https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2026.e2802798 e-ISSN: 2305-0683 ISSN: 1684-9086

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Efecto de abonos verdes de verano sobre el rendimiento y la rentabilidad del maíz de entrezafra

Effect of summer green manures on the yield and profitability of off-season maize

Javier Ortigoza Guerreño[1*], Alma María Torres Ferreira[1], Blanca Beatríz Alonso Giménez[1], Marlene Elizabeth Báez Arzamendia[1], Maria Eugenia Torres Ferreira[1] y Carlos Alcides Villalba Algarin[2]

[1]Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. Caazapá, Paraguay.
[2]Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria, Centro de Investigación Capitán Miranda, Departamento de Suelos. Itapúa, Paraguay.

RESUMEN

Los abonos verdes pueden mejorar la productividad y la rentabilidad del maíz de entrezafra. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes secuencias con leguminosas estivales sobre el rendimiento, sus componentes y el desempeño económico del maíz. El experimento se realizó entre 2018 y 2019 en el campo experimental de la FCA-UNA, Filial Caazapá, Paraguay, mediante un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron barbecho seguido de maíz (B+M), *Cajanus cajan* seguido de maíz (Cc+M), *Mucuna pruriens* seguido de maíz (Mp+M), *Crotalaria juncea* seguido de maíz (Cj+M) y *Canavalia ensiformis* seguido de maíz (Ce+M). Se evaluaron el rendimiento de granos, el número de hileras por mazorca, el número de granos por hilera, el peso de 100 granos, los costos de producción, el ingreso neto y la rentabilidad. Los tratamientos con abonos verdes incrementaron significativamente el rendimiento respecto a B+M, que produjo 2,74 t ha-¹. Los rendimientos fueron de 3,94, 4,79, 4,29 y 4,18 t ha-¹ en Cc+M, Mp+M, Cj+M y Ce+M, respectivamente. Los componentes del rendimiento no difirieron significativamente entre los tratamientos. Mp+M presentó el mayor ingreso neto, con G 1.237.500 ha-¹, y la mayor rentabilidad, con 34,86%. En las condiciones evaluadas, Mp+M fue la secuencia más eficiente para aumentar el rendimiento y el retorno económico inmediato del maíz de entrezafra.

Palabras clave: *Zea mays* L., agricultura familiar, plantas de cobertura, leguminosas, rendimiento.

ABSTRACT

Green manures can improve the productivity and profitability of off-season maize. This study aimed to evaluate the effects of different sequences involving summer legumes on maize grain yield, yield components, and economic performance. The experiment was conducted from 2018 to 2019 at the experimental field of the FCA-UNA, Caazapá Campus, Paraguay, using a randomized complete block design with five treatments and four replications. The treatments consisted of fallow followed by maize (B+M), *Cajanus cajan* followed by maize (Cc+M), *Mucuna pruriens* followed by maize (Mp+M), *Crotalaria juncea* followed by maize (Cj+M), and *Canavalia ensiformis* followed by maize (Ce+M). Grain yield, number of kernel rows per ear, number of kernels per row, 100-kernel weight, production costs, net income, and profitability were evaluated. Treatments with green manures significantly increased grain yield compared with B+M, which produced 2.74 t ha-¹. Grain yields were 3.94, 4.79, 4.29, and 4.18 t ha-¹ under Cc+M, Mp+M, Cj+M, and Ce+M, respectively. Yield components did not differ significantly among treatments. Mp+M generated the highest net income, at PYG 1,237,500 ha-¹, and the highest profitability, at 34.86%. Under the evaluated conditions, Mp+M was the most efficient sequence for increasing grain yield and the immediate economic return of off-season maize.

Keywords: *Zea mays* L., family farming, cover crops, legumes, grain yield.

***Autor para correspondencia:**
javier.ortigoza@agr.una.py

Conflictos de interés:
Los autores declaran que no existe conflictos de interés a informar.

Contribución de autores:
Conceptualización: CAVA. Curación de datos: AMTF, BBAG, MEBA y CAVA. Análisis formal: JOG, METF y CAVA. Investigación: JOG, AMTF, BBAG, MEBA y METF. Administración del proyecto: JOG. Recursos: JOG. Visualización: CAVA. Redacción borrador original: JOG y CAVA. Redacción, revisión y edición: JOG y CAVA.

Financiamiento:
Esta investigación fue financiada con el apoyo de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA).

Historial:
Recibido: 23-05-2024;
Aceptado: 23-10-2024;
Publicado: 23-11-2026.

Disponibilidad de datos:
Todo el conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio está disponible mediante solicitud al autor de correspondencia. El conjunto de datos no está públicamente disponible debido a que se mantiene de manera física en la universidad.

Editor responsable:
Arnaldo Esquivel-Fariña
Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

Comentarios de revisión: El presente artículo ha sido evaluado mediante un proceso de revisión por pares en modalidad de doble ciego. Los informes de revisión, en línea con la política de transparencia editorial, se encuentran disponibles en: https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/798/742

Licencia:
Artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons CC-BY 4.0

 Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia Creative Commons

INTRODUCCIÓN

La producción sostenible de cultivos en la Región Oriental del Paraguay enfrenta importantes limitaciones asociadas con la degradación, la acidez y la baja fertilidad de los suelos. En el departamento de Caazapá, el 75% de los suelos evaluados presentó baja fertilidad general, con valores de pH cercanos a 5,5 y contenidos de materia orgánica de aproximadamente 1,2% (Arce Barrios, 2017). Estas condiciones pueden restringir la disponibilidad de nutrientes esenciales, como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio, y limitar la productividad agrícola, especialmente en sistemas con reducida reposición de nutrientes y escaso aporte de residuos vegetales (Fullaondo Navarro, 2014; Arce Barrios, 2017). La disminución de la materia orgánica también compromete funciones del suelo relacionadas con el ciclado de nutrientes, la regulación hídrica y el sostenimiento de la productividad, reduciendo la capacidad de los agroecosistemas para responder a condiciones ambientales adversas (Villalba Algarin, 2025).

La diversificación de cultivos y el mantenimiento de residuos vegetales sobre la superficie constituyen estrategias importantes para conservar el suelo y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Villalba Algarin et al., 2025). Sin embargo, su adopción todavía es limitada en Paraguay. Según el VI Censo Agropecuario Nacional 2022, de las 291.497 fincas con tierra registradas en el país, 145.228 realizaban rotación de cultivos y apenas 23.666 utilizaban cultivos de abono verde, equivalentes al 49,8 y 8,1% de las fincas, respectivamente (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2023). Estas cifras muestran que aproximadamente la mitad de las unidades productivas no incorpora rotaciones y que el uso de abonos verdes continúa siendo poco frecuente. Esta situación resulta particularmente relevante en las fincas familiares, donde la disponibilidad de semillas, los costos de implantación, la demanda de mano de obra y la incertidumbre sobre los beneficios productivos y económicos pueden limitar la adopción de prácticas conservacionistas (Derpsch, Lange, Birbaumer y Moriya, 2016).

Los abonos verdes representan una alternativa para diversificar las secuencias de cultivo, mantener el suelo cubierto y aumentar el aporte de residuos orgánicos al sistema (Souza et al., 2025). Su utilización puede reducir la exposición del suelo al impacto directo de las lluvias, conservar la humedad, reciclar nutrientes y contribuir al mantenimiento del carbono orgánico y de las funciones asociadas con la calidad del suelo (Villalba Algarin, González, Szostak, y Sanabria Franco, 2024; Villalba Algarin, 2025). Además, las leguminosas se distinguen por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico mediante asociaciones simbióticas con bacterias rizobiales e incorporarlo a su biomasa. Después del manejo de la cobertura, la descomposición y mineralización de los residuos puede aumentar la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo sucesor, aunque la magnitud de este aporte depende de la especie, la biomasa producida y la calidad química de los residuos. Un metaanálisis reciente mostró que las coberturas leguminosas incrementaron el contenido de nitrógeno del maíz y generaron los mayores beneficios productivos cuando la disponibilidad de fertilizante nitrogenado era baja (Juneja et al., 2026). Entre las leguminosas estivales utilizadas como abonos verdes en ambientes tropicales y subtropicales se encuentran la mucuna ceniza (*Mucuna pruriens*), la crotalaria (*Crotalaria juncea*), el kumanda yvyra'i (*Cajanus cajan*) y la canavalia (*Canavalia ensiformis*), especies que pueden diferir ampliamente en producción de biomasa y acumulación de nutrientes (Carvalho, Galera, Scholten, Canisares, y Cherubin, 2026).

La incorporación de abonos verdes en las fincas familiares también debe evaluarse desde una perspectiva económica. Su establecimiento implica costos relacionados con la adquisición de semillas, la siembra, el corte y la distribución de la biomasa (Roberts et al., 2025; Smee, Girkin, Simmons, y Falagán, 2026). Sin embargo, una cobertura abundante y persistente puede reducir la emergencia y el crecimiento de malezas, disminuir la necesidad de carpidas y generar ahorros de mano de obra (Kumar et al., 2025; Imorou et al., 2026). Por consiguiente, un incremento en el rendimiento del cultivo sucesor no garantiza necesariamente una mayor rentabilidad, debido a que el resultado económico depende del equilibrio entre los costos de implantación, la productividad obtenida y la reducción de otros costos operativos (Bergtold, Ramsey, Maddy, y Williams, 2019). La evaluación conjunta de estos componentes es especialmente importante en la agricultura familiar, donde la disponibilidad y el costo de la mano de obra pueden condicionar la viabilidad de las tecnologías de manejo.

Estudios desarrollados en Paraguay han mostrado que la diversificación de los sistemas de cultivo y el mantenimiento de residuos vegetales pueden favorecer la conservación de nutrientes, la calidad del suelo y la productividad agrícola, aunque la magnitud de los beneficios depende de las condiciones edafoclimáticas, las especies utilizadas y el manejo adoptado (Villalba Algarin et al., 2025; Villalba Algarin, Sanabria Franco, González y Lavres, 2026). Evidencias experimentales recientes obtenidas en sistemas de agricultura familiar de Caazapá también demostraron que la inclusión de plantas de cobertura puede mejorar atributos del suelo y favorecer el rendimiento de los cultivos (Ortigoza Guerreño et al., 2026). No obstante, todavía es limitada la información que compara diferentes especies leguminosas de verano considerando simultáneamente sus efectos sobre el rendimiento del maíz, sus componentes productivos y la rentabilidad económica del sistema.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de cuatro especies leguminosas utilizadas como abonos verdes de verano sobre los componentes del rendimiento y la rentabilidad económica del maíz de entrezafra cultivado en un suelo de textura franco-arenosa de Caazapá,

Paraguay. Se planteó la hipótesis de que el cultivo de maíz sobre los residuos de abonos verdes incrementaría el rendimiento y rentabilidad en comparación con el barbecho, aunque la magnitud de los beneficios agronómicos y económicos variaría entre las especies evaluadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

La investigación se llevó a cabo entre agosto de 2018 y julio de 2019 en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Asunción (FCA-UNA), Filial Caazapá, ubicado en la Compañía 20 de Julio, distrito de Caazapá, departamento de Caazapá, Región Oriental del Paraguay, a aproximadamente 225 km de la ciudad de Asunción. El sitio se localiza a 26°11′ de latitud sur y 56°22′ de longitud oeste, a una altitud de 143 m s. n. m. El clima de la región es húmedo y mesotérmico, con una precipitación media anual de 1.640 mm y una temperatura media anual de 22,9 °C. Las temperaturas máximas, mínimas y medias, así como las precipitaciones registradas durante el periodo de cultivo del maíz en 2019, se presentan en la Tabla 1. El suelo del área experimental fue clasificado como Rhodic Paleudult y se caracteriza por presentar textura franco-arenosa, perfil profundo y coloración rojiza (López Gorostiaga, 2024).

Diseño experimental y tratamientos

El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar, con cinco tratamientos y cuatro repeticiones, totalizando 20 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo constituida por siete hileras de maíz de 5 m de longitud, con espaciamientos de 0,70 m entre hileras y 0,25 m entre plantas. Los bloques estuvieron separados por calles de 1 m, mientras que entre las unidades experimentales se mantuvo una distancia de 1,5 m. La superficie total del experimento fue de 713 m². Para reducir el efecto de borde, la parcela útil estuvo conformada por las cinco hileras centrales, excluyéndose las dos hileras laterales y las plantas ubicadas en las cabeceras. La parcela útil presentó una superficie de 14 m² y estuvo constituida por 80 plantas.

Los tratamientos evaluados correspondieron a cinco secuencias de manejo: barbecho seguido de maíz (B+M), *Cajanus cajan* seguido de maíz (Cc+M), *Mucuna pruriens* seguido de maíz (Mp+M), *Crotalaria juncea* seguido de maíz (Cj+M) y *Canavalia ensiformis* seguido de maíz (Ce+M). La secuencia temporal de los tratamientos se presenta en la Figura 1.

Manejo agronómico

Antes del establecimiento del experimento, el área había sido manejada bajo un sistema de producción convencional con cultivos de subsistencia, principalmente poroto, mandioca, maíz y maní. La preparación inicial del suelo consistió en una arada profunda seguida de la nivelación manual con azada. Los abonos verdes se sembraron el 30 de agosto de 2018 de forma manual, utilizando una sembradora tipo matraca. *Mucuna pruriens*, *Canavalia ensiformis* y *Cajanus cajan* se establecieron con espaciamientos de 0,50 m entre hileras y 0,30 m entre plantas, mientras que *Crotalaria juncea* se sembró a chorrillo continuo en surcos separados 0,50 m. En el tratamiento B+M, el suelo permaneció en barbecho durante el mismo periodo.

Los abonos verdes se manejaron cinco meses después de la siembra, durante la última semana de enero de 2019. Las plantas se cortaron manualmente con machete y los residuos se distribuyeron uniformemente sobre la superficie de las respectivas unidades experimentales. Después del manejo de los abonos verdes, se realizó una única aplicación de glifosato en todos los tratamientos, a razón de 250 mL del producto comercial por cada tanque de 20 L de agua.

El cultivo sucesor utilizado fue el híbrido simple de maíz Status Viptera 3, de grano amarillo semicristalino y ciclo corto, con resistencia al glifosato y protección frente a lepidópteros plaga (Syngenta Paraguay, 2026). El maíz se sembró en febrero de 2019 directamente sobre los residuos de los abonos verdes y sobre el barbecho, sin una nueva preparación del suelo.

Después de la aplicación inicial del herbicida, el control de malezas se realizó mediante carpidas

Tabla 1. Datos climáticos mensuales registrados durante el periodo experimental. Caazapá, Paraguay, año 2019.

Meses	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Media (°C)	Precipitación (mm)
Febrero	34	22	28	122,1
Marzo	32	19	25	114,4
Abril	29	17	23	103,0
Mayo	26	15	20	69,6
Junio	24	13	19	103,7

*Fuente: compilación de datos meteorológicos registrados por timeanddate.com (2019).

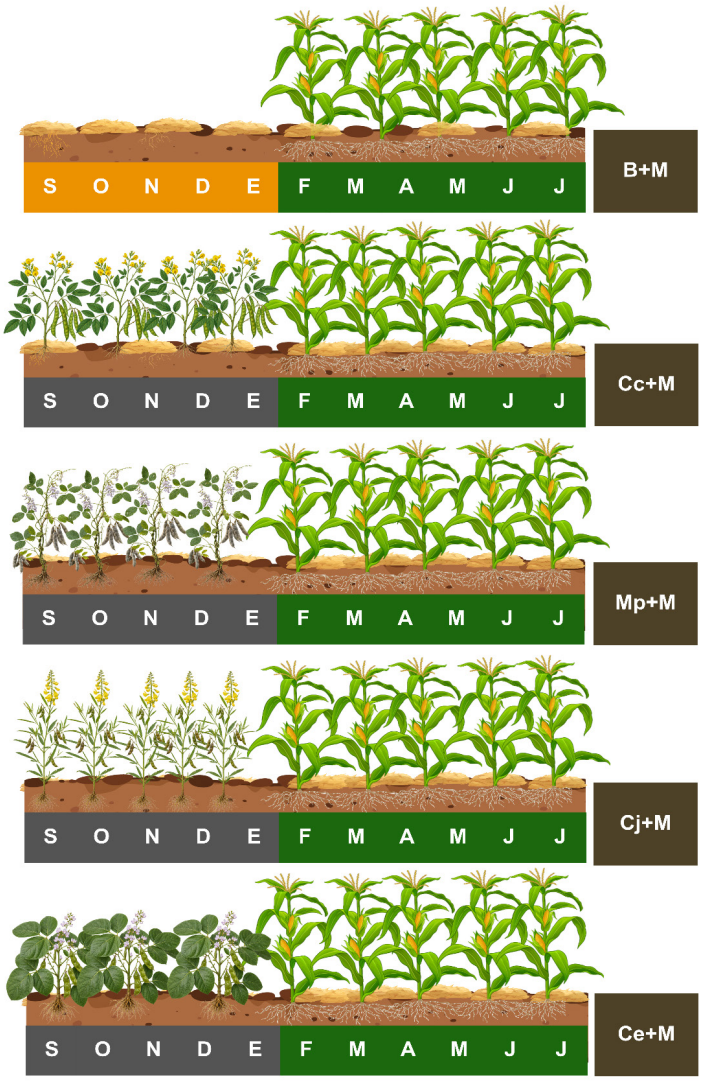


Figura 1. Secuencia temporal de los tratamientos con abonos verdes de verano y maíz de entrezafra. Caazapá, Paraguay, 2018–2019. B+M: barbecho seguido de maíz; Cc+M: Cajanus cajan seguido de maíz; Mp+M: Mucuna pruriens seguido de maíz; Cj+M: Crotalaria juncea seguido de maíz; Ce+M: Canavalia ensiformis seguido de maíz.

manuales, según la necesidad de cada unidad experimental. Para determinar el momento de intervención, las parcelas se monitorearon cada diez días mediante un marco de 25 × 25 cm, colocado al azar en tres puntos de cada unidad experimental. La carpida se realizó cuando la cobertura foliar de las malezas alcanzó o superó el 50% del área evaluada y presentó una altura media aproximada de 10 cm. El número de jornales requerido para esta labor se registró en cada tratamiento y se incorporó posteriormente al análisis económico.

Recolección de datos

La cosecha del maíz se realizó considerando todas las plantas incluidas en la parcela útil de cada unidad experimental. Se evaluaron el rendimiento de granos, el número de hileras de granos por mazorca, el número de granos por hilera, el peso de 100 granos y la demanda de mano de obra para el control manual de malezas.

El rendimiento de granos se determinó mediante la cosecha de todas las mazorcas de la parcela útil. Posteriormente, las mazorcas se desgranaron y los granos se limpiaron y pesaron en una balanza de precisión. El peso obtenido se ajustó a un contenido de humedad del 14% y se convirtió a kg ha-^{1}.

Para determinar el número de hileras de granos por mazorca, se seleccionaron aleatoriamente diez mazorcas de cada unidad experimental y se contabilizó el número de hileras longitudinales de granos. El resultado se expresó como el promedio de las diez mazorcas evaluadas.

El número de granos por hilera se determinó en las mismas diez mazorcas utilizadas para evaluar el número de hileras. En cada mazorca se contabilizaron los granos presentes en una hilera completa, excluyéndose los granos imperfectos localizados en el extremo apical. Los resultados se expresaron como el promedio por unidad experimental.

El peso de 100 granos se determinó a partir de una muestra representativa de los granos obtenidos de las diez mazorcas evaluadas en cada unidad experimental. Se separaron aleatoriamente 100 granos, que fueron pesados en una balanza de precisión, y los resultados se expresaron en gramos.

Análisis financiero y rentabilidad económica

Para cada tratamiento se determinaron los costos de producción, el ingreso bruto, el ingreso neto y la rentabilidad económica. Se estableció un costo básico común de G 2.180.000 ha-¹, aplicado uniformemente a todos los tratamientos. Este costo incluyó la semilla de maíz, la preparación del suelo, el herbicida y su aplicación, el insecticida y su aplicación, la siembra del maíz, la cosecha, la trilla y el embolsado. Los componentes, las cantidades y los valores utilizados se presentan en la Tabla 2.

Al costo básico común se adicionaron los costos específicos de cada tratamiento, que incluyeron la adquisición de semillas de los abonos verdes, los jornales empleados para su siembra, el corte y la distribución de la biomasa, y la mano de obra utilizada en las carpidas manuales. Para el tratamiento B+M no se consideraron costos de semillas, siembra ni manejo de abonos verdes, pero sí los jornales destinados al control manual de malezas. Todos los costos e ingresos fueron expresados en guaraníes por hectárea y correspondieron a los valores utilizados en 2019.

El ingreso bruto se calculó multiplicando el rendimiento de granos de cada tratamiento por el precio de venta del maíz:

$$IB = R \times P$$

donde IB es el ingreso bruto (G ha-¹), R es el rendimiento de granos (kg ha-¹) y P es el precio de venta del maíz (G kg-¹).

El ingreso neto se calculó mediante la diferencia entre el ingreso bruto y el costo total:

$$IN = IB - CT$$

donde IN es el ingreso neto (G ha-¹) y CT es el costo total de producción (G ha-¹).

La rentabilidad económica se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\text{Rentabilidad} = \frac{IB - CT}{CT} \times 100$$

Los valores positivos indicaron ganancias con relación al capital invertido, mientras que los valores negativos representaron pérdidas económicas.

Análisis estadístico

Los datos de rendimiento de granos, número de hileras de granos por mazorca, número de granos por hilera y peso de 100 granos se sometieron a un análisis de varianza de acuerdo con el diseño de bloques completos al azar. Previamente, se verificaron la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas mediante la prueba de Levene. Cuando se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0,05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%. Los análisis se realizaron con el programa InfoStat, versión 2015 (Di Rienzo et al., 2015).

Los costos de producción, los ingresos y la rentabilidad económica no se sometieron a análisis estadístico, debido a que se calcularon a partir de los precios, las cantidades de insumos, la mano de obra utilizada y el rendimiento medio obtenido en cada tratamiento.

Tabla 2. Costo básico común de producción del maíz de entrezafra, expresado en guaraníes por hectárea. Caazapá, Paraguay, 2019.

Descripción	Cantidad	Costo Unitario G	Total G
Semilla kg	14	20000	280000
Insecticida (L)	1	80000	80000
Rastreada (ha)	1	400000	400000
Herbicida (L)	3	30000	90000
Aplicación de herbicida (tanque)	8	20000	160000
Siembra de maíz (Jornal)	3	70000	210000
Aplicación de insecticida (tanque)	6	20000	120000
Cosecha (Jornal)	6	70000	420000
Trilla y embolsado (jornal)	6	70000	420000
Costo Básico Común			**2.180.000**

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento

El rendimiento de granos de maíz difirió significativamente entre los tratamientos ($p \leq 0,05$; Figura 2). Todos los tratamientos con abonos verdes superaron al barbecho seguido de maíz (B+M), que presentó un rendimiento de 2,74 t ha-¹. El mayor valor medio se registró en Mp+M, con 4,79 t ha-¹, lo que representó un incremento de 75% respecto a B+M. Mp+M fue significativamente superior a Cc+M, mientras que Cj+M y Ce+M presentaron valores intermedios de 4,29 y 4,18 t ha-¹, respectivamente, sin diferir estadísticamente de Mp+M ni de Cc+M. Por su parte, Cc+M alcanzó 3,94 t ha-¹ y superó significativamente al barbecho.

El incremento del rendimiento después de las cuatro leguminosas indica que la sustitución del barbecho por abonos verdes generó condiciones más favorables para el cultivo sucesor. Como el maíz no recibió fertilización mineral, esta respuesta pudo estar relacionada con el nitrógeno incorporado mediante fijación biológica y posteriormente liberado durante la descomposición y mineralización de los residuos. Un metaanálisis reciente mostró que las coberturas leguminosas incrementaron en más de 50% el rendimiento del maíz no fertilizado y en 34% su contenido de nitrógeno respecto al barbecho. Por tanto, los aumentos de hasta 75% observados en este estudio son consistentes con la magnitud de respuesta registrada en sistemas sin fertilización nitrogenada (Juneja et al., 2026).

Además del nitrógeno incorporado mediante fijación biológica, las plantas de cobertura pudieron contribuir al reciclaje de otros nutrientes acumulados en sus tejidos aéreos y radiculares (Villalba Algarin et al., 2026). La exploración de distintas profundidades del suelo permite a sus raíces capturar nutrientes presentes en capas subsuperficiales y, después del manejo y la descomposición de los residuos, retornar una fracción de estos elementos a la superficie, donde pueden quedar potencialmente disponibles para el maíz. Este proceso se conoce como redistribución vertical o bombeo biológico de nutrientes (Madrid et al., 2026). Las diferencias entre especies en la producción y composición de la biomasa, la arquitectura radicular y la acumulación de nutrientes podrían explicar parcialmente las variaciones de rendimiento observadas entre los tratamientos (Carvalho et al., 2026).

La permanencia de los residuos sobre la superficie también pudo favorecer el rendimiento mediante la modificación del ambiente edáfico. La cobertura vegetal reduce la exposición directa del suelo, favorece la infiltración y contribuye a conservar la humedad, procesos especialmente relevantes en suelos franco-arenosos con limitada capacidad de retención de agua (Souza et al., 2025). Una síntesis global reciente mostró, además, que el uso de cultivos de cobertura puede aumentar la porosidad, la estabilidad de los agregados y la infiltración, así como reducir la densidad y la resistencia mecánica del suelo (Yan y Arthur, 2025). Sin embargo, dado que en este estudio no se cuantificaron la producción de biomasa, la acumulación de nutrientes, la humedad

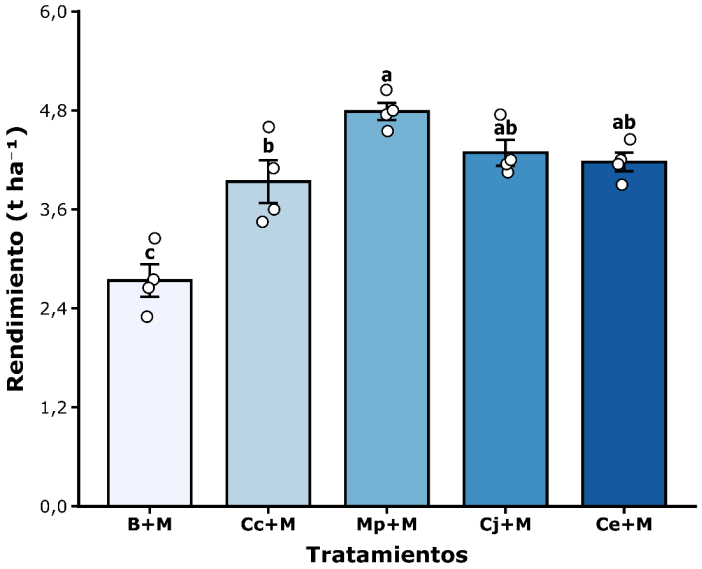


Figura 2. Rendimiento de granos de maíz cultivado después de diferentes abonos verdes de verano. B+M: barbecho seguido de maíz; Cc+M: *Cajanus cajan* seguido de maíz; Mp+M: *Mucuna pruriens* seguido de maíz; Cj+M: *Crotalaria juncea* seguido de maíz; Ce+M: *Canavalia ensiformis* seguido de maíz. Los valores corresponden a la media ± error estándar ($n = 4$). Los círculos blancos representan las repeticiones individuales. Medias seguidas por letras diferentes difieren significativamente según la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ($p \leq 0,05$).

ni las propiedades físicas del suelo, estos procesos deben interpretarse como mecanismos plausibles y no como efectos directamente comprobados. El aumento de la productividad del maíz bajo plantas de cobertura también ha sido observado en sistemas de agricultura familiar de Caazapá, lo que refuerza la consistencia de la respuesta obtenida bajo las condiciones regionales (Ortigoza Guerreño et al., 2026).

Componentes del rendimiento

El número de hileras por mazorca no difirió significativamente entre los tratamientos ($p > 0,05$; Figura 3). Los valores medios variaron entre 13,15 hileras en B+M y 15,25 hileras en Mp+M. Los tratamientos Cc+M, Cj+M y Ce+M presentaron 14,63, 14,88 y 15,10 hileras por mazorca, respectivamente.

El número de granos por hilera tampoco difirió significativamente entre los tratamientos ($p > 0,05$; Figura 4). El menor valor medio se registró en B+M, con 17,9 granos por hilera, mientras que Mp+M presentó el mayor promedio, con 23,5 granos. Los tratamientos Cc+M, Cj+M y Ce+M alcanzaron 20,5, 21,9 y 22,3 granos por hilera, respectivamente.

El peso de 100 granos no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$; Figura 5). Los valores variaron entre 22,56 g en B+M y 26,52 g en Mp+M. Los tratamientos Cc+M, Cj+M y Ce+M registraron valores medios de 25,83, 26,47 y 24,53 g, respectivamente.

La ausencia de diferencias significativas en el número de hileras por mazorca, el número de granos por hilera y el peso de 100 granos indica que ninguno de estos componentes respondió de forma aislada y uniforme a los tratamientos. Sin embargo, los tres mostraron una tendencia numérica favorable bajo Mp+M respecto a B+M. El número de hileras fue 16,0% mayor, el número de granos por hilera aumentó 31,3% y el peso de 100 granos fue 17,6% superior. La coincidencia de estas respuestas en una misma dirección pudo contribuir conjuntamente al incremento de 74,9% observado en el rendimiento, aun cuando la variabilidad entre repeticiones impidió detectar diferencias estadísticas para cada componente por separado.

El rendimiento del maíz resulta de la integración entre el número de mazorcas por superficie, el número de granos formados y su peso final. Dentro de la mazorca, el número de hileras y de granos por hilera determinan parcialmente el potencial de formación de granos (Long, Zeng, Liu y Yang, 2024), mientras que el peso final de los granos depende de la disponibilidad y translocación de fotoasimilados, así como de la tasa y la duración del periodo de llenado (Cao, Yu, Shi, Zhang, Z., y Zhang, Y., 2026).

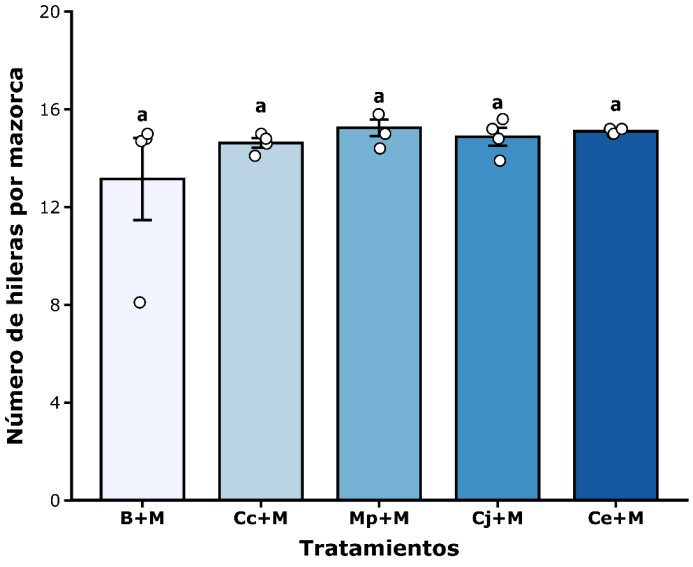


Figura 3. Número de hileras por mazorca de maíz cultivado después de diferentes abonos verdes de verano. B+M: barbecho seguido de maíz; Cc+M: *Cajanus cajan* seguido de maíz; Mp+M: *Mucuna pruriens* seguido de maíz; Cj+M: *Crotalaria juncea* seguido de maíz; Ce+M: *Canavalia ensiformis* seguido de maíz. Los valores corresponden a la media ± error estándar (n = 4). Los círculos blancos representan las repeticiones individuales. Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ($p > 0,05$).

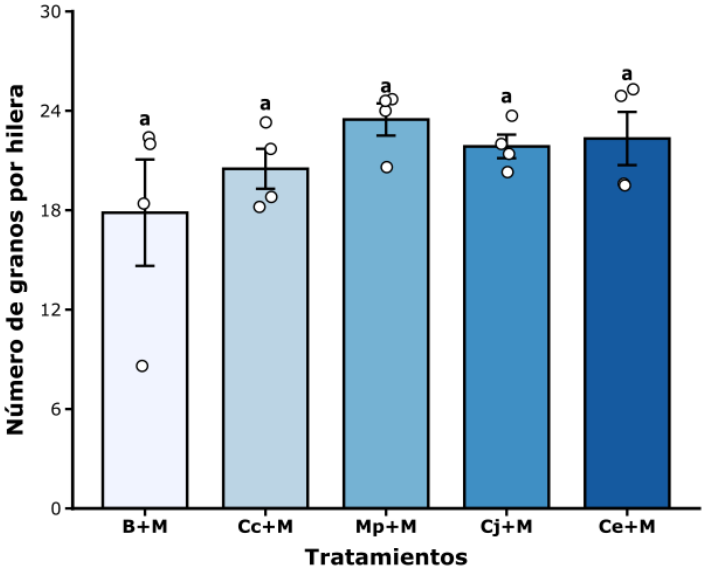


Figura 4. Número de granos por hilera de mazorca de maíz cultivado después de diferentes abonos verdes de verano. B+M: barbecho seguido de maíz; Cc+M: *Cajanus cajan* seguido de maíz; Mp+M: *Mucuna pruriens* seguido de maíz; Cj+M: *Crotalaria juncea* seguido de maíz; Ce+M: *Canavalia ensiformis* seguido de maíz. Los valores corresponden a la media ± error estándar (n = 4). Los círculos blancos representan las repeticiones individuales. Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey al 5% de probabilidad ($p > 0,05$).

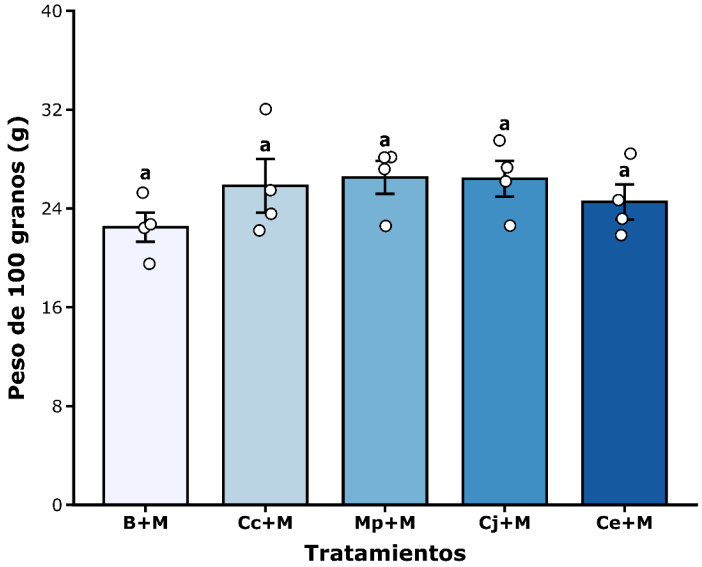


Figura 5. Peso de 100 granos de maíz cultivado después de diferentes abonos verdes de verano. B+M: barbecho seguido de maíz; Cc+M: *Cajanus cajan* seguido de maíz; Mp+M: *Mucuna pruriens* seguido de maíz; Cj+M: *Crotalaria juncea* seguido de maíz; Ce+M: *Canavalia ensiformis* seguido de maíz. Los valores corresponden a la media ± error estándar (n = 4). Los círculos blancos representan las repeticiones individuales. Medias seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba de Tukey al 5% de probabilidad (p > 0,05).

Estos caracteres están asociados positivamente con la productividad, pero presentan diferente grado de control genético y sensibilidad ambiental. El número de hileras posee una importante determinación genética, mientras que el establecimiento y llenado de los granos responden con mayor plasticidad a la disponibilidad de agua, nutrientes y radiación durante las etapas reproductivas (Zhang et al., 2025). Estudios recientes muestran, además, que el número de granos por mazorca y el peso de los granos contribuyen conjuntamente al rendimiento, aunque el número de granos suele explicar una proporción mayor de su variación (Wu et al., 2024).

En este sentido, las condiciones generadas por los residuos de las leguminosas pudieron favorecer moderadamente diferentes procesos, desde la diferenciación y fecundación de los óvulos hasta la acumulación de materia seca durante el llenado (Wu et al., 2024). Un estudio reciente con maíz cultivado después de distintas coberturas también observó que las leguminosas aumentaron simultáneamente el tamaño de las mazorcas, la proporción de granos y el rendimiento, mientras que el tratamiento sin cobertura presentó los menores valores productivos (Kale, K., Kale, H., Bingöl y Işık, 2026). Por tanto, el mayor rendimiento obtenido con los abonos verdes en el presente estudio parece responder a la integración de pequeñas ventajas en varios componentes, más que a una modificación marcada de una sola característica.

Esta interpretación debe mantenerse con cautela, porque no se determinó el número total de granos por mazorca ni la contribución relativa de cada componente al rendimiento. Además, la evaluación de solo diez mazorcas por unidad experimental y la variabilidad observada, principalmente en B+M, pudieron limitar la capacidad estadística para detectar diferencias individuales. En consecuencia, los resultados permiten reconocer una tendencia agronómicamente coherente, pero no identificar de forma definitiva cuál componente fue el principal responsable del aumento del rendimiento.

Análisis financiero y rentabilidad económica del sistema

El desempeño económico estuvo determinado por la combinación entre el rendimiento del maíz, los costos de establecimiento y manejo de los abonos verdes y la demanda de mano de obra para el control de malezas (Tabla 3). Mp+M presentó el mayor ingreso neto, con G 1237500 ha-¹, y la mayor rentabilidad, con 34,86%. Cj+M y Cc+M también generaron resultados positivos, con rentabilidades de 8,82 y 1,35%, respectivamente. En contraste, Ce+M y B+M registraron rentabilidades de −7,63 y −36,04%.

La superioridad económica de Mp+M estuvo asociada con el mayor rendimiento de granos y la menor demanda de carpidas. Este tratamiento produjo 4,79 t ha-¹ y requirió ocho jornales para el control de malezas, mientras que B+M produjo 2,74 t ha-¹ y demandó 30 jornales. La reducción de 22 jornales representó un ahorro de G 1.540.000 ha-¹. Esta menor necesidad de mano de obra pudo estar relacionada con el hábito rastrero y trepador, el rápido crecimiento vegetativo y la expansión del dosel de *Mucuna pruriens*, características que favorecen la cobertura del suelo y el sombreado de las malezas. Después del manejo, sus residuos también pudieron actuar como una barrera física para la emergencia de nuevas plantas. La capacidad de *M. pruriens* para reducir la biomasa de malezas mediante la competencia durante su crecimiento y la cobertura proporcionada por sus residuos ha sido destacada en estudios sobre leguminosas estivales (Zannopoulos et al., 2024).

Cj+M presentó una rentabilidad positiva de 8,82%, mientras que Cc+M permaneció próximo al punto de equilibrio. Ce+M registró una rentabilidad de −7,63%, principalmente por la combinación de una demanda de 23 jornales para las carpidas y un ingreso bruto insuficiente para recuperar el costo total durante el ciclo evaluado. Por su parte, B+M presentó el menor desempeño económico debido al menor rendimiento y al elevado costo de los 30 jornales empleados en el control de malezas. Estos resultados muestran que el incremento del rendimiento no garantiza por sí solo una mayor rentabilidad, ya que también deben considerarse los costos de semillas, establecimiento, manejo de la biomasa y control de malezas.

Tabla 3. Costos de producción, ingresos y rentabilidad económica del maíz de entrezafra cultivado después de diferentes abonos verdes de verano. Caazapá, Paraguay, 2019.

Descripción	Costo Unitario G	B+M	Cc+M	Mp+M	Cj+M	Ce+M
Carpida (jornal)	70000	30	15	8	15	23
Siembra AV (Jornal)	70000		3	3	3	3
Semilla *Cajanus cajan*(Kg.)	7000		35			
Semilla *M. pruriens* (Kg.)	4000			100		
Semilla *C. juncea* (Kg.)	6000				50	
Semilla *C. ensiformis* (Kg.)	4000					80
Rolado (ha)	200000		1	1	1	1
Costo Básico G *		2180000	2180000	2180000	2180000	2180000
COSTO TOTAL G (CT)		4280000	3885000	3550000	3940000	4520000
Rendimiento (t. ha^{-1}) (R)		2,7375	3,9375	4,7875	4,2875	4,175
Ingreso Bruto G(R*Precio)		2737500	3937500	4787500	4287500	4175000
Ingreso Neto G (IN)		−1542500	52500	1237500	347500	-345000
Rentabilidad (IN/CT)*100		-36,04	1,35	34,86	8,82	-7,63

*El costo básico común incluyó la semilla de maíz, la preparación del suelo, el herbicida y su aplicación, el insecticida y su aplicación, la siembra del maíz, la cosecha, la trilla y el embolsado. Estos costos fueron considerados por igual en todos los tratamientos.

La rentabilidad negativa de Ce+M no debe interpretarse como evidencia definitiva de inviabilidad económica de *Canavalia ensiformis*. El análisis comprendió únicamente una cosecha de maíz de entrezafra y atribuyó a esta todos los costos de implantación y manejo del abono verde. Los beneficios económicos de las plantas de cobertura pueden no manifestarse completamente en el primer cultivo sucesor, porque dependen del periodo analizado, de los costos iniciales y de posibles ahorros o aumentos de productividad obtenidos en cosechas posteriores (Bergtold et al., 2019). Por tanto, los valores de la Tabla 3 representan la rentabilidad inmediata de corto plazo y no el retorno económico completo del sistema de producción.

Futuros estudios deberán mantener los tratamientos durante varios ciclos y evaluar sus efectos sobre el maíz de entrezafra, el cultivo de la zafra principal y los demás cultivos sucesores. El análisis deberá integrar los costos e ingresos de todo el ciclo anual y estimar la rentabilidad acumulada del sistema, en lugar de considerar una sola cosecha. Evaluaciones de largo plazo muestran que los efectos productivos de las coberturas pueden variar entre campañas y que las rotaciones diversificadas pueden alcanzar mayor rentabilidad acumulada cuando se consideran conjuntamente todos los cultivos de la secuencia (Piva et al., 2021; Garbelini et al., 2022). Bajo las condiciones y precios de 2019, Mp+M fue la alternativa económicamente más favorable, pero la viabilidad definitiva de los demás abonos verdes requerirá una evaluación plurianual a escala del sistema.

CONCLUSIONES

Los abonos verdes de verano incrementaron el rendimiento del maíz de entrezafra en comparación con el barbecho, destacándose Mp+M por presentar la mayor productividad. Aunque el número de hileras por mazorca, el número de granos por hilera y el peso de 100 granos no difirieron significativamente entre los tratamientos, sus variaciones numéricas conjuntas pudieron contribuir a las diferencias observadas en el rendimiento.

Mp+M también presentó la menor demanda de mano de obra para el control de malezas y el mayor retorno económico, con una rentabilidad de 34,86%. Sin embargo, este resultado representa el desempeño inmediato de una única cosecha de maíz de entrezafra. La viabilidad económica integral de los abonos verdes deberá confirmarse mediante evaluaciones de varios ciclos que consideren sus efectos residuales sobre los cultivos sucesores y la rentabilidad anual y acumulada del sistema de producción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arce Barrios, A. C. (2017). *Diagnóstico de la fertilidad de los suelos de la Región Oriental del Paraguay* (Tesis de grado, Carrera de Ingeniería Agronómica, Área de Suelos y Ordenamiento Territorial). San Lorenzo: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. https://repositorio.conacyt.gov.py/handle/20.500.14066/4127

Bergtold, J. S., Ramsey, S. M., Maddy, L., & Williams, J. R. (2019). A review of economic considerations for cover crops as a conservation practice. *Renewable Agriculture and Food Systems, 34*(1), 62–76. https://doi.org/10.1017/S1742170517000278

Cao, W., Yu, Z., Shi, Y., Zhang, Z., & Zhang, Y. (2026). Photosynthetic performance of spring maize leaves and the development and formation of superior and inferior grains. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1732666. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1732666

Carvalho, M. L., Galera, L. de A., Scholten, R. S., Canisares, L. P., & Cherubin, M. R. (2026). Dry matter production and nutrient uptake by cover crops in Brazilian agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems, 132*, 28. https://doi.org/10.1007/s10705-026-10470-8

Derpsch, R., Lange, D., Birbaumer, G., & Moriya, K. (2016). Why do medium- and large-scale farmers succeed practicing CA and small-scale farmers often do not? Experiences from Paraguay. *International Journal of Agricultural Sustainability, 14*(3), 269–281. https://doi.org/10.1080/14735903.2015.1095974

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2015). *InfoStat, versión 2015* [Software estadístico]. Córdoba: Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. http://www.infostat.com.ar/

Fullaondo Navarro, E. F. (2014). *Clasificación del nivel de materia orgánica de los suelos de la Región Oriental del Paraguay* (Tesis de grado, Carrera de Ingeniería Agronómica). San Lorenzo: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. https://informacionpublica.paraguay.gov.py/public/964942-ErichFullaondopdf-ErichFullaondo.pdf

Garbelini, L. G., Debiasi, H., Balbinot Junior, A. A., Franchini, J. C., Coelho, A. E., & Telles, T. S. (2022). Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems. *European Journal of Agronomy, 137*, 126528. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126528

Imorou, L., Yemadje, P. L., Ranaivoson, L., Christina, M., Tovihoudji, P. G., N'Douro, M. Z. S., … Tittonell, P. (2026). Conservation agriculture systems reduce weed emergence and alter weed community structure in a cotton-based cropping system in Benin. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 401*, 110262. https://doi.org/10.1016/j.agee.2026.110262

Juneja, P., Baath, G. S., Brar, J. S., Flynn, K. C., Yost, J. L., & Rajan, N. (2026). Corn responses to nitrogen fertilization as influenced by cover cropping: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development, 46*, 3. https://doi.org/10.1007/s13593-025-01067-6

Kale, K., Kale, H., Bingöl, S., & Işık, D. (2026). An approach to increasing sustainability in agricultural systems: Evaluating the effects of different cover crops on yield components in maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant Production, 20*, 54. https://doi.org/10.1007/s42106-026-00438-7

Kumar, V., Singh, V., Flessner, M. L., Reiter, M. S., Kumari, A., Price, A., … Mirsky, S. B. (2025). Impact of cover crops and termination timing on weed management in corn. *Weed Technology, 39*, e69. https://doi.org/10.1017/wet.2025.39

Long, Y., Zeng, Y., Liu, X., & Yang, Y. (2024). Multivariate analysis of grain yield and main agronomic traits in different maize hybrids grown in mountainous areas. *Agriculture, 14*(10), 1703. https://doi.org/10.3390/agriculture14101703

López Gorostiaga, O. E. (2024). *Grandes grupos de suelos de la región oriental del Paraguay* (J. Á. Lesme Brun, Comp.). José Ángel Lesme Brun. https://isbn.bibliotecanacional.gov.py/catalogo.php?mode=detalle&nt=17284

Madrid, L. B., Sehgal, A., Ye, R., Siddique, K. H. M., Hein, K., Topp, C., & Narayanan, S. (2026). Cover crop root attributes and their contribution to soil processes and agroecosystem sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 407*, 110468. https://doi.org/10.1016/j.agee.2026.110468

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2023). *VI Censo Agropecuario Nacional 2022* (Vol. 1). Dirección de Censos y Estadísticas Agropecuarias. https://can2022.mag.gov.py/geoportal/VI_CENSO_AGROPECUARIO_NACIONAL_Volumen_1.pdf

Ortigoza Guerreño, J., Torres Ferreira, A. M., Alonso Giménez, B. B., Báez Arzamendia, M. E., Villalba Algarin, C. A., & Sanabria Franco, M. F. (2026). Plantas de cobertura en sistemas de agricultura familiar: Evidencias experimentales iniciales sobre las propiedades del suelo y los rendimientos de los cultivos en Paraguay. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay, 31*, e3108. https://doi.org/10.32480/rscp.2026.e3108

Piva, J. T., Bratti, F., Locatelli, J. L., Ribeiro, R. H., Besen, M. R., Brancaleoni, E., & Schmitt, D. E. (2021). Use of winter cover crops improves maize productivity under reduced nitrogen fertilization: A long-term study. *Bragantia, 80*, e0621. https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200165

Roberts, C., Gholson, D., Quintana-Ashwell, N., Locke, M. A., Pieralisi, B. K., Spencer, G. D., … Krutz, L. J. (2025). Economic implications of reduced tillage and cover crops in the irrigated mid-South. *Agronomy Journal, 117*(2), e70034. https://doi.org/10.1002/agj2.70034

Smee, M., Girkin, N. T., Simmons, R. W., & Falagán, N. (2026). Uncovering the potential of cover cropping for regenerative horticulture. *European Journal of Agronomy, 180*, 128243. https://doi.org/10.1016/j.eja.2026.128243

Souza, V. S., Canisares, L. P., Schiebelbein, B. E., de Castro Santos, D., Menillo, R. B., Pinheiro Junior, C. R., & Cherubin, M. R. (2025). Cover crops enhance soil health, crop yield and resilience of tropical agroecosystem. *Field Crops Research, 322*, 109755. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109755

Syngenta Paraguay. (2026). *Agrisure Viptera3*. Recuperado el 22 de julio de 2026, de https://www.syngenta.com.py/agrisure-viptera3

Villalba Algarin, C. A. (2025). Avanzando hacia una agricultura climáticamente inteligente: El papel del carbono orgánico en las funciones del suelo, los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad de agroecosistemas. *Investigación Agraria, 27*(1), e2701825. https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2025.2701825

Villalba Algarin, C. A., González, A. C., Szostak, J. E., & Sanabria Franco, M. F. (2024). Explorando el estado del arte de la labranza y su impacto en la calidad del suelo y la productividad agrícola: Una revisión crítica de los últimos 20 años. *Investigación Agraria, 26*(2), 111–124. https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2024.diciembre.2602806

Villalba Algarin, C. A., Sanabria Franco, M. F., González, A. C., & Lavres, J. (2026). Legacy effects of 32 years of tillage and crop diversification on soil biological activity in Paraguay. *Soil Systems, 10*(6). https://doi.org/10.3390/soilsystems10060066

Villalba Algarin, C. A., Thiengo, C. C., Cherubin, M. R., Bieluczyk, W., Mariano, E., Amorim, D. J., … Lavres, J. (2025). Can no-tillage and crop diversification sustain nutrient stocks in acidic and poorly-fertilized soils? Evidence from 32 years of real-world agricultural management in Paraguay. *Soil Advances, 4*, 100084. https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100084

Wu, W., Yue, W., Bi, J., Zhang, L., Xu, D., Peng, C., … Wang, S. (2024). Influence of climatic variables on maize grain yield and its components by adjusting the sowing date. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1411009. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1411009

Yan, F., & Arthur, E. (2025). Cover crops alter soil physicochemical properties: A global meta-analysis. *Geoderma, 460*, 117436. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117436

Zannopoulos, S., Gazoulis, I., Kokkini, M., Antonopoulos, N., Kanatas, P., Kanetsi, M., & Travlos, I. (2024). The potential of three summer legume cover crops to suppress weeds and provide ecosystem services: A review. *Agronomy, 14*(6), 1192. https://doi.org/10.3390/agronomy14061192

Zhang, H., Li, T., Zhang, Z., Wang, J., Yang, H., Liu, J., … Xu, S. (2025). Dissecting the genetic architecture of yield-related traits by QTL mapping in maize. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1624954. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1624954