

Mejoramiento de la fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en el bosque seco tropical mediante fuentes orgánicas e inorgánicas: un análisis sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento.

Improvement of photosynthesis in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the tropical dry forest through organic and inorganic sources: an analysis on gas exchange, biomass partitioning and yield.

Jhon Eduar Noriega Ortega¹, Jairo Polanía Reyes¹,
Karen Natalia Asencio Otalora¹

¹ Centro de Formación Agroindustrial, SENA, jhnoriega@sena.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1055-1159>

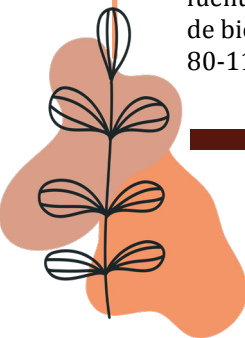
¹ Centro de Formación Agroindustrial, SENA, japolania@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0009-1184-6435>

¹ Centro de Formación Agroindustrial, SENA, kasencio@sena.edu.co, <https://orcid.org/0009-0000-7479-3574>

Autor para correspondencia: jhnoriega@sena.edu.co

Como citar:

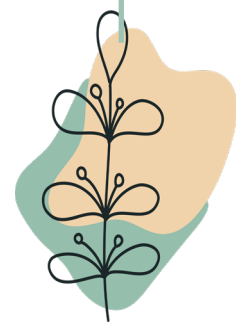
Noriega Ortega, J. E., Polanía Reyes, J., y Asencio Otálora, K. N. (2024). Mejoramiento de la fotosíntesis en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en el bosque seco tropical mediante fuentes orgánicas e inorgánicas: un análisis sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 11(1), 80-111.



Resumen

La aplicación conjunta de fertilizantes orgánicos e inorgánicos puede mejorar la capacidad del suelo para liberar nutrientes esenciales en formas fácilmente asimilables, de manera gradual y sostenida, mejorando la sostenibilidad y la eficiencia de los sistemas agrícolas. La implementación de esta tecnología en leguminosas como el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de bosque seco tropical ha sido poco explorada. El objetivo de este estudio es la evaluación del intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento de frijol como respuesta a la aplicación de fuentes orgánicas e inorgánicas. El experimento se realizó con frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.), variedad calima, sembrado en un suelo con bajo contenido de materia orgánica y baja disponibilidad de nutrientes. Se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización: fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y un control sin fertilización (SNF). El perfil climatológico mostró que las altas temperaturas diurnas y las escasas precipitaciones son un riesgo para la producción. Los resultados revelaron que la fertilización que incluyó fuentes orgánicas, redujo ciertos factores fisiológicos del frijol comparado con INF, como la conductancia estomática (g_s) y el uso eficiente de agua (WUE_g) sin generar impactos significativos en la fotosíntesis neta (P_n). El aumento en la producción de grano con el tratamiento OFCF, se relacionó con la habilidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética, gracias al suministro más prolongado de NPK y utilizando un mecanismo fisiológico basado en ahorrar agua en el suelo y disipar el efecto negativo de la temperatura del aire. Este estudio validó, en condiciones de campo, los beneficios de combinar fertilizantes orgánicos e inorgánicos en la producción de frijol común en condiciones de bosque seco tropical.

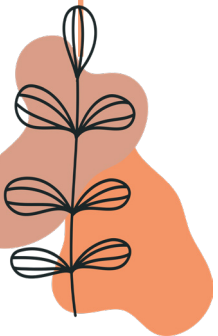
Palabras clave: frijol común, insumos orgánicos, fertilizante inorgánico, estrés abiótico, fotosíntesis, uso eficiente de agua, crecimiento y rendimiento.



Abstract

The combined application of organic and inorganic fertilizers can enhance the soil's ability to gradually and sustainably release essential nutrients in easily assimilable forms, thereby improving the sustainability and efficiency of agricultural systems. The implementation of this technology in legumes critical for human nutrition, such as common beans, in dry tropical forest conditions has been insufficiently explored. The objective of this study was to evaluate gas exchange, biomass partitioning, and the yield of beans in response to the application of organic and inorganic sources. The experiment was conducted using common bean variety Calima, planted in soil with low organic matter content and limited nutrient availability. Four fertilization treatments were applied: inorganic fertilization (INF), organic-mineral fertilization 1 (OFCC), organic-mineral fertilization 2 (OFCF), and a control with no fertilization (SNF). The climatic profile indicated that high daytime temperatures and scarce precipitation pose risks to production. Results revealed that the inclusion of organic sources in fertilization reduced certain physiological factors of the beans compared to the INF treatment, such as stomatal conductance (g_s) and water use efficiency (WUE_e), without significantly impacting net photosynthesis (P_n). The increase in grain yield observed with the OFCF treatment was related to the plant's ability to optimize its photosynthetic capacity due to a more prolonged supply of NPK, along with a physiological mechanism focused on water conservation in the soil and mitigating the negative effects of air temperature. This study validated, under field conditions, the benefits of combining organic and inorganic fertilizers for the production of common beans in dry tropical forest environments.

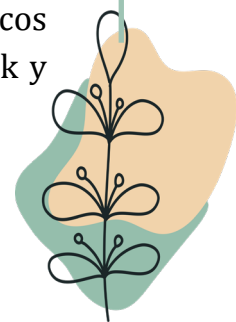
Keywords: common bean; organic inputs; inorganic fertilizer; abiotic stress; photosynthesis; water use efficiency; growth and yield.



Introducción

Las leguminosas constituyen la principal fuente de proteínas y nutrientes esenciales y accesibles para la población en las regiones de mayor pobreza a nivel mundial (Iqbal et al., 2006; Ríos-Castillo et al., 2018; Velázquez et al., 2010). En América Latina, la leguminosa de mayor importancia en la alimentación de las personas es el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y la mayor parte de la producción proviene de pequeños agricultores (Andrade et al., 2016; Suárez et al., 2021, 2022a). En Colombia, en el año 2023, se sembraron 78.184 hectáreas que produjeron 95.510 toneladas de frijol, con rendimiento promedio de frijol arbustivo de 930 kg ha⁻¹. El departamento del Huila con un área sembrada de 11.800 hectáreas y una producción de 16.520 toneladas, que equivalen al 17,2% de la producción nacional, lo posicionan como el principal productor del país. Sin embargo, estos datos son 26,4% menores en área sembrada y 3,4% en producción, comparados con el año 2020 (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas FENALCE, 2023). Esta disminución en la producción se puede atribuir a factores agroecológicos y a la falta de acceso a tecnología relacionada con el uso adecuado de fertilizantes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, 2018; Lafitte, 1994).

A pesar del importante papel en los sistemas agroalimentarios en los trópicos, la producción de frijol común se ha visto afectada por el estrés abiótico relacionado con altas temperaturas, baja disponibilidad de agua (Beebe et al., 2013; Godfray et al., 2010; Massawe et al., 2016; Polania et al., 2016) y baja fertilidad del suelo (Guo et al., 2002; Suárez et al., 2018). A nivel de suelo, el frijol común requiere que los nutrientes se encuentren fácilmente disponibles (Guimarães et al., 2017), por lo tanto, se puede determinar que es un cultivo sensible a suelos de baja fertilidad (Nascente et al., 2017). A nivel de planta se reporta menor fijación simbiótica de nitrógeno (Araújo et al., 2015), disminución de la actividad fotosintética y el intercambio de gases con el medio ambiente al reducir el área foliar, cerrar sus estomas y aumentar la asignación de fotoasimilados en hojas y sistema radicular (Chtouki et al., 2022; Hermans et al., 2006; Rao et al., 2016), que se traduce en menor rendimiento de grano (Beebe et al., 2014; Singh et al., 2003). En las regiones tropicales, la baja fertilidad del suelo es un problema constante en la producción de frijol (Janick, 2012). En consecuencia, se han realizado esfuerzos para desarrollar estrategias tecnológicas que mitiguen ese efecto negativo. Una de estas estrategias es la aplicación conjunta de fertilizantes orgánicos e inorgánicos para la producción (Ahmadi y Arain, 2021; S. Beebe, 2012; Sitinjak y Purba, 2018; Suárez et al., 2022a; Tang et al., 2019).



Se ha demostrado que los fertilizantes inorgánicos proporcionan fracciones de Nitrógeno, Fósforo y Potasio (NPK) fácilmente asimilables, mejorando el crecimiento de las plantas de frijol y como consecuencia, rendimientos más estables, debido a la mejora de la entrada de carbono y su capacidad para convertir energía solar en biomasa (Abera et al., 2005; Mäder et al., 2002). Asimismo, la incorporación de materia orgánica optimiza la capacidad de retención de agua y fertilidad del suelo (Baghdadi et al., 2018; Liu et al., 2010), promueve una mayor actividad fotosintética y conductancia estomática eficiente, mejorando el rendimiento de biomasa (Bunce, 2006; Clarkson, 1996). Esto indica, que el uso de fertilizantes orgánicos combinados con fertilizantes inorgánicos, proporciona nutrientes esenciales de manera gradual y sostenida, mejorando la relación entre la fotosíntesis y la transpiración y, por lo tanto, un aumento en el uso eficiente de agua (Gai et al., 2017; Moraga Quezada, 2021; Savala et al., 2021) lo que conduce a un mayor rendimiento del grano (Silva et al., 2024).

Ante este panorama, el mayor desafío para investigadores y agricultores, es encontrar la combinación correcta de la fertilización con fuentes orgánicas e inorgánicas como práctica agronómica para mejorar el crecimiento y rendimiento de frijol en ecosistemas de bosque seco tropical en el norte del departamento del Huila, zona que se caracteriza principalmente por suelos de baja fertilidad (Chávarro et al., 2017; Saavedra-Mora et al., 2019) y altas temperaturas del aire (Mora et al., 2017; Suárez et al., 2020). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es la evaluación del efecto de la fertilización con fuentes orgánicas e inorgánicas sobre el intercambio gaseoso, partición de biomasa y rendimiento en el bosque seco tropical.

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

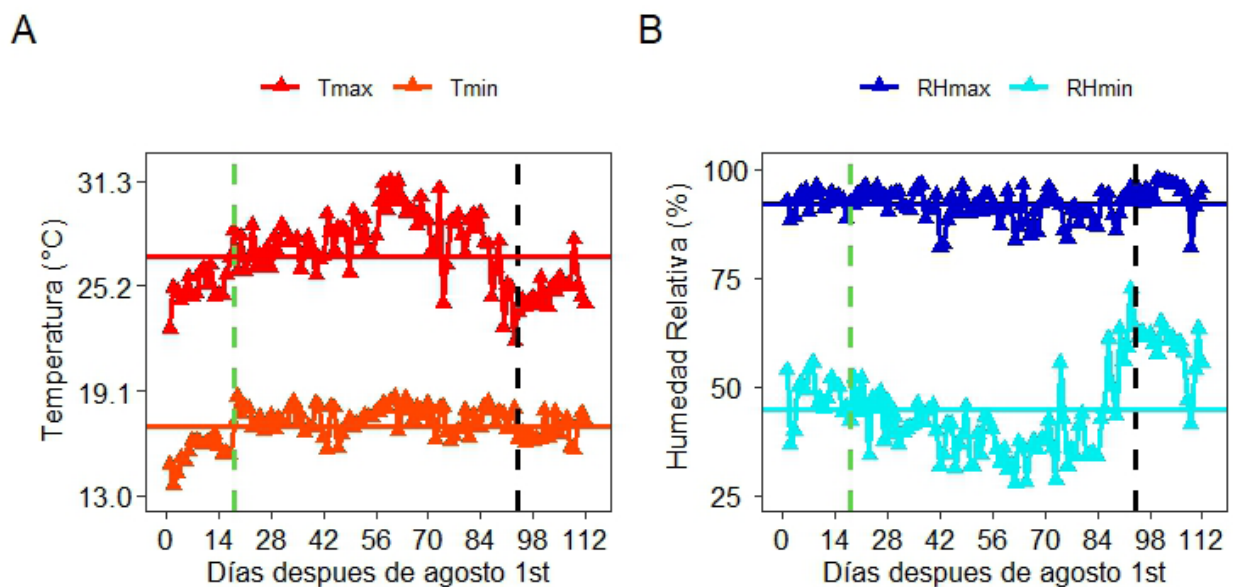
El presente estudio se realizó en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura SENA, localizado en municipio de Campoalegre, Huila (latitud: 2° 36' 55" N, longitud: 75° 21' 33" O), kilómetro 38 al sur de Neiva. La zona de estudio se encuentra a 600 msnm, con temperatura promedio de 26,5°C, (Chávarro et al., 2022). Humedad relativa de 27%-99% y precipitación anual de 1300-1800 mm (Saavedra et al., 2018). Pertenecer a la zona de vida del bosque seco tropical (bs-T) (Holdridge et al., 1967). Durante el periodo de estudio, los valores medios de humedad relativa máxima y mínima oscilaron entre 92% y 44,94%, respectivamente, acompañados de una



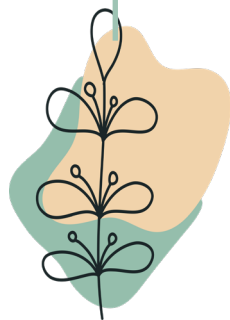
precipitación acumulada de 237,5 mm, 32% menos que el mínimo requerido para el frijol (Chavarria et al., 2020; Salcedo, 2018). El rango óptimo de temperatura para el crecimiento del frijol oscila entre 17,5°C y 23,1°C (Beebe, 2012; Beebe et al., 2011). En nuestro estudio las temperaturas máximas y mínimas superaron el valor medio de 26,95°C y 17,06°C, respectivamente, alcanzando valores por encima de los 30°C. Estos valores indican que el clima del bosque seco tropical es un factor limitante en la producción de frijol.

Figura 1.

Distribución de: A) Temperaturas máximas/mínimas. B) Humedad relativa máximas/mínimas durante el período de crecimiento del cultivo en condiciones del Centro de Formación Agroindustrial (2023). Las líneas roja y naranja muestran el promedio de la temperatura máxima y mínima del aire, respectivamente: Tmax: 26,95°C, Tmin: 17,06°C. Las líneas azul oscuro y azul claro muestran el promedio de la humedad relativa máxima y mínima del aire, respectivamente: RHmax: 92,0%, RHmin: 44,94% y la línea verde y negra discontinua indica el inicio y final del periodo de evaluación.



Nota. Elaboración propia.



El experimento se realizó en un terreno de 330 m², donde anteriormente se producía maíz (con baja productividad, 5 ton ha⁻¹). El suelo corresponde a la clase textural franco y pH ligeramente ácido, bajo contenido de materia orgánica, N, K, S, Na y Fe para el cultivo de frijol, contenidos de P, Ma, Ca, Mn y Zn no adecuados para frijol, y textura y pH ideal para su cultivo.

Tabla 1.

Propiedades fisicoquímicas del suelo del sitio experimental.

Parámetro	Valor	Unidad
Textura	Franco	% (g/100g)
pH	6,27	Unidades de pH
CIC	11,91	cmol(+)/kg
Carbono orgánico	0,42	% (g COT/100 g suelo)
Materia Orgánica	0,72	% (g MO/100 g suelo)
Nitrógeno Total	0,03	% (g N/100 g suelo)
Conductividad eléctrica	0,307	dS/m
Sodio	0,07	cmol(+)/kg
Potasio	0,22	cmol(+)/kg
Calcio	8,65	cmol(+)/kg
Magnesio	2,98	cmol(+)/kg
Manganeso	58,26	mg/kg
Zinc	10,91	mg/kg
Cobre	2,5	mg/kg
Fósforo disponible	91,12	mg/kg

Nota. Elaboración propia

El área experimental se preparó mediante desbrozadora y pasadas con arado de rastra y rastrillo. A los 20 días se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización con tres repeticiones. Se utilizaron los siguientes tratamientos: fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y un control sin fertilización (SNF) **(Tabla 2)**. Los tratamientos se realizaron en 12 parcelas de 3×6 m, utilizando un esquema completamente al azar. El material utilizado fue frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad calima, con densidad de siembra de 117.206 plantas ha⁻¹, distribuidas en surcos de 0,6 m de ancho y 0,14 m entre plantas. El experimento tuvo una duración de 76 días (18 de agosto de 2023 - 02 de noviembre de 2023).

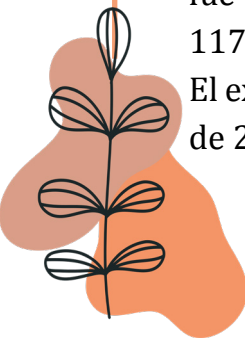


Tabla 2.

Tratamientos utilizados en términos de cantidad por producto aplicado (Kg ha⁻¹).

Tratamiento	Productos (Kg ha ⁻¹)			
	Fertilizante orgánico 1	Fertilizante orgánico 2	15-15-15	17-6-18-2
INF	-	-	300	150
OFCC	3500	-	150	75
OFCF	-	3500	150	75
SNF	-	-	-	-

Nota. Elaboración propia

La aplicación de los fertilizantes orgánicos se realizó ocho días antes de la siembra y los inorgánicos, en dos aplicaciones, en el momento de la siembra y 15 días después. Los fertilizantes utilizados fueron:

- Producción 17-6-18-2®, Nutrimon, Monómeros Colombo Venezolanos S.A., con los siguientes elementos en la proporción de N:P:K:Mg:S igual a 17:6:18:2:2 (relación N-NH₄, N-NO₃ = 61:39; fuente de P-P₂O₅; fuente de K-K₂O).
- 15-15-15®, Nutrimón, Monómeros Colombo Venezolanos S.A., con los siguientes elementos en la proporción de N:P:K igual a 15:15:15 (relación N-NH₄, N-NO₃ = 69:31; fuente de P-P₂O₅ fuente de K-K₂O).
- Fertilizante orgánico 1, derivado del compost de cacota de cacao, restos de poda de cacao, estiércol bovino y bagazo de caña, la formulación contiene los residuos orgánicos en la proporción porcentual igual a 47:31:20:2 (Noriega et al., 2023). Las características fisicoquímicas del fertilizante se muestran en la Tabla 3.
- Fertilizante orgánico 2, derivado del compost de pulpa de café, estiércol bovino, aserrín y bagazo de caña, la formulación contiene los residuos orgánicos en la proporción porcentual igual a 70:25:2.5:2.5 (Noriega et al., 2023). Las características fisicoquímicas del fertilizante se muestran en la Tabla 3.

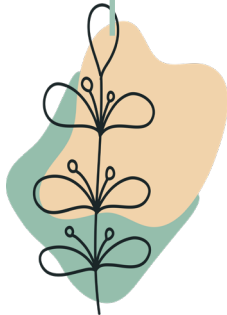


Tabla 3.*Propiedades fisicoquímicas de los fertilizantes orgánicos.*

Parámetro	Fertilizante orgánico 1 (cacao)	Fertilizante orgánico 2 (café)	Unidad
Humedad	7,68 ± 0,54	7,56 ± 0,32	% (g/100g)
pH	7,9 ± 0,17	9,0 ± 0,19	Unidades de pH
CIC	>19,5	>19,5	cmol(+)/kg
Carbono orgánico total	15,2 ± 1,47	10,1 ± 0,98	% (g COT/100 g)
Materia Orgánica	26,2	17,4	% (g MO/100 g)
Nitrógeno Total	1,31	0,87	% (g N/100 g)
R. Carbono/Nitrógeno	11,6	11,6	-
Conductividad eléctrica	2,28	5,49	dS/m
Sodio	0,45	0,48	cmol(+)/kg
Potasio	15,8	45,6	cmol(+)/kg
Calcio	12,6	7,76	cmol(+)/kg
Magnesio	6,22	2,51	cmol(+)/kg
Manganeso	8,29	4,07	mg/kg
Zinc	1,93	2,70	mg/kg
Cobre	0,08	1,53	mg/kg
Fósforo disponible	20,4	15,2	mg/kg

Nota. Tomado de Noriega et al (2023)

El control de arvenses (ciperáceas y gramíneas) se realizó con la aplicación del herbicida *Basagran 480* a los 10 y 35 días después de la siembra (dds), el control preventivo de insectos plaga y enfermedades fúngicas con la aplicación del producto biológico *SAFER MIX* y caldo bordelés respectivamente, con frecuencias de aplicación cada 12 días después de la siembra. Todos los productos se emplearon de acuerdo con las dosis recomendadas.



Parámetros de intercambio gaseoso en hojas de frijol común

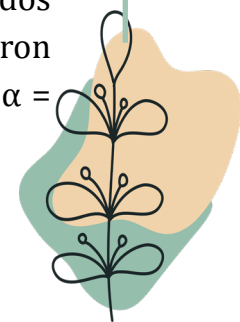
El análisis fisiológico se realizó durante la floración (BBCH 65), etapa donde la planta expresa su máximo potencial de asimilación de CO_2 a través de la fotosíntesis (Smith et al., 2022; Suárez et al., 2022b), se tomó el foliolo central de la hoja 3 contada desde del meristemo apical, la cual se encontraba completamente extendida, madura y expuesta. Las medidas de intercambio gaseoso se realizaron usando el analizador de gases infrarrojo *CI-340 Handheld Photosynthesis System* (CID Bio-Science, Inc. Camas, WA, Estados Unidos), a una temperatura de 25°C , con concentraciones de CO_2 en sistema abierto y siguiendo lo establecido por Zou et al (2020). La tasa de fotosíntesis neta (P_n) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), tasa de transpiración (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), conductancia estomática (g_s) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), concentración subestomática de CO_2 (C_i) (mol mol^{-1}) y el uso eficiente de agua (WUE_e) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) se midieron entre las 07:00 y las 9:00 horas. El valor de limitación estomática (g_{lim}) se calculó utilizando la siguiente fórmula: $g_{\text{lim}} = 1 - (C_i / C_a)$, según Yin et al (2006). Con la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de la hoja (medida por el Sistema de Fotosíntesis Portátil CI-340) calculamos el diferencial de temperatura foliar (LTD) ($^\circ\text{C}$).

Índices de partición de biomasa y rendimiento del grano en frijol común

Durante la fase de llenado de vainas (BBCH 75) se tomaron cuatro plantas al azar por cada unidad experimental ($n=12$), de cada planta se obtuvieron los pesos de la materia seca (g) la raíz (RoW), el tallo (StW), la hoja (LeW), la vaina (PoW), y en el momento de la cosecha (BBCH 89), la producción de granos por planta (RG), el peso total de las vainas por planta (WPP) y el peso de la biomasa del dosel (CB) (Suárez et al., 2022a). A partir de este pesaje se calculó el índice de partición de biomasa del dosel (CB) y el índice de cosecha (HI) (Beebe et al., 2013; Suárez et al., 2022a).

Análisis Estadístico

Para observar el efecto de cada tipo de fertilización sobre el intercambio de gases de la hoja, materia seca, rendimiento de grano, e índices de partición de la materia seca, se realizó una tabla resumen de las variables medidas utilizando los resultados del análisis de varianza y las diferencias entre los tipos de fertilización, se analizaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey con una significación de $\alpha =$



0,05. Todos los análisis se realizaron utilizando el software estadístico R (v4.4.1; R Core Team 2024), los paquetes de R dplyr (v1.1.4; Wickham et al., 2023), multcompViewm (v0.1.10; Graves et al., 2024) y las salidas gráficas a través del paquete ggplot2 (v3.5.1; Wickham 2016).

Resultados

Se resumieron las características climáticas de la principal temporada de cultivo en Campoalegre para los años 1992-2023 (**Figura 2**). La temporada de crecimiento se caracteriza por valores más altos de temperaturas máximas, valores más bajos de temperaturas mínimas y escasas precipitaciones en los primeros 50 días de la temporada. La humedad relativa es moderada en este ambiente de bosque seco tropical y cuando se combina con altas velocidades del viento, conduce a valores altos de VPD durante la mayor parte de la temporada. Se cree que las temperaturas máximas diarias medias superiores a 30°C reducen la producción de frijol (Porch et al., 2010; Suárez et al., 2021). Entre los años 1992 y 2023, aproximadamente el 42% de las temporadas de crecimiento experimentaron al menos 1 día en el que las temperaturas máximas diarias superaron los 30°C.

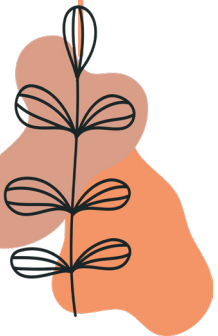
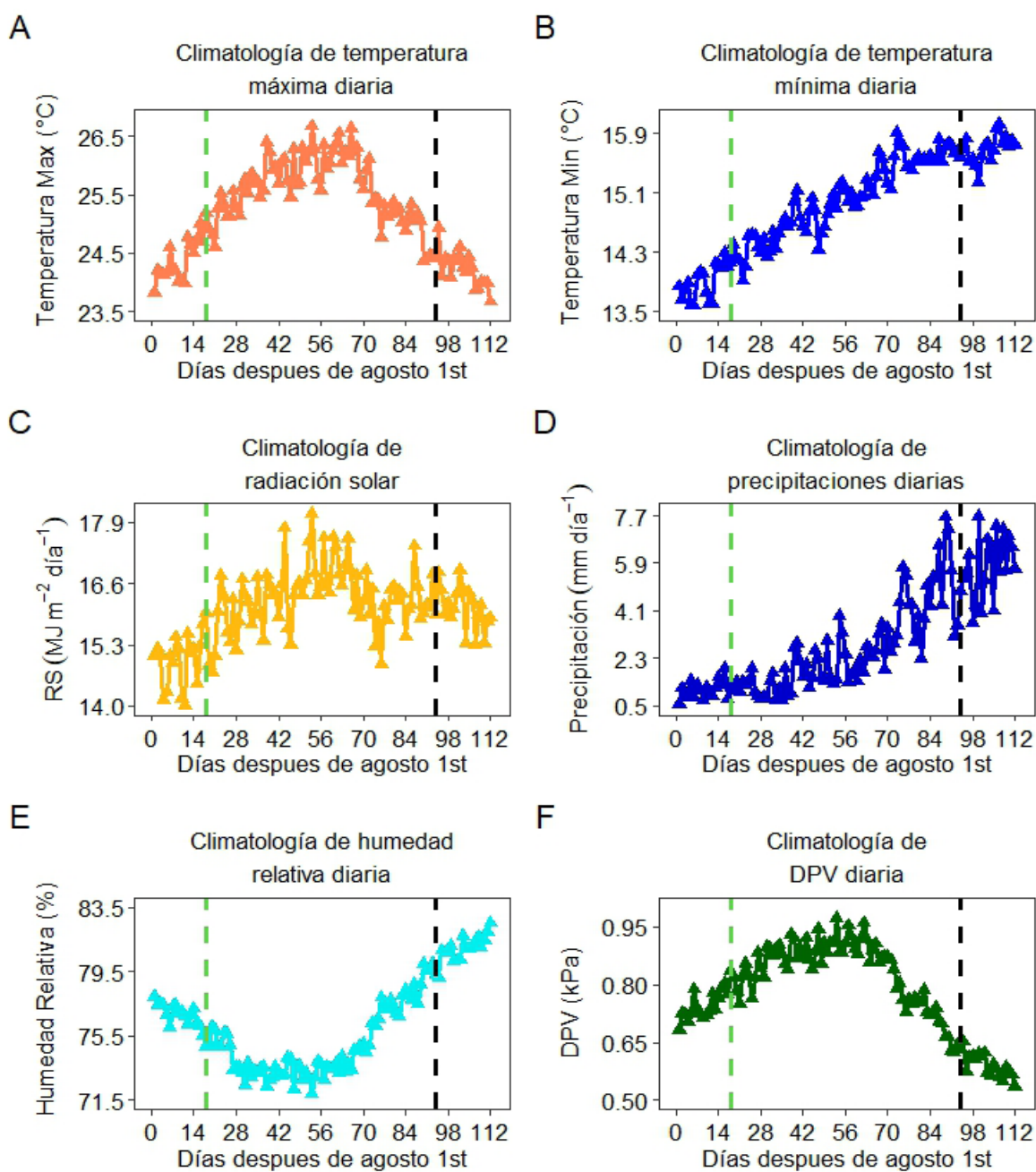
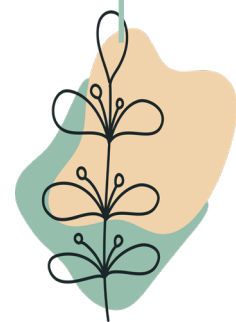


Figura 2.

Características climáticas de la principal temporada de cultivo en Campoalegre para los años 1992-2023. **(A)** Temperatura máxima diaria ($^{\circ}\text{C}$), **(B)** temperatura mínima diaria ($^{\circ}\text{C}$), **(C)** radiación solar diaria ($\text{MJm}^{-2} \text{ día}^{-1}$), **(D)** precipitación diaria (mm día^{-1}), **(E)** humedad relativa (%), **(F)** déficit diario de presión de vapor (kPa).



Nota. Elaboración propia



Ajustes en el intercambio gaseoso del frijol común cultivado bajo diferentes tipos de fertilización

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la tasa de fotosíntesis neta (P_n) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la conductancia estomática (g_s) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la concentración subestomática de CO_2 (C_i) (mol mol^{-1}), la limitación estomática (g_{lim}), el diferencial de temperatura foliar (LTD) ($^{\circ}\text{C}$) y el uso eficiente de agua (WUE_e) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) en plantas de frijol sin fertilización (SNF) comparado con la fertilización inorgánica (INF) y la fertilización orgánico mineral (OFCC, OFCF), a excepción de la tasa de transpiración (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), presentado un valor de p mayor a 0,05.

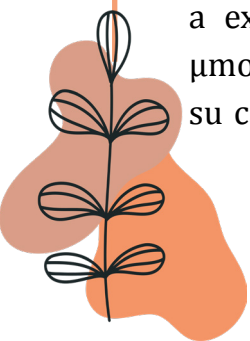
Tabla 4.

Variables fisiológicas en frijol común cultivado bajo diferentes tratamientos de fertilización.

Variable	INF				OFCC				OFCF				SNF				Valor de P	
	Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.			
P_n	19	±	2,7	a	16,8	±	2,23	a	14,9	±	4,05	a	4,57	±	0,95	b	0,000851 ***	
E	11	±	1,4	a	10,5	±	0,66	ab	10,6	±	11	b	9,06	±	0,17	b	0,0546	
g_s	306	±	22	a	228	±	33,8	b	234	±	22,6	b	188	±	12,3	b	0,00218 **	
C_i	296	±	7,7	b	287	±	50,1	a	323	±	47,1	ab	420	±	22,4	a	0,00868 **	
WUE_e	1,7	±	0,1	a	1,61	±	0,25	a	1,42	±	0,4	a	0,50	±	0,15	b	0,00254 **	
g_{lim}	0,4	±	0,02	a	0,35	±	0,07	a	0,22	±	0,04	b	0,1	±	0,03	c	0,000125 ***	
LTD	-2	±	0,7	c	3,29	±	1,0	a	0,19	±	0,4	b	0,73	±	0,36	b	8,79e-05 ***	

Fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y el control sin fertilización (SNF). Media ± desviación estándar. a, b, c: Los promedios con una letra en común entre filas no son significativamente diferentes con un 5% de probabilidad. *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

La mayor tasa de fotosíntesis neta (P_n) se observó por el tratamiento INF con $19,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ seguido por los tratamientos OFCC y OFCF, que presentan tasas de $16,8$ y $14,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente, sin embargo, estas diferencias no son significativas, a excepción de SNF, donde la tasa fotosintética disminuye drásticamente a $4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Es decir que las plantas de frijol sin fertilización reducen el 76,3% de su capacidad para asimilar el CO_2 atmosférico comparado con INF, y entre 73,3% y



69.8% con OFCC y OFCF respectivamente (**Tabla 4**). La conductancia estomática (g_s) mostró una tendencia similar a P_n . El tratamiento INF presenta el valor más alto ($305 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), mientras que la fertilización orgánico mineral (OFCF, OFCC) presenta disminuciones de g_s en el orden de 23,6 % a 25,5 % y el tratamiento SNF muestra la mayor disminución de g_s (38%) (**Figura 1b**), además, del valor más alto en la concentración interna de CO_2 (C_i) ($419,5 \text{ mol mol}^{-1}$), seguido por los tratamientos OFCF, INF y OFCC con disminuciones del 23%, 29,5% y 31,4% respectivamente, evidenciándose un comportamiento de C_i contrario al de P_n , menor concentraciones de C_i en tratamientos de mayor P_n (**Tabla 4**).

La eficiencia en el uso del agua (WUE_e) refleja un patrón similar a P_n y g_s , el mayor valor se observa en el tratamiento INF ($1,66 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$), disminuyendo 2,94% con OFCC y 14,73% con OFCF. En contraste, el tratamiento sin fertilizante presenta un WUE_e mucho menor ($0,50 \text{ } \mu\text{mol mol}^{-1}$), equivalente a reducciones del 69,8% comparado con INF (**Tabla 2**). El diferencial de temperatura foliar (LTD) fue negativo con el tratamiento INF (-2°C) y positivo en OFCC ($3,29^\circ\text{C}$), mientras que en los tratamientos OFCF y SNF los valores fueron cercanos a cero $0,19^\circ\text{C}$ y $0,73^\circ\text{C}$ respectivamente. En cuanto a la limitación estomática (g_{lim}), el mayor valor lo presentó INF (0,4), el menor SNF (0,1) y valores intermedios con fertilización orgánico mineral (OFCC, OFCF) (**Tabla 4**).

Movilización de fotosintatos: Cambios en la biomasa del dosel y raíz, partición de biomasa y rendimiento de grano

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la biomasa de raíz (RoW) (g planta^{-1}), biomasa del dosel (CB) (g planta^{-1}), producción de grano (RG) e índice de cosecha (HI) (%) en plantas de frijol sin fertilización (SNF) comparado con la fertilización inorgánica (INF) y la fertilización orgánico mineral (OFCC, OFCF) (**Tabla 3**). Los valores de biomasa de raíz (RoW) entre los tratamientos con fertilización orgánico mineral OFCF y OFCC presentaron variaciones no significativas ($2,569$ y $2,365 \text{ g planta}^{-1}$) respectivamente. Sin embargo, en los tratamientos (INF: $1,337 \text{ g planta}^{-1}$; SNF: $0,783 \text{ g planta}^{-1}$) los valores de RoW son significativamente diferentes con respecto a los tratamientos con fertilización orgánico mineral, aun así, estos últimos no son significativamente diferentes entre sí (**Tabla 5**).

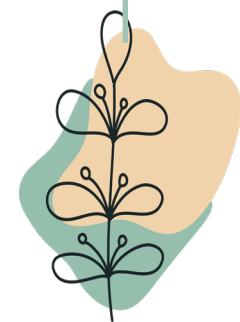


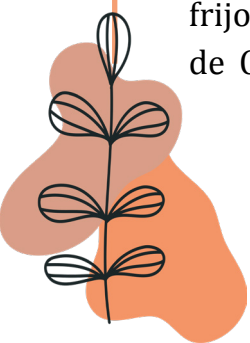
Tabla 5.

Materia seca, producción de grano, e índices de partición de la materia seca en frijol común cultivado bajo diferentes tratamientos de fertilización.

Variable	INF				OFCC				OFCF				SNF				Valor de P	
	Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.		Media		D.E.			
RoW	1,3	±	0,3	ab	2,37	±	0,98	a	2,57	±	0,26	a	0,78	±	0,03	b	0,0104 *	
CB	26	±	5,0	a	21,1	±	2,88	ab	25,5	±	4,77	a	13,5	±	1,22	b	0,0131 *	
HI	41	±	3,4	a	24,3	±	4,21	b	37,2	±	4,88	a	20,2	±	4,05	b	0,000816***	
RG	6,2	±	2,4	ab	5,32	±	1,12	ab	8,24	±	1,31	ab	2,35	±	0,53	b	0,00895**	

Fertilización inorgánica (INF), fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) y el control sin fertilización (SNF). Media $\pm$ desviación estándar. a, b, c: Los promedios con una letra en común entre filas no son significativamente diferentes con un 5% de probabilidad. *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$.

El mayor valor en la biomasa del dosel (CB), se observó en el tratamiento INF con 25,8 g planta⁻¹ seguido el tratamiento OFCF con 25,5 g planta⁻¹ y OFCC con 21 g planta⁻¹ sin embargo, estas diferencias no son significativas, a excepción de SNF, donde CB disminuye drásticamente a 13,5 g planta⁻¹. Es decir, que las plantas de frijol sin ningún tipo de fertilización reducen entre el 35% y 47% del crecimiento y desarrollo de la parte aérea (**Tabla 5**). En términos de movilización de fotosintatos para la producción de grano, se encontró un efecto positivo bajo la aplicación de los tratamientos INF y OFCF en comparación con OFCC y SNF. Sin embargo, INF fue más eficiente un 8,3% en comparación con OFCF. INF alcanzó valores de índice de cosecha (HI) de 40,59% y 37,21% con la aplicación de OFCF. Esto es diferente a lo observado con la aplicación de OFCC y SNF donde el valor de HI fue alrededor del 24,35% y 20,16%, respectivamente (**Tabla 5**). En la producción de grano (RG), observamos que el tratamiento OFCF mostró el rendimiento más alto con un promedio de 8,24 g planta⁻¹, seguido por INF con 6,22 g planta⁻¹, revelando que con el tratamiento OFCF se produce 236,7 kg ha⁻¹ más que con el tratamiento INF y 35,7 kg ha⁻¹ por encima del promedio nacional de frijol arbustivo que corresponde a 930 kg ha⁻¹ (Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas FENALCE, 2023). Contrario a lo observado con OFCC,



disminuye el 35% con respecto a OFCF y el 14% con INF. En contraste, el tratamiento sin fertilizante presenta RG mucho menor ($2,34 \text{ g planta}^{-1}$), equivalente a reducciones entre el 55% y 72% (Tabla 5).

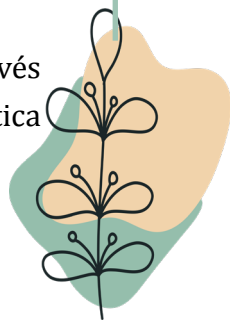
Discusión

La eficiencia fotosintética en frijol común mejora cuando se combinan fertilizantes orgánicos e inorgánicos en condiciones de altas temperaturas

En frijol común, la eficiencia fotosintética disminuye por encima de un umbral de 30°C como resultado de una reducción en el estado de activación de Rubisco (Sage et al., 2008; Wahid et al., 2007). Esto limita la fijación de carbono y, posteriormente la fotosíntesis neta (Deva et al., 2020).

La alta temperatura causa efectos negativos durante el período reproductivo desde el inicio de la floración hasta el llenado de las semillas (Araújo et al., 2015; Vargas et al., 2021). En nuestro estudio, el 26,6% de las observaciones de la temperatura del aire desde el inicio de la floración, fueron superiores a 30°C ., deduciendo que las condiciones climáticas del bosque seco tropical, suscitan un desbalance entre la fotosíntesis y la transpiración en el frijol cuando no se emplea la fertilización (SNF); es decir, la tasa de asimilación de CO_2 (P_n) disminuye, mientras que la tasa de transpiración (E) se incrementa (Bramley et al., 2013; Wahid, 2007), debido a la reducción de la conductancia estomática (g_s) que podría haber resultado del cierre de los estomas que impide la entrada de CO_2 en la hoja, la asimilación del carbono fotosintético disminuye en favor de la fotorrespiración (Mathobo et al., 2017; Rosales et al., 2012). Sharkey y Seemann, (1989) reportaron una disminución en las tasas fotosintéticas del frijol debido al cierre de los estomas. Tang et al (2002) demostraron que existe una combinación de efectos estomáticos y no estomáticos sobre la fotosíntesis, dependiendo del grado de estrés (Yu et al., 2009). Por ejemplo, cuando no se emplea la fertilización (SNF) en el frijol en condiciones del bosque seco tropical, no solo se presentan limitaciones estomáticas (g_{lim}) causadas por el aumento de alrededor de 1°C del diferencial de temperatura foliar (LTD) (Deva et al., 2020; Orozco et al., 2012), si no que se presentan limitaciones no estomáticas, como lo demuestra los incrementos en la concentración subestomática de CO_2 (C_i) (Flexas y Medrano, 2002; Lawlor, 2009).

La fertilización optimiza la capacidad de las plantas para asimilar CO_2 atmosférico a través de la fotosíntesis (Brown y Green, 2018). Los incrementos en la eficiencia fotosintética



observados al aumentar las dosis de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) independientemente del tipo de fertilización (inorgánica u orgánico mineral), pueden estar relacionados con la habilidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética por un incremento en el suplemento de NPK (Sanclemente y Peña, 2008; Xu et al., 2015). Es posible que la mayor presencia de K debido a la fertilización inorgánica (INF) provocará una elevada absorción de este elemento en los canales de entrada, haciendo que las células de guarda posibilitaran una mayor apertura estomática (Taiz et al., 2017), este efecto puede explicar por qué los parámetros de intercambio gaseoso de la fertilización inorgánica fueron un poco más altos que los de la fertilización orgánico mineral (OFCC y OFCF). Asimismo, los tratamientos OFCC y OFCF mostraron mayores parámetros de intercambio gaseoso que el tratamiento control sin fertilización (SNF), lo que indica que la aplicación de fertilizantes orgánicos promueve la apertura de los estomas para aumentar efectivamente los intercambios de H_2O y CO_2 entre el medio ambiente y el frijol, minimizando el daño de la fotosíntesis en frijol causado por la baja fertilidad del suelo y el estrés abiótico (Mathobo et al., 2017; Zhang et al., 2020).

Combinar fertilizantes orgánicos e inorgánicos mejoran los componentes del rendimiento de frijol común en condiciones de altas temperaturas

El frijol común es un cultivo sensible a suelos de baja fertilidad (Nascente et al., 2017), que combinado con las altas temperaturas del bosque seco tropical limitan la producción de frijol (Beebe et al., 2011). Los tratamientos que incluyeron fertilizantes orgánicos (OFCC y OFCF) presentaron mayor acumulación de la biomasa de raíz (RoW). El crecimiento de raíces en condiciones de baja disponibilidad hídrica es un rasgo que permite medir la capacidad de las raíces para obtener agua del suelo (Ambachew et al., 2015a; Darkwa et al., 2016). Es decir, que el frijol común, con la aplicación combinada de fertilizantes orgánicos e inorgánicos responde positivamente a la baja disponibilidad hídrica en el bosque seco tropical. Sin embargo, la mineralización de nutrientes es más rápida con el tratamiento INF, permitiendo una mayor acumulación de biomasa del dosel (CB) debido al rápido suministro de nutrientes (Mekki, 2016). No obstante, el beneficio más importante de los tratamientos que incluyeron fertilizantes orgánicos (OFCC y OFCF) es el suministro más prolongado de nutrientes a las plantas de frijol que el tratamiento INF (Silva et al., 2024), que se traduce en mejores características de crecimiento y rendimiento (Mahmoud y Gad, 2020). Por ejemplo, entre los rasgos más significativos aportados por la fertilización orgánico mineral 2 (OFCF), encontramos un incremento en la acumulación de biomasa del dosel (CB) (Amanullah et al., 2022;

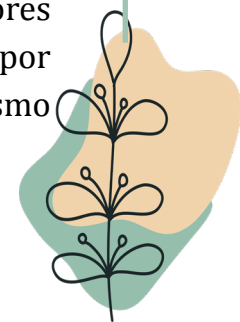


Dorahy et al., 2004; El-Yazal, 2020), índice de cosecha (HI) y producción de granos por planta (RG) (Ahmadi & Arain, 2021; Maman, 2013; Sitinjak & Purba, 2018; Zafar et al., 2011), este efecto se atribuye a la liberación gradual de los nutrientes esenciales que necesita el frijol por el fertilizante orgánico y a la disponibilidad de elementos de NPK del fertilizante inorgánico (Lima et al., 2009; Mitchell y Tu, 2005; Saha et al., 2008).

Los rasgos de los componentes del rendimiento son generalmente buenos indicadores del estrés en general, y nuestro estudio mostró reducciones significativas en HI y RG en condiciones del bosque seco tropical cuando no se empleó la fertilización (SNF) (Ambachew et al., 2015b; Asfaw et al., 2014). Se cree que la reducción en la producción de grano es causada por la disminución en la asimilación de fotosintatos y la mala partición de carbohidratos en el grano en desarrollo debido a la alta temperatura y baja disponibilidad hídrica (Asfaw et al., 2012; Rezene et al., 2011). La fuerte asociación entre la asimilación de fotosintatos y una mejor removilización de carbohidratos en frijol con el tratamiento (OFCF) permite mantener una mayor producción de grano independientemente de las condiciones de suelo y clima del bosque seco tropical (Singh, 1995).

Mecanismos de adaptación del aparato fotosintético del frijol común al tipo de fertilización

En nuestro estudio, la fertilización edáfica que incluyó fuentes orgánicas redujo ciertos factores fisiológicos del frijol en comparación con las mostradas por la fuente inorgánica, como respuesta para adaptarse a la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Observamos que, con aplicación de fertilización orgánico mineral (OFCC y OFCF), el frijol, mantiene sus procesos fotosintéticos sin mayores impactos, como lo demuestra la relación positiva entre la tasa de fotosíntesis neta con la acumulación de biomasa o la producción de grano. Este comportamiento se debe principalmente a la plasticidad en los mecanismos para mantener el funcionamiento adecuado del aparato fotosintético (Gong et al., 2015; Suárez et al., 2022b). Por ejemplo, cuando se emplea fertilización inorgánica (INF), el frijol aumenta la g_s , es decir, un aumento del sustrato (C_i) para la fijación de carbono (P_n) a nivel celular al aumentar también E y WUE_c . El frijol, a través de la transferencia de calor latente, mantuvo una temperatura foliar más baja en relación con la del aire (Traub et al., 2018), por lo tanto, el enfriamiento por transpiración permitió que se mantuvieran los procesos fotosintéticos sin mayores impactos por las altas temperaturas (Ergo et al., 2018), lo que fue respaldado por valores altos en P_n , WUE_c , CB, HI y RG, estos rasgos se identifican como un mecanismo



fisiológico de tolerancia al calor relacionados con el uso gasométrico del agua (Habermann et al., 2019). Siguiendo los aportes de Salazar et al (2018) identificamos un comportamiento anisohídrico del frijol (gasta agua) cuando se emplea fertilización inorgánica, manteniendo la eficiencia en la movilización de fotosintatos para la formación de granos en condiciones de alta temperatura, utilizando el mecanismo de diferencial de temperatura foliar (LTD) (Deva et al., 2020; Suárez et al., 2021), donde el agua se intercambia por carbono y luego el carbono se incorpora a la biomasa, que se relaciona con el uso efectivo del agua (Boomiraj et al., 2010; Dubey et al., 2020; Suárez et al., 2021; Urban et al., 2017). Contrario fue lo observado en la planta de frijol cuando se usó la fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), donde identificamos un comportamiento isohídrico (ahorro de agua), caracterizado por E baja que provocó aumento de LTD, pero con la capacidad de tener un WUE_e alto (Hatfield y Prueger, 2015), que se atribuye a un mayor contenido de agua dentro de las hojas, permitiendo mantener la capacidad térmica (gs) baja en altas temperaturas (Albrecht et al., 2020; Eustis et al., 2020; Suárez et al., 2021). Sin embargo, este ahorro de agua significó una baja acumulación de biomasa, producción de grano e índice de cosecha más bajo en comparación con el tratamiento INF. En cuanto a la fertilización orgánico mineral 2 (OFCCF), observamos características muy similares al tratamiento OFCC (isohídrico), con la diferencia de que la E baja no provocó aumento de LTD y la tasa de fotosíntesis neta no se vio limitada por un WUE_e bajo. Este mecanismo se basa en ahorrar agua en el suelo, disipar hasta cierto punto el efecto negativo de la temperatura del aire, pero siendo eficiente en la fijación de carbono y la translocación (Wang et al., 2021), permitiendo un mayor rendimiento de grano en comparación con INF, OFCC. Por otro lado, el tratamiento control sin fertilización (SNF), presentó limitaciones estomáticas (g_{lim}), reduciendo el flujo de calor latente y aumentando la temperatura de la hoja (Orozco et al., 2012), reduciendo significativamente la fisiología de la planta, especialmente en el manejo del agua y la eficiencia de la fotosíntesis (Santos et al., 2020), comprometiendo drásticamente la acumulación de biomasa y el rendimiento del grano (Perdomo et al., 2016; Suárez et al., 2020; Wahid et al., 2007).

Un hallazgo importante en este estudio, es que la eficiencia fotosintética del frijol se mantiene bajo la aplicación de nutrientes a través de la fertilización edáfica ya sea de tipo inorgánico u orgánico mineral. Es decir, la fertilización, sin importar la fuente, optimiza la capacidad de las plantas para asimilar CO_2 atmosférico a través de la fotosíntesis (Brown y Green, 2018). La mejora de las características fotosintéticas se observó durante las etapas de crecimiento, floración, llenado de vainas y contribuyó a un aumento en el rendimiento del grano. Estos resultados proporcionan evidencia



a los pequeños agricultores para considerar la aplicación de la fertilización orgánico mineral como práctica agronómica para mejorar los componentes del rendimiento y para la optimización del agua en condiciones de altas temperaturas.

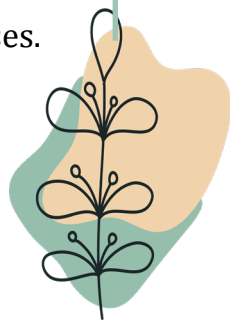
Conclusiones

El análisis climatológico (1992-2023) mostró que aproximadamente el 42% de las temporadas de crecimiento experimentaron al menos 1 día en el que las temperaturas máximas diarias superaron los 30°C. Esto sugiere que las altas temperaturas diurnas son un riesgo para la producción en el ecosistema de bosque seco del departamento del Huila. Además, los perfiles climatológicos para los años 1992-2023 mostraron que los mayores desafíos del cultivo de frijol son valores altos de temperaturas máximas, valores más bajos de temperaturas mínimas, escasas precipitaciones en los primeros 50 días de la temporada y valores altos de VPD.

Encontramos efectos positivos con la fertilización orgánico mineral 2 (OFCF) en frijol a través de cambios en los índices de partición de biomasa, lo que indica una mayor movilización de fotosintatos hacia la producción de grano. Sin embargo, con la fertilización orgánico mineral 1 (OFCC), los componentes del rendimiento disminuyen a través de la biomasa de dosel, índice de cosecha y producción de granos por planta, comparados con la fertilización inorgánica (INF). A nivel de la producción general de grano, OFCF aumentó el rendimiento en 236,7 kg ha⁻¹ más que la obtenida con INF y 35,7 kg ha⁻¹ por encima del promedio nacional de frijol arbustivo, debido a la habilidad de la planta para optimizar su capacidad fotosintética gracias al suministro más prolongado de NPK y al uso de un mecanismo fisiológico basado en ahorrar agua en el suelo y disipar el efecto negativo de la temperatura del aire. Por lo tanto, el uso OFCF bajo las condiciones de suelo y las altas temperaturas del bosque seco tropical mejoran el rendimiento de grano por unidad de área con un menor gasto del recurso hídrico. Recomendamos un ajuste en el componente inorgánico de la fertilización orgánico mineral 1 (OFCC) para mejorar la producción.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.



Contribución de la autoría

Jhon Eduar Noriega Ortega: metodología, investigación, curación de datos, análisis de datos, conceptualización, escritura, revisión y edición.

Jairo Polania Reyes: metodología, investigación.

Karen Natalia Asencio Otalora: conceptualización, escritura.

Agradecimientos

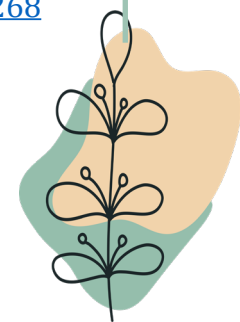
100

Esta investigación se realizó gracias al proyecto “Aprovechamiento de biomasa residual de café y cacao como estrategia de uso eficiente de macronutrientes para la producción de alimentos SGPS 11404 – 2023” de la línea programática: 66 - Investigación aplicada y semilleros de investigación en Centros de Formación del Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (SENNOVA) del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA y al Centro de Formación Agroindustrial, Regional Huila.

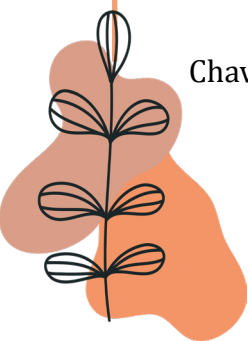


Referencias bibliográficas

- Abera, T., T. T., & L. M. P. (2005). Grain Yield and LER of Maize-climbing Bean Intercropping as Affected by Inorganic, Organic Fertilisers and Population Density in Western Oromiya, Ethiopia. *Asian Journal of Plant Sciences*, 4(5), 458-465. <https://doi.org/10.3923/AJPS.2005.458.465>
- Ahmadi, Y. A., & Arain, J. M. (2021). The Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Response to Different Levels of Organic and Inorganic Fertilizers. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*, 4(3), 439-450. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.981373>
- Albrecht, H., Fiorani, F., Pieruschka, R., Müller-Linow, M., Jedmowski, C., Schreiber, L., Schurr, U., & Rascher, U. (2020). Quantitative Estimation of Leaf Heat Transfer Coefficients by Active Thermography at Varying Boundary Layer Conditions. *Frontiers in Plant Science*, 10, 319685. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01684/BIBTEX>
- Amanullah, Yar, M., Khalid, S., Elshikh, M. S., Akram, H. M., Imran, Al-Tawaha, A. R. M., Ahmad, M., Muhammad, A., Ullah, S., Ali, I., Fahad, S., Adnan, M., & Ali, A. (2022). Phenology, growth, productivity, and profitability of mungbean as affected by potassium and organic matter under water stress vs. no water stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 45(5), 629-650. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1936025>
- Ambachew, D., Mekbib, F., Asfaw, A., Beebe, S. E., & Blair, M. W. (2015a). Trait associations in common bean genotypes grown under drought stress and field infestation by BSM bean fly. *The Crop Journal*, 3(4), 305-316. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2015.01.006>
- Ambachew, D., Mekbib, F., Asfaw, A., Beebe, S. E., & Blair, M. W. (2015b). Trait associations in common bean genotypes grown under drought stress and field infestation by BSM bean fly. *The Crop Journal*, 3(4), 305-316. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2015.01.006>
- Andrade, E. R., Ribeiro, V. N., Azevedo, C. V. G., Chiorato, A. F., Williams, T. C. R., & Carbonell, S. A. M. (2016). Biochemical indicators of drought tolerance in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Euphytica* 2016 210:2, 210(2), 277-289. <https://doi.org/10.1007/S10681-016-1720-4>
- Araújo, S. S., Beebe, S., Crespi, M., Delbreil, B., González, E. M., Gruber, V., Lejeune-Henaut, I., Link, W., Monteros, M. J., Prats, E., Rao, I., Vadez, V., & Patto, M. C. V. (2015). Abiotic Stress Responses in Legumes: Strategies Used to Cope with Environmental Challenges. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34, 237-280. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.898450>



- Asfaw, A., Blair, M. W., Asfaw, A., & Blair, M. W. (2014). Quantification of drought tolerance in Ethiopian common bean varieties. *Agricultural Sciences*, 5(2), 124-139. <https://doi.org/10.4236/AS.2014.52016>
- Asfaw, A., Blair, M. W., & Struik, P. C. (2012). Análisis de loci de rasgos cuantitativos multiambiente para la adquisición, acumulación y removilización de fotosintato en frijol común bajo estrés por sequía. *Abierto Volumen 2, Número 5, Páginas 579 - 595*, 2(5), 579-595. <https://doi.org/10.1534/g3.112.002303>
- Baghdadi, A., Halim, R. A., Ghasemzadeh, A., Ramlan, M. F., & Sakimin, S. Z. (2018). Impact of organic and inorganic fertilizers on the yield and quality of silage corn intercropped with soybean. *PeerJ*, 2018(10), e5280. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.5280/SUPP-5>
- Beebe, S. (2012). Common Bean Breeding in the Tropics. *Plant Breeding Reviews*, 36(1), 357-426. <https://doi.org/10.1002/9781118358566.CH5>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, 4 MAR, 28034. <https://doi.org/10.3389/FPHYS.2013.00035/BIBTEX>
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Devi, M. J., & Polania, J. (2014). Common beans, biodiversity, and multiple stresses: challenges of drought resistance in tropical soils. *Crop and Pasture Science*, 65(7), 667-675. <https://doi.org/10.1071/CP13303>
- Beebe, S., Ramirez, J., Jarvis, A., Rao, I. M., Mosquera, G., Bueno, J. M., & Blair, M. W. (2011). Genetic Improvement of Common Beans and the Challenges of Climate Change. *Crop Adaptation to Climate Change*, 356-369. <https://doi.org/10.1002/9780470960929.CH25>
- Boomiraj, K., Chakrabarti, B., Aggarwal, P. K., Choudhary, R., & Chander, S. (2010). Assessing the vulnerability of Indian mustard to climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138(3-4), 265-273. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2010.05.010>
- Bramley, H., Turner, N. C., & Siddique, K. H. M. (2013). Water Use Efficiency. *Genomics and Breeding for Climate-Resilient Crops*, 2, 225-268. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37048-9_6
- Bunce, J. A., & Bunce, J. A. (2006). How do leaf hydraulics limit stomatal conductance at high water vapour pressure deficits? *Plant, Cell & Environment*, 29(8), 1644-1650. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2006.01541.X>
- Chavarria Parraga, J. E., Ugando Peñate, M., Sabando García, A. R., Muñoz Parraga, J. P., Bravo Ferrín, R. X., & Villalón Peñate, A. (2020). Necesidades hídricas del fríjol



caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). Calculadas con el coeficiente de cultivo utilizando lisímetro de drenaje. *Ciencia y Agricultura*, 17(3), 111-121. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11746>

Chávarro, D. L., M, W. A. O., & Trujillo, A. T. (2017). Análisis de compactación en suelo franco arenoso usando herramientas de sistemas de información geográfica en el Centro de Formación Agroindustrial La Angostura - Campoalegre, Huila. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 4(1). <https://doi.org/10.23850/RAAA.V4I4.4701>

Chtouki, M., Laaziz, F., Naciri, R., Garré, S., Nguyen, F., & Oukarroum, A. (2022). Interactive effect of soil moisture content and phosphorus fertilizer form on chickpea growth, photosynthesis, and nutrient uptake. *Scientific Reports 2022 12:1*, 12(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10703-0>

Clarkson, D. T. (1996). Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. second edition. 889pp. London: Academic Press, £29.95 (paperback). *Annals of Botany*, 78(4), 527-528. <https://doi.org/10.1006/ANBO.1996.0155>

Darkwa, K., Ambachew, D., Mohammed, H., Asfaw, A., & Blair, M. W. (2016). Evaluation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for drought stress adaptation in Ethiopia. *The Crop Journal*, 4(5), 367-376. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2016.06.007>

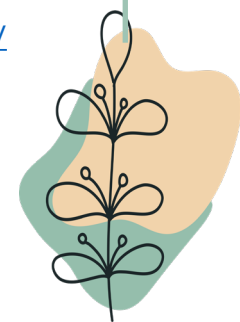
Deva, C. R., Urban, M. O., Challinor, A. J., Falloon, P., & Svitáková, L. (2020). Enhanced Leaf Cooling Is a Pathway to Heat Tolerance in Common Bean. *Frontiers in Plant Science*, 11, 493376. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.00019/BIBTEX>

Dorahy, C. G., Rochester, I. J., & Blair, G. J. (2004). Response of field-grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to phosphorus fertilisation on alkaline soils in eastern Australia. *Soil Research*, 42(8), 913-920. <https://doi.org/10.1071/SR04037>

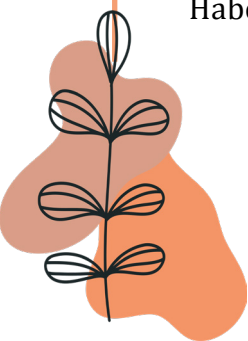
Dubey, R., Pathak, H., Chakrabarti, B., Singh, S., Gupta, D. K., & Harit, R. C. (2020). Impact of terminal heat stress on wheat yield in India and options for adaptation. *Agricultural Systems*, 181, 102826. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2020.102826>

El-Din Mekki, B. (2016). Effect of bio-organic, chemical fertilizers and their combination on growth, yield and some macro and micronutrients contents of faba bean (*Vicia faba* L.). *Bioscience Research*, 13(1), 8-14. www.isisn.org

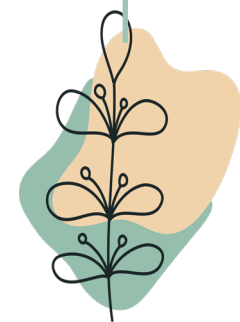
El-Yazal, M. A. S. (2020). Impact of Some Organic Manure with Chemical Fertilizers on Growth, Yield of Broad Bean (*Vicia faba* L.) Grown in Newly Cultivated Land. *Sustainable Food Production*, 9, 23-36. <https://doi.org/10.18052/www.scipress.com/sfp.9.23>



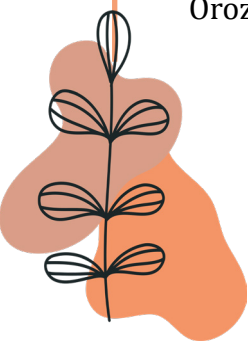
- Ergo, V. V., Lascano, R., Vega, C. R. C., Parola, R., & Carrera, C. S. (2018). Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological-biochemical traits and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 148, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>
- Eustis, A., Murphy, K. M., & Barrios-Masias, F. H. (2020). Leaf Gas Exchange Performance of Ten Quinoa Genotypes under a Simulated Heat Wave. *Plants* 2020, Vol. 9, Page 81, 9(1), 81. <https://doi.org/10.3390/PLANTS9010081>
- Federación Nacional de Cultivadores de Cereales y Leguminosas [Fenalce]. (2023). *Estadísticas - Fenalce*. <https://fenalce.co/estadisticas/>
- Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought-inhibition of Photosynthesis in C3 Plants: Stomatal and Non-stomatal Limitations Revisited. *Annals of Botany*, 89(2), 183-189. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCF027>
- Gai, Z., Zhang, J., & Li, C. (2017). Effects of starter nitrogen fertilizer on soybean root activity, leaf photosynthesis and grain yield. *PLOS ONE*, 12(4), e0174841. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0174841>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science*, 327(5967), 812-818. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1185383>
- Gong, W. Z., Jiang, C. D., Wu, Y. S., Chen, H. H., Liu, W. Y., & Yang, W. Y. (2015). Tolerance vs. avoidance: two strategies of soybean (*Glycine max*) seedlings in response to shade in intercropping. <http://ps.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s11099-015-0103-8.html>, 53(2), 259-268. <https://doi.org/10.1007/S11099-015-0103-8>
- Guimarães, R. A. M., Braz, A. J. B. P., Simon, G. A., Ferreira, C. J. B., Braz, G. B. P., & da Silveira, P. M. (2017). Resposta de cultivares de feijoeiro a adubação nitrogenada em diferentes estádios fenológicos. *Global Science and Technology*, 10(1).
- Guo, S., Brück, H., & Sattelmacher, B. (2002). Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants: Nitrogen form and water uptake. *Plant and Soil*, 239(2), 267-275. <https://doi.org/10.1023/A:1015014417018/METRICS>
- Habermann, E., Dias de Oliveira, E. A., Contin, D. R., San Martin, J. A. B., Curtarelli, L., Gonzalez-Meler, M. A., & Martinez, C. A. (2019). Stomatal development and con-



- ductance of a tropical forage legume are regulated by elevated [CO₂] under moderate warming. *Frontiers in Plant Science*, 10, 450408. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.00609/BIBTEX>
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., & Verbruggen, N. (2006). How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in plant science*, 11(12), 610-617. <https://doi.org/10.1016/J.TPLANTS.2006.10.007>
- Holdridge, by L., Joseph Tosi, by A., Revised Edition, J., Jose, S., & Rica, C. (s. f.). *LIFE ZONE ECOLOGY With Photographic Supplement Prepared*.
- Iqbal, A., Khalil, I. A., Ateeq, N., & Sayyar Khan, M. (2006). Nutritional quality of important food legumes. *Food Chemistry*, 97(2), 331-335. <https://doi.org/10.1016/J.FOOD-CHEM.2005.05.011>
- Janick, J. (2012). Plant Breeding Reviews. *Plant Breeding Reviews*, 36, 1-535. <https://doi.org/10.1002/9781118358566>
- Lafitte, H. R. (1994). Identificación de problemas en la producción de maíz tropical: guía de campo. En CIMMYT. CIMMYT. <http://hdl.handle.net/10883/727>
- Lawlor, D. W. (2009). Musings about the effects of environment on photosynthesis. *Annals of Botany*, 103(4), 543-549. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCN256>
- Lima, D. L. D., Santos, S. M., Scherer, H. W., Schneider, R. J., Duarte, A. C., Santos, E. B. H., & Esteves, V. I. (2009). Effects of organic and inorganic amendments on soil organic matter properties. *Geoderma*, 150(1-2), 38-45. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2009.01.009>
- Liu, E., Yan, C., Mei, X., He, W., Bing, S. H., Ding, L., Liu, Q., Liu, S., & Fan, T. (2010). Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 158(3-4), 173-180. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2010.04.029>
- Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., & Niggli, U. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science*, 296(5573), 1694-1697. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1071148/SUPPL_FILE/MAEDERSUPPL.PDF



- Mahmoud, S. O., & Gad, G. A. D. (2020). Effect of vermicompost as fertilizer on growth, yield and quality of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). *Middle East Journal of Agriculture Research*. <https://doi.org/10.36632/mejar/2020.9.1.19>
- Maman, N. (2013). Poultry manure and inorganic fertilizer to improve pearl millet yield in Niger. *African Journal of Plant Science*, 7(5), 162-169. <https://doi.org/10.5897/ajps12.010>
- Massawe, F., Mayes, S., & Cheng, A. (2016). Crop Diversity: An Unexploited Treasure Trove for Food Security. *Trends in Plant Science*, 21(5), 365-368. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.02.006>
- Mathobo, R., Marais, D., & Steyn, J. M. (2017). The effect of drought stress on yield, leaf gaseous exchange and chlorophyll fluorescence of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management*, 180, 118-125. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.11.005>
- Mitchell, C. C., & Tu, S. (2005). Long-Term Evaluation of Poultry Litter as a Source of Nitrogen for Cotton and Corn. *Agronomy Journal*, 97(2), 399-407. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2005.0399>
- Mora, D. S., Cuellar, L. M., Torrejano, V. M., & Salamanca, D. R. (2017). Incidencia de las condiciones climáticas sobre el cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en el municipio de Campoalegre-Huila. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*, 4(1). <https://doi.org/10.23850/RAAA.V4I4.4722>
- Moraga Quezada, M. E. (2021). *Enmiendas orgánicas y sintéticas y su efecto en la producción de maíz (Zea mays L.) y frijol (Phaseolus vulgaris L.) y en la fertilidad del suelo*.
- Nascente, A. S., Carvalho, M. da C. S., Melo, L. C., & Rosa, P. H. (2017). Nitrogênio mineral do solo, nutrição de plantas e produtividade de genótipos de ciclo superprecoces de feijão-comum em função do manejo de nitrogênio. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 39(3), 369-378. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i3.32781>
- Noriega, J. E., Polania, J., Perdomo, M. C., Moreno, Y. D., Murcia, V., Machado, L., & Rivera, H. (2023). *Manual técnico para la elaboración de compost: alternativa de uso sostenible de la biomasa residual de café y cacao*. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA. <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/8341>
- Orozco, J., Cardona Ayala, A., Tatis, A., Fisiología, H., Orozco, A. J., Carlos, Ayala, C., & Hermes, (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una



revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63-76. <https://doi.org/10.31910/RUDCA.V15.N1.2012.803>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). Plan PIDARET propone convertir a Huila en el líder de los sistemas agroalimentarios.

Perdomo, J. A., Carmo-Silva, E., Hermida-Carrera, C., Flexas, J., & Galmés, J. (2016). Acclimation of biochemical and diffusive components of photosynthesis in rice, wheat, and maize to heat and water deficit: Implications for modeling photosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 7(NOVEMBER2016), 225698. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.01719/BIBTEX>

Polania, J. A., Poschenrieder, C., Beebe, S., & Rao, I. M. (2016). Effective use of water and increased dry matter partitioned to grain contribute to yield of common bean improved for drought resistance. *Frontiers in Plant Science*, 7(MAY2016), 202541. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2016.00660/BIBTEX>

Porch, T. G., Smith, J. R., Beaver, J. S., Griffiths, P. D., & Canaday, C. H. (2010). TARS-HT1 and TARS-HT2 Heat-tolerant Dry Bean Germplasm. *HortScience*, 45(8), 1278-1280. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.8.1278>

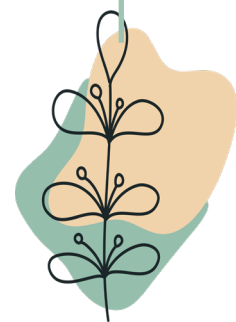
Rao, I. M., Miles, J. W., Beebe, S. E., & Horst, W. J. (2016). Root adaptations to soils with low fertility and aluminium toxicity. *Annals of Botany*, 118(4), 593-605. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW073>

Rezene, Y., Gebeyehu, S., & Zelleke, H. (2011). Genetic variation for drought resistance in small red seeded common bean genotypes. *African Crop Science Journal*, 19(4), 303-311. <https://www.ajol.info/index.php/acsj/article/view/74187>

Ríos-Castillo, I., Acosta, E., Samudio-Núñez, E., Hruska, A., Gregolin, A., Ríos-Castillo, I., Acosta, E., Samudio-Núñez, E., Hruska, A., & Gregolin, A. (2018). Beneficios Nutricionales, Agroecológicos y Comerciales de las Legumbres. *Revista chilena de nutrición*, 45, 8-13. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182018000200008>

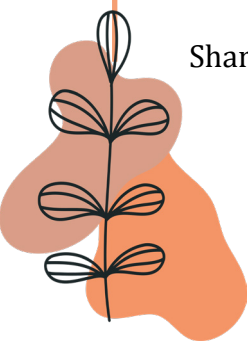
Rosales, M. A., Ocampo, E., Rodríguez-Valentín, R., Olvera-Carrillo, Y., Acosta-Gallegos, J., & Covarrubias, A. A. (2012). Physiological analysis of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars uncovers characteristics related to terminal drought resistance. *Plant Physiology and Biochemistry*, 56, 24-34. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2012.04.007>

Saavedra, D., Cubillos, A., Machado, L., Murcia, V., & Méndez, D. (2018). Análisis de índices de vegetación en el cultivo de arroz en la finca La Tebaida del municipio de



Campoalegre. *Revista Agropecuaria y Agroindustrial La Angostura*. <https://doi.org/10.23850/raa.v5i1.4746>

- Saavedra-Mora, D., Murcia-Torrejano, V., Machado-Cuellar, L., Sánchez-Cerquera, J., Estrada-Quintero, L. F., & Ordoñez-Espinosa, C. M. (2019). Propiedades físicas y químicas de suelos y su relación con sistemas de producción en el municipio Campoalegre, departamento del Huila, Colombia. *Bioagro*, 31, 151-158. [http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev31\(2\)/8.%20ms%201833.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev31(2)/8.%20ms%201833.pdf)
- Sage, R. F., Way, D. A., & Kubien, D. S. (2008). Rubisco, Rubisco activase, and global climate change. *Journal of Experimental Botany*, 59(7), 1581-1595. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERN053>
- Saha, S., Mina, B. L., Gopinath, K. A., Kundu, S., & Gupta, H. S. (2008). Organic amendments affect biochemical properties of a subtemperate soil of the Indian Himalayas. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80(3), 233-242. <https://doi.org/10.1007/S10705-007-9139-X/METRICS>
- Salazar, J. C. S., Polanía, J. A., Bastidas, A. T. C., Suárez, L. R., Beebe, S., & Rao, I. M. (2018). Agronomical, phenological and physiological performance of common bean lines in the Amazon region of Colombia. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 30(4), 303-320. <https://doi.org/10.1007/S40626-018-0125-2/METRICS>
- Salcedo J.M. 2008. Regeneration guidelines: common bean. In: Dulloo M.E., Thormann I., Jorge M.A. and Hanson J., editors. Crop specific regeneration guidelines [CD-ROM]. CGIAR System-wide Genetic Resource Programme, Rome, Italy. 9 pp.
- Sanclemente, M. A., & Peña, E. J. (2008). Growth and Photosynthetic Efficiency of *Ludwigia decurrens* Walter (Onagraceae) Under Different Concentrations of Nitrogen. *Acta biol. Colomb*, 13(1), 175-186.
- Santos, A. R. M., Gomes, F. J., Ximenes, E. S. O. C., Aragão, W. F. D. X., & Silva, A. C. da. (2020). Efeito do ambiente luminoso em forrageiras de clima tropical em sistemas silvopastoris. *Nativa*, 8(5), 633-642. <https://doi.org/10.31413/NATIVA.V8I5.10883>
- Savala, C. E. N., Wiredu, A. N., Okoth, J. O., & Kyei-Boahen, S. (2021). Inoculant, nitrogen and phosphorus improves photosynthesis and water-use efficiency in soybean production. *The Journal of Agricultural Science*, 159(5-6), 349-362. <https://doi.org/10.1017/S0021859621000617>
- Sharkey, T. D., & Seemann, J. R. (1989). Mild Water Stress Effects on Carbon-Reduction-Cycle Intermediates, Ribulose Biphosphate Carboxylase Activity, and Spatial Homogeneity



of Photosynthesis in Intact Leaves. *Plant Physiology*, 89(4), 1060-1065. <https://doi.org/10.1104/PP.89.4.1060>

Silva, T. S. da, Carvalho, I. R., Loro, M. V., Pradebon, L. C., de ALMEIDA, H. C., & Uhde, L. T. (2024). Effects of alternative fertilization on common bean crops regarding productivity and nutritional levels. *Bioscience Journal*, 40. <https://doi.org/10.14393/BJ-v40n0a2024-63214>

Singh, S. P. (1995). Selection for Water-Stress Tolerance in Interracial Populations of Common Bean. *Crop Science*, 35(1), 118-124. <https://doi.org/10.2135/CROPS-CI1995.0011183X003500010022X>

Singh, S. P., Terán, H., Muñoz, C. G., Osorno, J. M., Takegami, J. C., & Thung, M. D. T. (2003). Low Soil Fertility Tolerance in Landraces and Improved Common Bean Genotypes. *Crop science*, 43(1), 110-119. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2003.1100A>

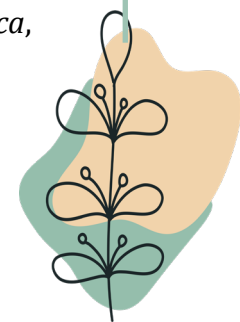
Sitinjak, L., & Purba, E. (2018). Response to growth and production of green beans (*Vigna radiata* L.) in various cropping spots and fertilizer provision of layer chickens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 122(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/122/1/012053>

Smith, M. R., Reis Hodecker, B. E., Fuentes, D., & Merchant, A. (2022). Investigating Nutrient Supply Effects on Plant Growth and Seed Nutrient Content in Common Bean. *Plants* 2022, Vol. 11, Page 737, 11(6), 737. <https://doi.org/10.3390/PLANTS11060737>

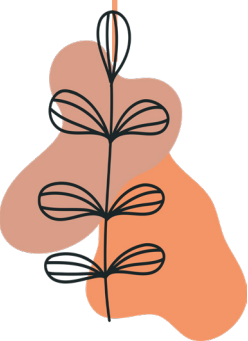
Suárez, J. C., Anzola, J. A., Contreras, A. T., Salas, D. L., Vanegas, J. I., Urban, M. O., Beebe, S. E., & Rao, I. M. (2022a). Influence of Simultaneous Intercropping of Maize-Bean with Input of Inorganic or Organic Fertilizer on Growth, Development, and Dry Matter Partitioning to Yield Components of Two Lines of Common Bean. *Agronomy*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12051216>

Suárez, J. C., Anzola, J. A., Contreras, A. T., Salas, D. L., Vanegas, J. I., Urban, M. O., Beebe, S. E., & Rao, I. M. (2022b). Photosynthetic and grain yield responses to intercropping of two common bean lines with maize under two types of fertilizer applications in the colombian amazon region. *Scientia Horticulturae*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111108>

Suárez, J. C., Polanía, J. A., Contreras, A. T., Rodríguez, L., Machado, L., Ordoñez, C., Beebe, S., & Rao, I. M. (2020). Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica*, 216(2), 1-20. <https://doi.org/10.1007/S10681-020-2565-4/METRICS>



- Suárez, J. C., Urban, M. O., Contreras, A. T., Noriega, J. E., Deva, C., Beebe, S. E., Polanía, J. A., Casanoves, F., & Rao, I. M. (2021). Water Use, Leaf Cooling and Carbon Assimilation Efficiency of Heat Resistant Common Beans Evaluated in Western Amazonia. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.644010/BIBTEX>
- Tang, A. C., Kawamitsu, Y., Kanechi, M., & Boyer, J. S. (2002). Photosynthetic Oxygen Evolution at Low Water Potential in Leaf Discs Lacking an Epidermis. *Annals of Botany*, 89(7), 861-870. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCF081>
- Tang, H., Xiao, X., Li, C., Tang, W., Cheng, K., Wang, K., Pan, X., & Li, W. (2019). Effects of Rhizosphere and Long-Term Fertilization Practices on the Activity and Community Structure of Denitrifiers Under Double-Cropping Rice Field. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(6), 682-697. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1589480>
- Traub, J., Porch, T., Naeem, M., Urrea, C. A., Austic, G., Kelly, J. D., & Loescher, W. (2018). Screening for Heat Tolerance in Phaseolus spp. Using Multiple Methods. *Crop Science*, 58(6), 2459-2469. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2018.04.0275>
- Urban, J., Ingwers, M., McGuire, M. A., & Teskey, R. O. (2017). Stomatal conductance increases with rising temperature. *Plant Signaling & Behavior*, 12(8). <https://doi.org/10.1080/15592324.2017.1356534>
- Vargas, Y., Mayor-Duran, V. M., Buendia, H. F., Ruiz-Guzman, H., & Raatz, B. (2021). Physiological and genetic characterization of heat stress effects in a common bean RIL population. *PLOS ONE*, 16(4), e0249859. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0249859>
- Velázquez, E., Silva, L. R., & Peix, A. (2010). Legumes: A Healthy and Ecological Source of Flavonoids. *Current Nutrition & Food Science*, 6(2), 109-144. <https://doi.org/10.2174/157340110791233247>
- Wahid, A. (2007). Physiological implications of metabolite biosynthesis for net assimilation and heat-stress tolerance of sugarcane (Saccharum officinarum) sprouts. *Journal of Plant Research*, 120(2), 219-228. <https://doi.org/10.1007/S10265-006-0040-5/METRICS>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2007.05.011>



- Wang, Y., Li, S., Cui, Y., Qin, S., Guo, H., Yang, D., & Wang, C. (2021). Effect of drip irrigation on soil water balance and water use efficiency of maize in northwest China. *Water (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020217>
- Xu, C. Y., Hosseini-Bai, S., Hao, Y., Rachaputi, R. C. N., Wang, H., Xu, Z., & Wallace, H. (2015). Effect of biochar amendment on yield and photosynthesis of peanut on two types of soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(8), 6112-6125. <https://doi.org/10.1007/S11356-014-3820-9/METRICS>
- Yin, C. Y., Berninger, F., & Li, C. Y. (2006). Photosynthetic responses of *Populus przewalski* subjected to drought stress. <http://ps.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s11099-005-0159-y.html>, 44(1), 62-68. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0159-Y>
- Yu, D. J., Kim, S. J., & Lee, H. J. (2009). Stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis in field-grown grapevine cultivars. <http://bp.ueb.cas.cz/doi/10.1007/s10535-009-0019-x.html>, 53(1), 133-137. <https://doi.org/10.1007/S10535-009-0019-X>
- Zafar, M., Abbasi, M. K., Rahim, N., Khaliq, A., Shaheen, A., Jamil, M., & Shahid, M. (2011). Influence of integrated phosphorus supply and plant growth promoting rhizobacteria on growth, nodulation, yield and nutrient uptake in *Phaseolus vulgaris*. *African Journal of Biotechnology*, 10(74), 16781-16792. <https://doi.org/10.5897/AJB11.1395>
- Zhang, P., Yang, F., Zhang, H., Liu, L., Liu, X., Chen, J., Wang, X., Wang, Y., & Li, C. (2020). Beneficial Effects of Biochar-Based Organic Fertilizer on Nitrogen Assimilation, Antioxidant Capacities, and Photosynthesis of Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) under Saline-Alkaline Stress. *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1562, 10(10), 1562. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10101562>
- Zou, C., Liu, D., Wu, P., Wang, Y., Gai, Z., Liu, L., Yang, F., Li, C., & Guo, G. (2020). Transcriptome analysis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in response to alkaline stress. *Plant Molecular Biology*, 102(6), 645-657. <https://doi.org/10.1007/S11103-020-00971-7/METRICS>

