2015). Plant growth promoting rhizobia: challenges and opportunities. 3 *Biotech*, 5(4), 355–377.

Zaidi, A., Khan, M. S., Ahemad, M., Oves, M., & Wani, P. A. (2009). Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes. In D. K. Maheshwari (Ed.), *Microbial strategies for crop improvement* (pp. 23–50). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-01979-1_2

Janda, J. M., & Abbott, S. L. (2006). The Enterobacteria. *ASM Press*.

FAO. (2018). El maíz en América Latina: importancia y desafíos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Hernández, R., Salinas, J., & Pérez, C. (2015). Efecto del fósforo en el crecimiento y rendimiento del maíz (*Zea mays* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(2), 45-53.
<https://doi.org/10.22267/rcia.153202.10>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2020). Cadena de valor del maíz en Colombia: diagnóstico y perspectivas. Gobierno de Colombia.

Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4-5), 319-339.
[https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(99\)00014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2)

Viveros-Viveros, H., Gutiérrez-Miceli, F. A., Montes-Molina, J. A., Dendooven, L., & Rincón-Rosales, R. (2021). Respuesta del maíz a la fertilización fosfatada en suelos ácidos tropicales. *Agrociencia*, 55(6), 897-910.

ANEXO 1:

PROTOCOLOS DE LABORATORIO

Reactivación de cepas solubilizadoras de fósforo

- **Cepas utilizadas:** Claudia 7 y End-F34.
- **Conservación previa:** glicerol al 20% a -20 °C.
- **Medio de cultivo:** LB (Luria-Bertani) sólido.
- **Procedimiento:**
 1. Extraer una alícuota de 100 µL de la cepa conservada.
 2. Inocular en placa de Petri con medio LB sólido.
 3. Incubar a 28 °C por 72 horas.

2. Evaluación de la capacidad solubilizadora de fósforo

- **Medio de cultivo:** NBRIP (National Botanical Research Institute Phosphate growth medium). Contiene glucosa, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KCl y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, y es utilizado comúnmente para evaluar la capacidad solubilizadora de fosfato en bacterias.
- **Condiciones:**

Temperatura: 28 °C.

Tiempo: 72 horas.

- **Procedimiento:**
 - Tomar colonias frescas de cada cepa reactivada.
 - Inocular en placas con medio NBRIP.
 - Observar formación de halos de solubilización alrededor de las colonias.

3. Preparación de inóculo para aplicación en plantas

- **Medio de cultivo:** LB líquido.
- **Objetivo:** Alcanzar una concentración de $\sim 1 \times 10^8$ UFC/mL.
- **Procedimiento:**
 1. Inocular las cepas en 100 mL de medio LB líquido estéril.
 2. Incubar en agitación (150 rpm) a 28 °C durante 24-48 horas.
 3. Descartar el sobrenadante y resuspender el pellet en solución salina estéril 1 M.

4. Inoculación en plantas de maíz

- **Cantidad de inóculo por planta:** 4 mL (1×10^8 UFC/mL).
- **Momento de aplicación:** 15 días después de la siembra, cuando las plántulas alcanzaron ~ 5 cm de altura.
- **Forma de aplicación:** directa en el sustrato, al pie de la planta.

ANEXO 2:

RESULTADOS ANÁLISIS DE SUELO

INFORME No.51086 EDUARD FABIAN RIVERA MONTENEGRO 2025-04-29

AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

ONAC

ACREDITADO

ISO/IEC 17025:2017

13-LAB-031

REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO

GESTIÓN DE LA AGENDA CORPORATIVA

LABORATORIO DE QUIMICA ANALÍTICA

1. Información del cliente

NOMBRE Y APELLIDO:

EDUARD FABIAN RIVERA MONTENEGRO

CÉDULA O NIT:

1002959463

DIRECCIÓN:

CALLE 5A #7-25

DEPARTAMENTO:

CAUCA

MUNICIPIO:

TIMBÍO

TEL, FIJO/CEL:

3245691154 / 3245691154

TIPO DE ANALISIS:

FERTILIDAD COMPLETO

NÚMERO BOLSA

51086

CÓDIGO DE LABORATORIO

LQAS25-003667

2. Información de la muestra suministrada por el cliente

IDENTIFICACIÓN:

SUELO CULTIVO MAÍZ

MATRIZ:

SUELOS

VEREDA:

LA CABANA

FINCA:

SAN MARTIN

PRODUCTOR:

EDUARD FABIAN RIVERA MONTENEGRO

CULTIVO(S):

MAÍZ VARIEDAD CON 0 MESE(S) DE EDAD Y VARIEDAD CON 0 DE EDAD

EMAIL ENVÍO RESULTADOS:

eduardrivera@unicomfacauc.edu.co

ALTURA:

1780M.S.N.M

PROFUNDIDAD :

0 A 30 CM

TIPO DE RIEGO

NO TIENE

TOPOGRAFIA:

PENDIENTE MODERADA

DRENAJE:

REGULAR DRENAJE

En la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA contamos con acreditación ONAC, vigente a la fecha, con código de acreditación 13-LAB-031, bajo la norma ISO/IEC 17025:2017, en los ensayos de: pH (Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.), fósforo disponible Bray II (Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.), conductividad eléctrica en suelos (NTC 5596:2008 Método B.), cationes intercambiables en suelo calcio, magnesio, potasio y sodio disponibles (Protocolo de bases intercambiables en suelo GA-R-50 Versión 10.), micronutrientes en suelo por Olsen modificado Hierro, Manganeseo, Cobre y Zinc (NTC 5526:2007 Método D.), determinación de Carbono Orgánico en suelo (Determinación de Carbono orgánico en suelo Versión 5 GA-R-119 Versión 5.). Los resultados marcados con (*) se basan en actividades de evaluación de la conformidad no incluidas en el alcance de acreditación.

Yeni Rodriguez Giraldo (E6968)

Coordinador Técnico Científico de Laboratorios de Química Analítica

FECHA DE RECEPCIÓN:

2025-04-07

FECHA DE ANÁLISIS:

DE 2025-04-11 A 2025-04-23

FECHA DE REPORTE:

2025-04-29

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO.	VALOR	INTERPRETACIÓN*
Determinación de pH (1:2.5)	Unidades de pH	Acidez activa/pH en suelos GA-R-46, versión 06, 2021-10-25.	5.94	Moderadamente ácido
Determinación de Conductividad eléctrica	dS/m	NTC 5596:2008 Método B.	0.91	No salino
Determinación de Carbono Orgánico	g/100g	Determinación de Carbono orgánico en suelo GA-R-119 versión 5	4.43	No Aplica
(*)Materia orgánica (MO)	g/100g	Cálculo según NTC 5403 Walkley & Black	7.64	Alto
Determinación de Fósforo (P) disponible	mg/kg	Fósforo disponible en suelos GA-R-48, versión 07, 2021-10-25.	95.93	Alto
(*)Azufre (S) disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	13.31	Medio
(*)Capacidad Interc. Catiónica Efect (CICE)	cmol(+) /kg	Cálculo	22.44	Alta
(*)Boro (B) Disponible	mg/kg	Fosfato monobásico de calcio	0.39	Medio
(*)Acidez (Al+H)	cmol(+) /kg	KCl	ND	No indica
(*)Aluminio (Al) Intercambiable	cmol(+) /kg	KCl	ND	Sin restricción
Calcio (Ca) disponible	cmol(+) /kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 10	17.04	Alto
Magnesio (Mg) Disponible	cmol(+) /kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 10	2.97	Alto
Potasio (K) Disponible	cmol(+) /kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 10	2.34	Alto
Sodio (Na) Disponible	cmol(+) /kg	Bases intercambiables en suelos GA-R-50 versión 10	<0.14	Normal

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3

CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATÁ

KILÓMETRO 14 VÍA MOSQUERA – BOGOTÁ, MOSQUERA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.

TELÉFONOS: 601 914 4677 EXTENSION: 1369

SUELOS@AGROSAVIA.CO

CÓDIGO: GA-F-97

VERSIÓN: 8

FECHA DE VIGENCIA: 2024-04-25

Página 1 de 3

[77]

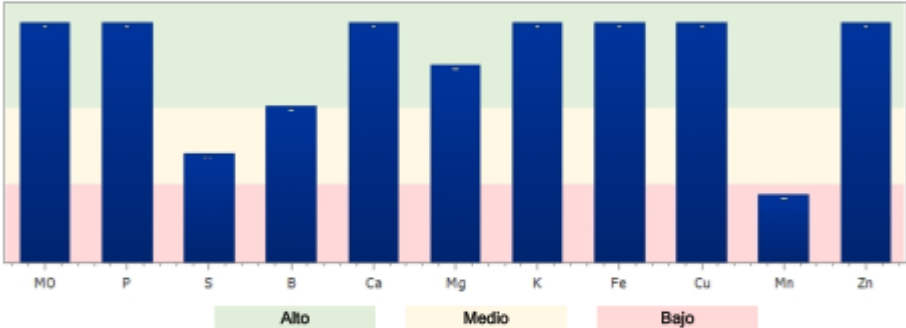


REPORTE DE RESULTADOS DE
LABORATORIO
GESTIÓN DE LA AGENDA
CORPORATIVA

ISO/IEC 17025:2017
13-LAB-031

DETERMINACIÓN ANALÍTICA	UNIDAD	MÉTODO.	VALOR	INTERPRETACIÓN*
Hierro (Fe) Olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	82.53	Alto
Cobre (Cu) Olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	5.75	Alto
Manganeso (Mn) Olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	4.28	Bajo
Zinc (Zn) Olsen Disponible	mg/kg	NTC 5526:2007 Método D.	8.91	Alto
(*)Saturación de Calcio	%	Cálculo	76	Alto
(*)Saturación de Magnesio	%	Cálculo	13	Bajo
(*)Saturación de Potasio	%	Cálculo	10	Alto
(*)Saturación de Sodio	%	Cálculo	0	Normal
(*)Saturación de Aluminio	%	Cálculo	0	Normal

GRAFICA DE INTERPRETACION DE RESULTADOS



NOTAS: 1) Interpretación basada en: ICA, 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Manual de asistencia N 25; 2) ND = No Determinado; 3) Se hace corrección por pH (factor de corrección por humedad) para los análisis de Materia orgánica (MO), Fósforo disponible (P) Bray II, Azufre disponible (S), Acidez intercambiable (Al+H), Aluminio intercambiable (Al), Calcio intercambiable (Ca), Magnesio Intercambiable, Potasio intercambiable (K), Sodio intercambiable (Na), Hierro disponible (Fe)Olsen, Manganeso disponible (Mn) Olsen, Zinc disponible (Zn) Olsen, Cobre disponible (Cu) Olsen y Boro disponible (B).

El método utilizado para determinar micronutrientes en suelo bajo la NTC 5526:2007 Método D. No incluye el uso de floculante en la solución extractora (reactivo que se utiliza para aumentar la velocidad de filtración).

Observaciones: Ninguna.

- La información de la(s) muestra(s) entregada(s) al laboratorio fue(ron) suministrada(s) por el cliente, por tanto, el usuario del servicio es responsable de los datos reportados en relación con cada una de las muestras.
- Los resultados expresados en el informe se obtienen de la muestra tal como fue suministrada por el usuario del servicio.
- El cliente es responsable del muestreo y traslado de muestras al laboratorio, las muestras no son modificadas o alteradas en su composición desde la recepción y sus características son las reflejadas en el análisis.
- Los resultados son válidos únicamente para la muestra en referencia.
- Este documento ha sido producido electrónicamente y es válido sin la firma.
- Este documento no puede ser reproducido total ni parcialmente, sin la autorización formal de AGROSAVIA.
- Para peticiones, quejas y solicitudes de información, comuníquese al correo electrónico atencionalcliente@agrosavia.co o a la línea telefónica 018000121515.

CORPORACIÓN COLOMBIANA DE INVESTIGACIÓN AGROPECUARIA, NIT: 800194600-3
CENTRO DE INVESTIGACIÓN TIBAITATÁ
KILÓMETRO 14 VÍA MOSQUERA – BOGOTÁ, MOSQUERA, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.
TELÉFONOS: 601 914 4677 EXTENSIÓN: 1369
SUELOS@AGROSAVIA.CO

CÓDIGO: GA-F-97

VERSIÓN: 8

FECHA DE VIGENCIA: 2024-04-25