



Uso equivalente de la tierra e índices de crecimiento y eficiencia fisiológica en cultivos intercalados de yuca, maní y maíz

Equivalent land use and growth rates and physiological efficiency in intercropped cassava, peanut and corn

Diana María Sánchez-Olaya^{1*} ; Daniela Fernanda Bautista-Bohórquez² ; Karla Vanessa Cabrera-Parra² 

¹Universidad de la Amazonia. Grupo de Investigación en Agroecología y Desarrollo Rural – GIADER. Florencia - Caquetá, Colombia; e-mail: dia.sanchez@udla.edu.co

²Universidad de la Amazonia. Facultad de Ingeniería. Florencia - Caquetá, Colombia; e-mail: da.bautista@udla.edu.co; karl.cabrera@udla.edu.co

*autor de correspondencia: dia.sanchez@udla.edu.co

Cómo citar: Sánchez-Olaya, D.M.; Bautista-Bohórquez, D.F.; Cabrera-Parra, K.V. 2024. Uso equivalente de la tierra e índices de crecimiento y eficiencia fisiológica en cultivos intercalados de yuca, maní y maíz. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 27(2):e2603. <http://doi.org/10.31910/rudca.v27.n2.2024.2603>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada en Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional

Recibido: abril 10 de 2024

Aceptado: diciembre 3 de 2024

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los cultivos intercalados ofrecen beneficios significativos para la agricultura, al fijar nitrógeno, proteger contra plagas y enfermedades y optimizar la producción. En este sentido, se analizó el efecto de los cultivos intercalados y unicultivos de yuca, maní y maíz, sobre los índices de crecimiento y uso equivalente de la tierra (UET). Los resultados mostraron que la yuca presentó una mayor tasa de crecimiento absoluto en los cultivos intercalados en comparación con el unicultivo, a las 12, 24 y 36 semanas después de la siembra (SDS). Por otro lado, el maní mostró los mayores valores de la tasa relativa de crecimiento a las 4 SDS y disminuyó a lo largo del tiempo. En cuanto al maíz, el unicultivo tuvo una tasa de asimilación neta más alta, desde las 4 SDS hasta las 12 SDS. En términos del UET, el sistema de cultivo maíz y yuca resultó ser el más eficiente, con un valor de 1,30, seguido del cultivo intercalado de yuca, maní y maíz con 1,24, indicando un uso óptimo de la tierra y una mayor producción de los cultivos; en contraste, el cultivo intercalado de maní y maíz fue el menos eficiente, con 0,59, valor inferior al UET de los unicultivos. Los cultivos intercalados de yuca, maní y maíz tienen el potencial de estimular el crecimiento, mejorar la eficiencia fisiológica y optimizar el uso de la tierra en comparación con los unicultivos, siempre y cuando se planifiquen adecuadamente, para aprovechar las interacciones beneficiosas entre las especies.

Palabras clave: Agricultura sostenible; Eficiencia de uso; Rendimiento de cultivos; Seguridad alimentaria; Sistemas de cultivo.

ABSTRACT

Intercropping offers significant benefits for agriculture by fixing nitrogen, protecting against pests and diseases, and optimizing production. In this sense, the effect of intercropping and unicultivation of cassava, peanut, and corn on growth rates and equivalent land use (ELU) was analyzed. The results showed that cassava presented a higher absolute growth rate in intercropping compared to uni-cultivation at 12, 24, and 36 weeks after planting (WAP). On the other hand, peanut showed the highest values of relative growth rate at 4WAP and decreased over time. As for corn, uni-cultivation had a higher net assimilation rate from 4 WAP to 12 WAP. In terms of ELU, the maize-cassava intercropping system was the most efficient, with a value of 1.30, followed by the intercropping of cassava, peanut, and maize with 1.24, indicating optimal land use and higher crop production; in contrast, the intercropping of peanut and maize was the least efficient, with 0.59, a value lower than the ELU of the uni-cultivars. The intercropping of cassava, peanut, and maize has the potential to stimulate growth, improve physiological efficiency, and optimize land use compared to uni-cultivation, provided it is properly planned to take advantage of beneficial interactions between species.

Keywords: Crop yield; Cropping systems; Food security; Sustainable agriculture; Use efficiency.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la agricultura ha desempeñado un papel crucial al transformar los estilos de vida y la capacidad de supervivencia (Tamayo Ortiz & Alegre Orihuela, 2022). Con el tiempo, las técnicas agrícolas han evolucionado, generando mejoras en la eficiencia y la diversidad de cultivos, por ejemplo, los mayas e incas solían combinar el maíz con frijoles o calabazas en sus campos, obteniendo beneficios, como la fijación de nitrógeno y la protección contra plagas (El-Mehy *et al.* 2023); sin embargo, en la edad media europea, los agricultores adoptaron la rotación de cultivos, para mantener la fertilidad del suelo y prevenir enfermedades específicas de las plantas (Shah *et al.* 2021).

Por otro lado, los cultivos intercalados promueven la diversidad vegetal en un área, fortaleciendo la resistencia del ecosistema agrícola (Ruiz *et al.* 2015; Castillo *et al.* 2022). El manejo de esta práctica facilita la recuperación de los cultivos frente a plagas y condiciones climáticas extremas (Martínez Díaz, 2019; Gómez-Camperos *et al.* 2021), ayudando a los cultivadores a estabilizar la producción agrícola y disminuir la dependencia de productos químicos en la agricultura, así como mejorar la calidad del suelo y distribuir la materia orgánica, mediante la inclusión de leguminosas en el ecosistema (Bover-Felices & Suárez-Hernández, 2020).

La conservación de la biodiversidad y la mejora de la salud del suelo, a través de los cultivos intercalados, pueden ser una herramienta valiosa para abordar varios objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (Ramos Torres, 2021), tales como la erradicación de la pobreza, la mejora de la salud y la promoción de la igualdad de género, con el fin de fomentar una producción y consumo responsables y tomar medidas para abordar el cambio climático (Rodrigo-Cano *et al.* 2019). De esta manera, los cultivos intercalados benefician a los agricultores al maximizar el uso de la tierra y reducir los costos de producción, lo que, a su vez, genera ingresos para las familias dedicadas a la producción de alimentos, a pequeña escala (Nicholls & Altieri, 2018).

En consecuencia, los cultivos intercalados son una estrategia agrícola, que implica alternar diferentes especies de cultivos en el mismo terreno (Arenas Salazar *et al.* 2024); por ejemplo, la yuca (*Manihot esculenta* L.), una planta resistente y productiva, capaz de prosperar, incluso, en suelos pobres, es una fuente esencial de carbohidratos en las regiones tropicales (Santos *et al.* 2019); el maní (*Arachis hypogaea* L.), una leguminosa rica en proteínas y grasas saludables es primordial para garantizar la seguridad alimentaria y mantener la fertilidad del suelo (Montero, 2020) y el maíz (*Zea mays* L.) desempeña un papel fundamental, tanto en la alimentación humana como en diversas industrias y su versatilidad le permite adaptarse a diferentes condiciones agroecológicas, convirtiéndolo en un pilar económico, para las familias rurales (Shiferaw *et al.* 2011; Solano, 2021).

Por ende, estos cultivos no solo son valiosos nutricional y económicamente, sino que, también, son fundamentales para promover sistemas agrícolas sostenibles (FAO, 2021). Su diversidad genética y capacidad de adaptación fortalecen la resiliencia ante desafíos, como el cambio climático y las enfermedades (León, 2010). Al integrar estos cultivos en sistemas agroforestales es posible promover la salud del suelo, preservar los recursos hídricos y la diversidad biológica, así como

mitigar la erosión del suelo y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (Palacios & Mavisoy, 2020).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue analizar los efectos de los cultivos intercalados y unicultivos de yuca, maní y maíz, sobre los índices de crecimiento y eficiencia fisiológica; además, se evaluó la eficiencia biológica y la capacidad competitiva de los cultivos asociados, mediante el uso equivalente de la tierra (UET). Este estudio es relevante para los agricultores, dado que proporciona información sobre el crecimiento, desarrollo y producción de especies agrícolas en diferentes sistemas de cultivo y la optimización en el uso del suelo, para aumentar la eficiencia y competitividad, al promover la adopción de prácticas agrícolas sostenibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El ensayo se realizó en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual (CIMAZ), ubicado a 20 km de Florencia, al sur del departamento del Caquetá, localizado geográficamente en el noroccidente de la Amazonia colombiana, con coordenadas 1°30'4.39" N y 75°39'44.8" O, a una altitud de 250 m s.n.m. y corresponde a la zona de vida de bosque húmedo tropical (bh-T) (García-Rincón *et al.* 2021) (Figura 1). El clima se caracteriza por presentar una humedad relativa de 85,1 %, temperatura media de 24 °C, precipitación media anual de 3.695 mm y un fotoperiodo de 4,6 horas día⁻¹. Tiene suelos muy evolucionados, con alto contenido de hierro y aluminio y con pH inferior a 4,6 (Aldana García *et al.* 2021).

Diseño experimental y tratamientos evaluados. Se realizó un diseño de bloques completamente aleatorizado, con seis tratamientos y cinco réplicas. El área de las parcelas fue de 50 m² (5 m de ancho x 10 m de largo). Cada tratamiento incluyó diferentes cantidades de plantas de yuca, maní y maíz; además, se estableció un grupo de control, que correspondía a cada cultivo en unicultivo.

Los tratamientos evaluados fueron: 1) unicultivo de yuca (U-Yuca), con una densidad de 10.000 plantas ha⁻¹; 2) cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), con una densidad de 6.000, 18.400 y 19.200 plantas ha⁻¹, respectivamente; 3) unicultivo de maní (U-Maní), con una densidad de 73.600 plantas ha⁻¹; 4) cultivo intercalado de maní y maíz (M-M), con una densidad de 46.000 y 28.800 plantas ha⁻¹, respectivamente; 5) unicultivo de maíz (U-Maíz), con una densidad de 28.800 plantas ha⁻¹ y 6) cultivo intercalado de maíz y yuca (M-Y), con una densidad de 28.800 y 10.000 plantas ha⁻¹, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, para establecer las densidades en los tratamientos se basó en optimizar la eficiencia en el uso de recursos, como nutrientes, luz y agua y mejorar la productividad, tanto en cultivos intercalados como en unicultivos (Vélez-Vargas *et al.* 2007; Altieri, 2010). En los cultivos intercalados, como el de yuca, maní y maíz, se ajustaron densidades para favorecer la complementariedad: la yuca, mejora la estructura del suelo; el maní, fija nitrógeno y el maíz, utiliza eficientemente el nitrógeno (Delaquis *et al.* 2018; Dong *et al.* 2022). En los unicultivos las densidades se establecieron, de acuerdo con la recomendaciones agronómicas que maximizan la productividad y cobertura del suelo (Xia *et al.* 2019; Cenóz *et al.* 2010; Onasanya *et al.* 2021).

Manejo del sitio y el establecimiento de cultivos. La preparación de terreno se realizó de manera manual utilizando un azadón, seguido por la creación de surcos, de acuerdo con cada uno de los tratamientos evaluados, dispuestos perpendicularmente a la superficie del campo (Aguilar, 2017). Para mantener el suelo en condiciones óptimas, se realizó la eliminación manual de malezas cada 30 días, para evitar su crecimiento excesivo (Šikuljak *et al.* 2023).

Se emplearon las variedades nativas conocidas, como maní var. rojo (similar al tipo valencia) y yuca var. quindiana; se utilizó la variedad certificada de maíz ICA V-105. En cuanto a la siembra, se plantaron dos semillas por sitio para el maíz y el maní, a una profundidad de 2 a 3 cm; para la yuca, se utilizó un corte de tallo de 0,25 m de largo con tres brotes y se plantó a una profundidad de 5 a 10 cm (Sánchez Olaya *et al.* 2023).

Se realizaron monitoreos regulares de plagas y de enfermedades en los tres cultivos para detectar y abordar posibles amenazas a su salud y producción (Varón de Agudelo *et al.* 2022). Como medida preventiva, se aplicó caldo bórdeles al 1 % y caldo sulfocálcico al 1,5 %; además, se implementaron bandas de color amarillo impregnadas con aceite y miel, para atrapar plagas (Cabrera Marulanda *et al.* 2018).

Mediciones de crecimiento. Se llevaron a cabo mediciones específicas para la yuca, el maní y el maíz, que incluyeron: a) *área foliar*, que

consistió en seleccionar las hojas más representativas de cada cultivo y se colocaron sobre una hoja de papel blanca, con una escala de 10 cm y fueron fotografiadas para su análisis, mediante el software especializado ImageJ (Martin *et al.* 2020); b) *área del suelo*, se calculó mediante la subdivisión en cuadrantes y, en cada uno de ellos, se midieron las dimensiones de largo y de ancho, para luego sumarlas (Suárez-Londoño *et al.* 2017); c) *peso seco*, que consistió en secar todas las partes de las plantas de cada uno de los cultivos y, para ello, se tomó cada muestra en bolsas de papel y se llevó al horno para secar, a una temperatura de 60 °C, hasta que las muestras alcanzaron peso constante y éste se registró en una balanza de precisión de 0,01 g. Las mediciones se realizaron en 10 plantas de maní y de maíz y en 5 plantas en yuca seleccionadas al azar por parcela, a la 4, 6, 8 y 12 semanas después de la siembra (SDS). Con las mediciones de crecimiento, se determinó los índices de crecimiento, relacionados en la tabla 1.

Cosechas finales y evaluaciones de rendimiento. La yuca se cosechó a las 52 SDS. Las plantas de yuca ubicadas en las hileras de las parcelas fueron extraídas manualmente del suelo; se evaluaron las raíces comerciales de reserva, que tenían un diámetro superior a 1,5 cm y estaban libres de enfermedades o deterioro; estas raíces frescas se pesaron en una báscula digital con precisión de 100 g y los resultados se expresaron en kg ha⁻¹ (Howeler, 2014; Samidjo & Sarjijah, 2020).

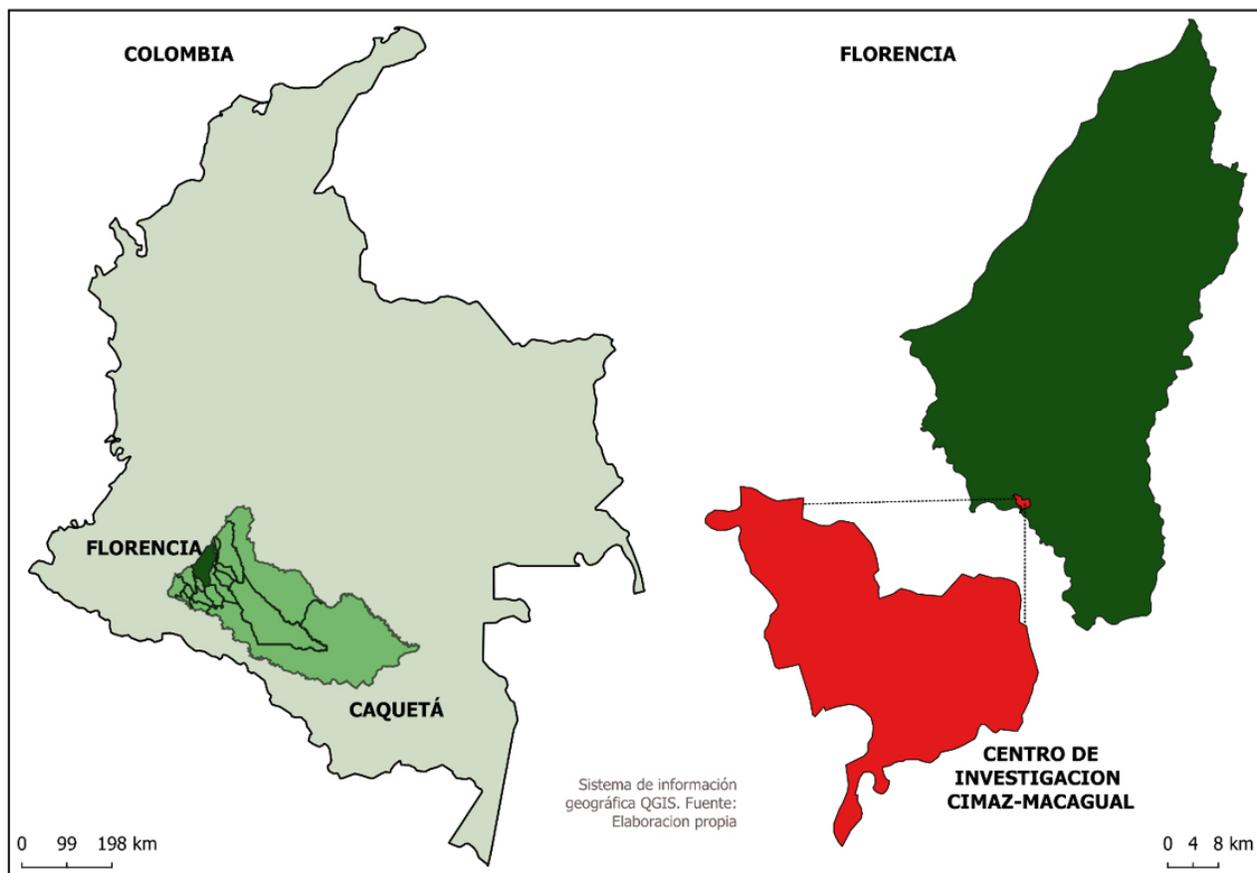


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio, en el Centro de Investigaciones Amazónicas Macagual (CIMAZ), Caquetá, Colombia.

Tabla 1. Índices de crecimiento determinados en el estudio.

Índice de crecimiento	Unidad de medida	Fórmulas
Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA)	g día ⁻¹	$\frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1}$
Tasa Relativa de Crecimiento (TRC)	g g ⁻¹ día ⁻¹	$\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$
Tasa de Asimilación Neta (TAN)	g cm ² día ⁻¹	$\frac{(W_2 - W_1)(LA_2 - LA_1)}{(\ln LA_2 - \ln LA_1)(t_2 - t_1)}$

Ln: logaritmo natural; W₁ y W₂: peso seco 1 y 2; t₁ y t₂: tiempo 1 y 2; LA₁ y LA₂: área foliar 1 y 2.

El maní se cosechó entre las 18 y 20 SDS. El rendimiento en grano del cultivo se obtuvo al momento de la cosecha, tomando las plantas de una superficie de un metro cuadrado y considerando el peso de semilla sin vainas, registrado en una balanza analítica 0,01 g. Los rendimientos de grano de maní se expresaron en kg ha⁻¹ (Canavar & Kaynak, 2008).

El maíz se cosechó entre las 16 y 18 SDS. Se contabilizaron las plantas y se retiraron las mazorcas de todas las plantas en las parcelas; las mazorcas recolectadas se pesaron en una báscula digital con precisión de 100 g y los rendimientos de grano de maíz, se expresaron en kg ha⁻¹ (Kirouani *et al.* 2023).

Uso equivalente de la tierra (UET). Para determinar el UET se consideró el rendimiento obtenido para cada cultivo en unicultivo e intercalado. El cálculo del UET para el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), se realizó mediante la ecuación 1; para el cultivo intercalado de maní y maíz (M-M), con la ecuación 2 y cultivo intercalado de maíz y yuca (M-Y), con la ecuación 3 (Gómez Betancur *et al.* 2018).

$$UET_{Y-M-M} = \frac{I_y}{U_y} + \frac{I_m}{U_m} + \frac{I_{mz}}{U_{mz}} \quad \text{ecuación 1}$$

$$UET_{M-M} = \frac{I_m}{U_m} + \frac{I_{mz}}{U_{mz}} \quad \text{ecuación 2}$$

$$UET_{M-Y} = \frac{I_y}{U_y} + \frac{I_{mz}}{U_{mz}} \quad \text{ecuación 3}$$

Donde:

I_y: rendimiento de la yuca en cultivo intercalado.

U_y: rendimiento de la yuca en unicultivo.

I_m: rendimiento del maní en cultivo intercalado.

U_m: rendimiento del maní en unicultivo.

I_{mz}: rendimiento del maíz en cultivo intercalado.

U_{mz}: rendimiento del maíz en unicultivo.

Para la variable UET, valores < 1, significa que el cultivo intercalado no produjo más que los unicultivos por unidad de área; valores = 1, indica que la producción por unidad de área es igual en ambos sistemas de cultivo y valores > 1, denota que el cultivo intercalado es más productivo que cualquier unicultivo (Ruiz-González & Victorino-Ramírez, 2015; Gómez Betancur *et al.* 2018).

Análisis estadístico. Se ajustó un modelo lineal general y mixto, con el método de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML), donde los tratamientos y el tiempo representado en SDS se seleccionaron como factor fijo y las repeticiones, se incluyeron como factor aleatorio. Para cada uno de los modelos estimados, se evaluaron los supuestos de normalidad y homogeneidad y se realizó la prueba de comparación de medias LSD Fisher ($\alpha=0,05$). Los análisis estadísticos se desarrollaron en el software InfoStat versión 2020 con la interfaz de R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Yuca. Al evaluar la TCA, se encontró que el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) presentó una TCA más alta, alcanzando un valor de 17,5 g día⁻¹ a las 36 SDS (Figura 2a), seguido del cultivo intercalado de yuca y maíz (M-Y), que presentó una TCA máxima de 12,3 g día⁻¹; por último, el unicultivo de yuca, que presentó los valores más bajos desde las 8 hasta las 36 SDS. La alta TCA registrada en Y-M-M sugiere una eficiencia notoria en el aprovechamiento de recursos; esta eficiencia podría ser el resultado de la complementariedad en la utilización de recursos en el tiempo o en el espacio entre los tres cultivos en este sistema (Pereyra *et al.* 2019).

En cultivos intercalados, como Y-M-M, cada cultivo puede desempeñar un papel único en la optimización de la utilización de los recursos disponibles en el suelo; por ejemplo, la yuca, con sus raíces profundas y sistema radicular extenso, puede aprovechar los nutrientes más profundos del suelo (Arias-Collaguazo *et al.* 2021), mientras que el maíz, con su crecimiento vertical, puede aprovechar la luz solar en diferentes niveles del dosel vegetal (Albino-Garduño *et al.* 2015; Tapia-Hernández *et al.* 2024); además, el maní, siendo una leguminosa, puede fijar nitrógeno atmosférico, enriqueciendo el suelo y beneficiando el crecimiento de los otros cultivos (Liu *et al.* 2020). Esta sinergia en la utilización de recursos puede potenciar el crecimiento y el desarrollo de los cultivos individuales dentro del sistema Y-M-M, contribuyendo a la alta TCA.

En cuanto a la TRC, en el unicultivo (U-Yuca), se observa la TRC más alta en comparación con los cultivos intercalados, a partir de las 8 SDS, con un valor $0,082 \text{ g día}^{-1}$ (Figura 2b), lo que indica que la yuca en unicultivo experimenta un incremento de materia seca más veloz con respecto al tiempo y se puede atribuir al ser el único cultivo; puede aprovechar todos los recursos disponibles sin competencia, lo que promueve un crecimiento óptimo (Mbanjo *et al.* 2021). En contraste, los cultivos intercalados de maíz y yuca (M-Y), yuca, maní y maíz (Y-M-M) muestran una TRC que aumenta gradualmente con el tiempo, aunque su ritmo de crecimiento es inferior al de U-Yuca, lo que sugiere que la presencia concurrente de maíz y de maní puede estar limitando el crecimiento de la yuca, debido a una competencia intensificada por los recursos disponibles. La interacción entre cultivos, como M-Y y Y-M-M, desempeña un papel crucial en el crecimiento de la yuca; por ejemplo, ciertos cultivos pueden proporcionar sombra, como el maíz, debido a su crecimiento vertical y por sus hojas anchas y altas, lo que ayuda a reducir el estrés térmico en la yuca; por su parte, en unicultivos donde la yuca se cultiva exclusivamente, no hay competencia con otros cultivos por recursos, como luz, agua y nutrientes, lo que puede explicar una TRC alta (Colina *et al.* 2020). Además, las condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad y la calidad del suelo, ejercen una influencia significativa en la tasa de crecimiento de la yuca. La yuca exhibe una notable capacidad para prosperar en condiciones adversas, incluyendo, suelos ácidos y de baja fertilidad, así como en áreas con precipitaciones esporádicas o prolongados períodos de sequía (Santos *et al.* 2019).

El cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) exhibe la mayor TAN a partir de las 12 SDS, obteniendo un valor de $0,057 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$, a las 36 SDS (Figura 2c), lo que sugiere una notable eficiencia fotosintética alta, posiblemente, atribuida a la diversidad de cultivos en este sistema. Esta diversidad puede facilitar una mejor utilización de los recursos disponibles (Brestič *et al.* 2021). Por otro lado, el cultivo intercalado de yuca y maíz (Y-M) presenta un incremento menor a las 36 SDS, con $0,026 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$, en comparación con los demás tratamientos. La variabilidad en la TAN de la yuca en diferentes sistemas de cultivo se debe a una interacción compleja de factores biológicos y ambientales (Adu *et al.* 2018). En los cultivos intercalados, la diversidad de cultivos puede mejorar la disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo, lo que favorece un mayor crecimiento y desarrollo de la yuca, aumentando su TAN (Abrell *et al.* 2022). Además, estas asociaciones pueden promover interacciones beneficiosas entre plantas, como la fijación de nitrógeno, por parte del maní, que beneficia el crecimiento de la yuca (Sánchez Olaya *et al.* 2023). El manejo del cultivo y las condiciones ambientales específicas de cada sistema también influyen en la TAN, destacando la importancia de estrategias de manejo integradas y adaptativas, para optimizar el rendimiento de la yuca, en diversos contextos agrícolas (Hussain *et al.* 2023).

Maní. El cultivo intercalado de maíz y maní (M-M) experimenta un aumento en la TCA a partir de las 4 SDS, con un valor inicial de $0,1 \text{ g día}^{-1}$; este incremento se mantiene hasta las 6 SDS, alcanzando un valor de $1,4 \text{ g día}^{-1}$ (Figura 3a). Por otro lado, todos los tratamientos presentan disminuciones a partir de las 8 SDS. La observación de

que el cultivo de maní alcanzó su máxima TCA a los 6 SDS sugiere una fase inicial de rápido crecimiento vegetativo, típica de la etapa de establecimiento activo de las plantas (Sadras *et al.* 2016). Los valores registrados de TCA para los diferentes sistemas de cultivo a las 6 SDS ($1,4 \text{ g día}^{-1}$, para M-M; $0,72 \text{ g día}^{-1}$, para U-Maní y $0,47 \text{ g día}^{-1}$ para Y-M-M) reflejan las diferencias en la eficiencia de crecimiento del maní en cada sistema. La disminución subsiguiente en la TCA, a medida que aumentan las SDS, indica la transición de las plantas hacia etapas de crecimiento más lentas, posiblemente, debido a factores, como la competencia por recursos, limitaciones ambientales y el agotamiento de reservas internas de nutrientes (Di Benedetto & Tognetti, 2016); de esta forma, la reducción de la TCA entre $0,3 \text{ g día}^{-1}$ y $0,1 \text{ g día}^{-1}$, a las 12 SDS, sugiere un ajuste en la fase de crecimiento de las plantas, donde los recursos se asignan a otras necesidades fisiológicas, como la formación de estructuras reproductivas o la acumulación de reservas (González & Fuentes, 2017).

El cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) presenta el máximo valor de TRC a las 4 SDS, con un valor de $0,12 \text{ g día}^{-1}$, seguido del unicultivo (U-Maní), con $0,14 \text{ g día}^{-1}$ (Figura 3b). Este índice disminuye rápidamente, según avanzan las semanas para todos los tratamientos, hasta alcanzar valores de hasta $0,01 \text{ g día}^{-1}$, a las 12 SDS. La disminución en la TRC se debe a que el maní crece rápidamente, dado que las plantas están en una fase de establecimiento activo (Lv *et al.* 2023). Conforme las plantas maduran, su TRC disminuye gradualmente, por la competencia por recursos, como nutrientes y espacio y por factores ambientales, como disponibilidad de agua y temperatura (Blanco-Valdés, 2019). En cultivos intercalados, como Y-M-M, donde el maní compete con otros cultivos, la disminución en la tasa de crecimiento puede ser más pronunciada, debido a una mayor competencia por recursos en comparación con el unicultivo, donde el maní no enfrenta tal competencia (Huss *et al.* 2022).

Con relación al unicultivo (U-Maní), se observa el mayor valor de TAN a las 4 SDS, con un valor de $0,002 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$ (Figura 3c); sin embargo, este valor disminuye drásticamente hasta las 8 SDS, alcanzando un mínimo valor de $0,0004 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$. En cuanto al cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), la TAN permanece constante con el tiempo, con una variación entre las 8 SDS, con un valor de $0,0004 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$ hasta las 12 SDS, con un valor de $0,00035 \text{ g cm}^2 \text{ día}^{-1}$. El comportamiento observado en los sistemas de cultivo de maní se puede analizar considerando factores agronómicos y ambientales (De Santis *et al.* 2023). En el caso del U-Maní, donde se registra un descenso en la TAN, este fenómeno se atribuye a la competencia interna por recursos entre las plantas de maní, debido a que, al estar cultivadas únicamente plantas de maní, se genera una mayor competencia por nutrientes, agua y luz solar, lo que puede limitar el crecimiento individual de las plantas (Pedelini, 2008) y, por ende, reducir la TAN. En el caso del cultivo intercalado de Y-M-M, donde se observa la menor TAN, Reyes-Palomino & Cano Ccoa (2022) indican que la presencia de otros cultivos, como el maíz y la yuca, puede afectar la dinámica del nitrógeno en el sistema, lo que resulta en diferentes patrones de acumulación de TAN en comparación con el cultivo

exclusivo de maíz y la interacción entre los diferentes cultivos y sus necesidades nutricionales, lo que puede influir significativamente en la disponibilidad y en la distribución del nitrógeno en el suelo

durante el ciclo de cultivo y, de esta manera, limitar el crecimiento del maíz (Bianucci *et al.* 2018).

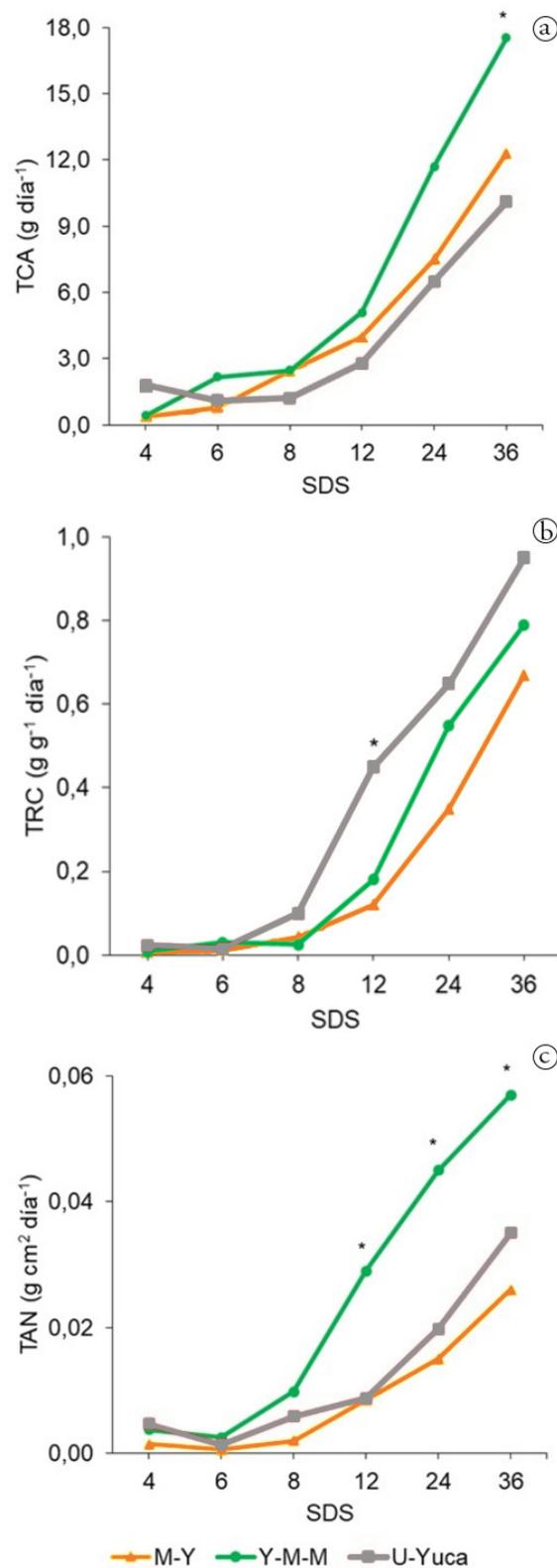


Figura 2. Efecto del unicultivo y cultivos intercalados con yuca sobre los índices de crecimiento. a) tasa de crecimiento absoluta (TCA); b) tasa relativa de crecimiento (TRC); c) tasa de asimilación neta (TAN). M-Y: Cultivo intercalado de maíz y yuca; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maíz y maíz; U-Yuca: Unicultivo de yuca.

*Significativo para el día del muestreo según prueba de LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

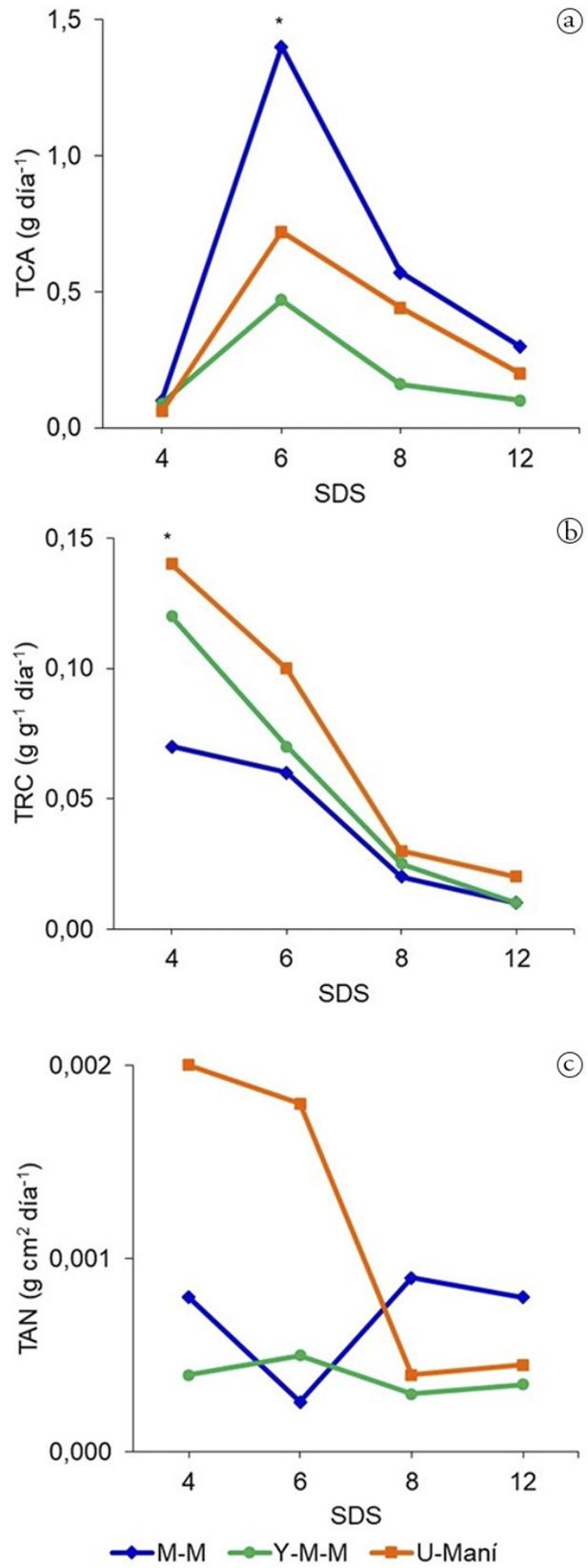


Figura 3. Efecto del unicultivo y cultivos intercalados con maní sobre los índices de crecimiento. a) tasa de crecimiento absoluta (TCA); b) tasa relativa de crecimiento (TRC); c) tasa de asimilación neta (TAN). M-M: Cultivo intercalado de maní y maíz; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Maní: Unicultivo de maní.

*Significativo para el día del muestreo según prueba de LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

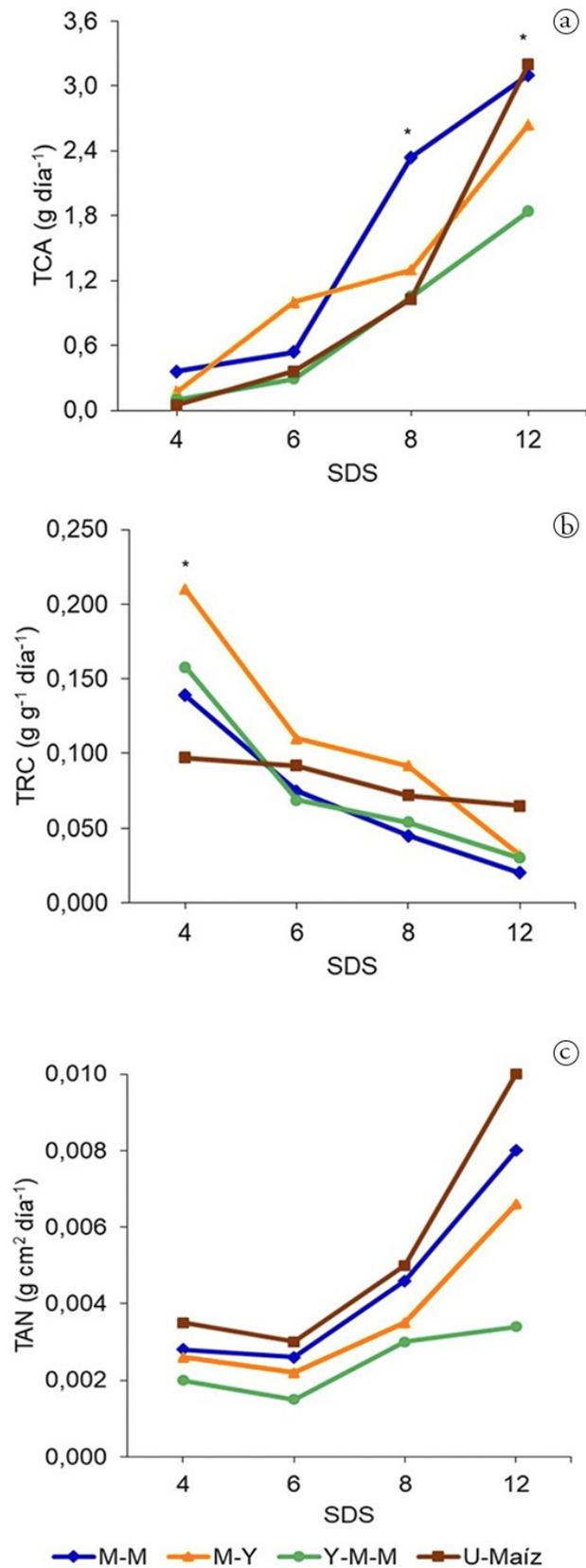


Figura 4. Efecto del unicultivo y cultivos intercalados con maíz sobre los índices de crecimiento. a) tasa de crecimiento absoluta (TAN); b) tasa relativa de crecimiento (TRC); c) tasa de asimilación neta (TAN). M-M: Cultivo intercalado de maní y maíz; M-Y: Cultivo intercalado de maíz y yuca; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Maíz: Unicultivo de maíz.

*Significativo para el día del muestreo según prueba de LSD Fisher ($\alpha=0,05$).

Maíz. Se evidenció un aumento en la TCA respecto al tiempo en todos los tratamientos (Figura 4a). En el cultivo intercalado de maní y maíz (M-M) y el unicultivo (U-Maíz), se registró la mayor TCA a las 12 SDS, con valores de 3,1 y 3,2 g día⁻¹, respectivamente, mientras que la menor TCA se observó en el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M), con 1,84 g día⁻¹. La mayor TCA observada se debe a una óptima disponibilidad de recursos, como nutrientes, agua y luz solar, permitiendo al maíz aprovechar eficientemente estos recursos, sin la presencia de competidores directos (Zhang *et al.* 2020). Además, la presencia de maní en el cultivo intercalado con maíz (M-M), genera interacciones positivas, como la fijación de nitrógeno en el suelo o la reducción de la competencia por luz solar (Li *et al.* 2022). Este período coincide también con una fase de crecimiento activo del maíz, con una alta demanda de recursos para el desarrollo de hojas, tallos y raíces, contribuyendo a una TCA más alta (Delgado *et al.* 2015). Por otro lado, la menor TCA registrada en el cultivo intercalado Y-M-M corresponde a una competencia más intensa por recursos, como nutrientes, agua y luz solar, entre los múltiples cultivos presentes, así como a la interferencia de las raíces profundas y extensas de la yuca y el maní, que podrían limitar el acceso del maíz a estos recursos (Noriega-Navarrete *et al.* 2021).

Con relación a la TRC, el cultivo intercalado de maíz y yuca (M-Y) presentó la TRC más alta a las 4 SDS, con un valor de 0,21 g día⁻¹, posteriormente, disminuyó hasta las 12 SDS, con un valor de 0,032 g día⁻¹ (Figura 4b), al contrario del comportamiento observado en el unicultivo (U-Maíz), que obtuvo la menor TRC a las 4 SDS (0,097 g día⁻¹) y la mayor a las 12 SDS (0,065 g día⁻¹). La interacción entre cultivos en sistemas intercalados puede influir significativamente en

el crecimiento del maíz, debido a la competencia por recursos, como nutrientes, agua y luz solar (Guamán Guamán *et al.* 2020); por ejemplo, en el sistema maíz y yuca, la asociación con la yuca puede proporcionar una mayor disponibilidad de nutrientes o reducir la competencia por ellos, estimulando el crecimiento inicial del maíz (He *et al.* 2023); sin embargo, con el tiempo, esta competencia se puede intensificar, lo que podría contribuir a la disminución de la TRC, en comparación con el unicultivo (Adjei *et al.* 2023); además, la presencia de diferentes cultivos puede alterar las propiedades del suelo y aumentar la susceptibilidad a enfermedades y plagas, lo que puede afectar negativamente el crecimiento y la productividad del maíz en sistemas asociados (Noriega-Navarrete *et al.* 2021).

El unicultivo de maíz (Uni- Maíz) y el cultivo intercalado de maní y maíz (M-M) obtuvieron la TAN más alta respecto a los demás tratamientos y aumentó gradualmente hasta las 12 SDS, con un valor de 0,01 y 0,008 g cm² día⁻¹, respectivamente. Por su parte, el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz (Y-M-M) presentó la menor TAN en comparación con los demás tratamientos (Figura 4c), siendo éste el sistema con la menor eficiencia fotosintética, debido a la intensa competencia por luz y nutrientes entre las especies, donde las diferencias en los requisitos de luz y nutrientes entre la yuca, el maní y el maíz contribuyeron a una disminución en la eficiencia fotosintética del maíz (Sánchez Torres *et al.* 2020; González & Fuentes, 2017). De esta forma, Bitew *et al.* (2021) indican que las diferencias morfofisiológicas y los factores agronómicos, también regulan la competencia entre los cultivos componentes, debido a los factores limitantes del crecimiento.

Tabla 2. Rendimiento y uso equivalente de la tierra (UET) en cada uno de los sistemas de cultivos evaluados.

Sistema de cultivo	Rendimientos absolutos (kg ha ⁻¹)			Rendimientos relativos			UET
	Yuca	Maní	Maíz	Yuca	Maní	Maíz	
M-M	-	19,6c	320b	-	0,19	0,40	0,59
M-Y	5120a	-	440ab	0,75	-	0,55	1,30
Y-M-M	3270a	49,5b	219b	0,48	0,49	0,27	1,24
U-Yuca	6812a	-	-	1,00	-	-	1,00
U-Maní	-	100,8a	-	-	1,00	-	1,00
U-Maíz	-	-	800a	-	-	1,00	1,00

M-M: Cultivo intercalado de maní y maíz; M-Y: Cultivo intercalado de maíz y yuca; Y-M-M: Cultivo intercalado de yuca, maní y maíz; U-Yuca: Unicultivo de yuca; U-Maní: Unicultivo de maní; U-Maíz: Unicultivo de maíz. Medias con una letra común no son significativamente diferentes según prueba de LSD Fisher ($p>0,05$).

Uso equivalente de la tierra (UET). Los cultivos intercalados de maíz y yuca (M-Y), yuca, maní y maíz (Y-M-M) presentaron los valores más altos de UET, con 1,30 y 1,24, respectivamente (Tabla 2), debido a las potenciales interacciones beneficiosas entre estos cultivos (He *et al.* 2023). Estas combinaciones pueden mejorar los nutrientes del suelo y la comunidad microbiana del suelo, aumentando la eficiencia en el uso de los recursos disponibles en el suelo (Negash & Mululem, 2014).

En contraste, el cultivo intercalado de maíz y maní (M-M) obtuvo un menor valor a comparación de los unicultivos (0,59), lo que indica una menor eficiencia en el uso del suelo, debido a una competencia más directa por los recursos (Han *et al.* 2022). Zhang *et al.* (2024) señalan la importancia de la complementariedad de los sistemas radiculares, dado que al elegir cultivos que posean sistemas radiculares, que se desarrollen en diferentes profundidades y patrones, se puede aprovechar mejor el espacio y los nutrientes

disponibles en el suelo, lo que ayuda a evitar la competencia directa entre los cultivos por recursos, como el agua y los nutrientes, lo que podría comprometer el rendimiento y la salud de las plantas (Craine & Dybzinski, 2013).

Además, es crucial considerar la competencia por nutrientes, agua y luz solar entre los cultivos, porque al seleccionar combinaciones de cultivos que minimicen esta competencia y permitan una distribución más eficiente de los recursos disponibles, se puede mejorar la productividad del sistema en su conjunto (Brendel, 2021). Estrategias, como la selección cuidadosa de especies que tengan requerimientos nutricionales complementarios o que utilicen diferentes fuentes de agua, pueden ayudar a mitigar esta competencia y optimizar el rendimiento (Raza *et al.* 2021).

El cultivo intercalado de yuca, maní y maíz emerge como una opción eficiente entre los sistemas analizados. Este sistema se destaca por su equilibrio y eficiencia en los rendimientos relativos, lo que significa que cada cultivo contribuye significativamente al sistema, sin generar una competencia excesiva por los recursos disponibles (Zhang *et al.* 2022).

La combinación de yuca, maní y maíz presenta una sinergia única que maximiza la utilización del espacio y los recursos del suelo: la yuca, con su sistema radicular profundo y capacidad para mejorar la estructura del suelo, complementa las necesidades de nutrientes del maíz y el maní (Feng *et al.* 2021); el maní, con sus propiedades fijadoras de nitrógeno y su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo beneficia, tanto a la yuca como al maíz (Li *et al.* 2024) y el maíz, aporta al sistema su capacidad para aprovechar eficientemente la luz solar y su alto potencial de rendimiento (Tang *et al.* 2020).

Los resultados indicaron que el cultivo intercalado de yuca, maní y maíz y el maní intercalado con maíz presentaron los mayores valores obtenidos en los índices de crecimiento. Respecto al uso equivalente de la tierra, se encontró que estos sistemas, a excepción del maní con maíz, exhibieron la mayor eficiencia biológica y competitiva, en comparación con los monocultivos. Finalmente, los cultivos intercalados de yuca, maní y maíz son una opción viable y prometedora para agricultores, que buscan optimizar el uso de la tierra, para lograr una producción agrícola sostenible y productiva.

Los cultivos intercalados, como los de maíz, maní y yuca, han mostrado mejores índices de crecimiento que los monocultivos. La TCA es mayor en sistemas intercalados, debido a una mejor utilización de la luz y los nutrientes, como evidencian Barrera-Violeth *et al.* (2017). Además, la TRC y la TAN son superiores en cultivos intercalados, ya que optimizan el uso de nitrógeno y mejoran la fotosíntesis, como se observó en lo informado por Sánchez Olaya *et al.* (2023). Estos resultados indican que los sistemas intercalados favorecen un crecimiento más eficiente y sostenible.

Otros autores, como Nwokoro *et al.* (2022) y He *et al.* (2023), discuten ampliamente respecto a cómo la competencia por recursos en sistemas intercalados puede afectar, de manera variada, el rendimiento de cultivos específicos, destacando que, en algunos

sistemas, la competencia intensa puede resultar en una disminución significativa de la productividad. En contraste, los resultados de este estudio muestran que el sistema intercalado de yuca, maíz y maní presenta una alta eficiencia en el uso de recursos, pero no se explora en profundidad cómo esta eficiencia se compara cuantitativamente con los índices de otros estudios, que utilizan sistemas y combinaciones similares.

Agradecimientos. Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad de la Amazonia, que nos proporcionó los recursos físicos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de los autores:** Diana María Sánchez Olaya: conceptualización, metodología, análisis de datos, revisión, edición y supervisión; Daniela Fernanda Bautista Bohórquez y Karla Vanessa Cabrera Parra: escritura borrador original, metodología, revisión, edición y supervisión.

REFERENCIAS

- ABRELL, T.; NAUDIN, K.; BIANCHI, F.J.; ARAGÃO, D.V.; TITTONELL, P.; CORBEELS, M. 2022. Cassava root yield variability in shifting cultivation systems in the eastern Amazon region of Brazil. *Experimental Agriculture*. 58:e38. <https://doi.org/10.1017/s0014479722000333>
- ADJEI, E.O.; ESSEL, B.; BURI, M.M.; BINEY, N.; APPIAH, K. 2023. Soil quality and fertility dynamics under a continuous cassava-maize rotation in the semi-deciduous forest agro-ecological zone of Ghana. *Frontiers In Sustainable Food Systems*. 7:1095207. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1095207>
- ADU, M.O.; ASARE, P.A.; ASARE-BEDIAKO, E.; AMENORPE, G.; ACKAH, F.K.; AFUTU, E.; AMOAH, M.N.; YAWSON, D.O. 2018. Characterising shoot and root system trait variability and contribution to genotypic variability in juvenile cassava (*Manihot esculenta* Crantz) plants. *Heliyon* (Londres). 4(6):e00665. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00665>
- AGUILAR, E. 2017. Manual del cultivo de yuca. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San Jose, Costa Rica. 91p. Disponible desde Internet en: <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10918.pdf>
- ALBINO-GARDUÑO, R.; TURRENT-FERNÁNDEZ, A.; CORTÉS-FLORES, J.; LIVERA-MUÑOZ, M.; MENDOZA-CASTILLO, M. 2015. Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*. 49(5):513-531.
- ALDANA GARCÍA, J.; CORREA MUNERA, M.A.; ÁLVAREZ DÁVILA, E. 2021. Árboles de la estación de monitoreo de

- biodiversidad en el Centro de Investigaciones Macagual (Florenia-Caquetá). *Revista Brasileña de Investigación Animal y Ambiental (Brasil)*. 4(3):3575–3592. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n3-064>
- ALTIERI, M.A. 2010. Agroecología: principios y estrategias para diseñar sistemas agrícolas sostenibles. En: Sarandón, S. (ed.). *Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable*. Ed. Ediciones Científicas Americanas. Argentina. p.27-34.
- ARENAS SALAZAR, A.P.; FERREGRINO PÉREZ, A.A.; SCHOOR, M.; GUTIÉRREZ ANTONIO, C.G. 2024. Sistemas de policultivos con especies endémicas: estrategia sostenible para mejorar el aporte nutricional a la dieta regional. *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*. 140-169. <https://doi.org/10.61820/pct.vi.1083>
- ARIAS-COLLAGUAZO, W.M.; CASTRO-MORALES, L.G.; MALDONADO-GUDIÑO, C.W.; BURBANO-GARCÍA, L.H. 2021. Análisis del modelo de optimización aplicado a la producción agrícola en la Asociación del Gobierno Autónomo Parroquial de Cahuasqui. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores (México)*. 8(3):46. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i3.2670>
- BARRERA-VIOLETH, J.L.; CABRALES-HERRERA, E.M.; SÁENZ-NARVÁEZ, E.P. 2017. Respuesta del maíz híbrido 4028 a la aplicación de enmiendas orgánicas en un suelo de Córdoba-Colombia. *Orinoquia*. 21(2):38-45. <https://doi.org/10.22579/20112629.416>
- BIANUCCI, E.C.; FURLAN, A.L.; TORDABLE, M.D.; FABRA, A.I.; HERNÁNDEZ, L.; CARPENA RUIZ, R.; CASTRO, S. 2018. Impacto del cadmio sobre la acumulación y la producción de granos en cultivos de maní. En: Brutti, L.; Beltrán, M.; Salamone, I. (eds.). *Biorremediación de los recursos naturales*. Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. p.367-385.
- BITEW, Y.; DEREBE, B.; WORKU, A.; CHAKELIE, G. 2021. Response of maize and common bean to spatial and temporal differentiation in maize-common bean intercropping. *Plos One*. 16(10):e0257203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257203>
- BLANCO-VALDÉS, Y. 2019. Importancia de la calidad de la luz entre las plantas arvenses-cultivo. *Cultivos tropicales*. 40(4):e09.
- BOVER-FELICES, K.; SUÁREZ-HERNÁNDEZ, J. 2020. Contribución del enfoque de la agroecología en el funcionamiento y estructura de los agroecosistemas integrados. *Pastos y Forrajes*. 43(2):102-111.
- BRENDEL, O. 2021. The relationship between plant growth and water consumption: a history from the classical four elements to modern stable isotopes. *Annals of Forest Science*. 78:47 <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01063-2>
- BRESTIČ, M.; YANG, X.; LI, X.; ALLAKHVERDIEV, S.I. 2021. Crop photosynthesis for the twenty-first century. *Photosynthesis Research*. 150:1-3. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00869-5>
- CABRERA MARULANDA, M.Á.; ROBLEDO BURITICÁ, J.; SOTO GIRALDO, A. 2018. Actividad insecticida del caldo sulfocálcico sobre *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae). *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*. 22(2):24-32 <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.2.2>
- CANAVAR, Ö.; KAYNAK, M.A. 2008. Effect of different planting dates on yield and yield components of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32(6):521-528.
- CASTILLO, M.J.; MOREJÓN, M.; SUÁREZ, G.M.; ACUÑA, I.R. 2022. Crop diversification in a cocoa agroforestry system in the Jamal massif, Baracoa municipality. *Cuban Journal of Forest Sciences CFORES*. 10(3):364-379.
- CENÓZ, P.J.; BURGOS, A.M.; BALBI, C.N. 2010. La densidad de plantas como variable de rendimiento cultural y económico de cuatro cultivos consociados bajo las condiciones agroecológicas del nordeste de Argentina (NEA). *Revista Horticultura Argentina*. 29(69):18-25.
- COLINA, A.M.; NAVA, J.C.; GUZMÁN, Z.F.; PORTILLO, E.; STHORMES, J.M.; FARÍA, A. 2020. Evaluación del comportamiento de los cultivos de yuca, maíz y topocho bajo distintas asociaciones. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*. 37(2):112-128.
- CRAINE, J.M.; DYBZINSKI, R. 2013. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. *Functional Ecology*. 27(4):833-840. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12081>
- DE SANTIS, M.A.; CAMPANIELLO, D.; TOZZI, D.; GIUZIO, L.; CORBO, M.R.; BEVILACQUA, A.; SINIGAGLIA, M.; FLAGELLA, Z. 2023. Agronomic response to irrigation and biofertilizer of peanut (*Arachis hypogaea* L.) Grown under Mediterranean Environment. *Agronomy*. 13(6):1566. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061566>
- DELAQUIS, E.; DE HAAN, S.; WYCKHUYS, K.A. 2018. On-farm diversity offsets environmental pressures in tropical agro-ecosystems: A synthetic review for cassava-based systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 251:226-235. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.037>
- DELGADO, R.; ESCALANTE, A.S.; MORALES, E.J.; LÓPEZ, J.A.; ROCANDIO, M. 2015. Producción y rentabilidad

- del frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) asociado a maíz en función de la densidad y el nitrógeno en clima templado. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 47(2):15-25.
- DI BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 42(3):258-282.
- DONG, Q.; ZHAO, X.; ZHOU, D.; LIU, Z.; SHI, X.; YUAN, Y.; JIA, P.; LIU, Y.; SONG, P.; WANG, X.; JIANG, C.; LIU, X.; ZHANG, H.; ZHONG, C.; GUO, F.; WAN, S.; YU, H.; ZHANG, Z. 2022. Maize and peanut intercropping improves the nitrogen accumulation and yield per plant of maize by promoting the secretion of flavonoids and abundance of *Bradyrhizobium* in rhizosphere. *Frontiers in Plant Science*. 13:957336. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.957336>
- EL-MEHY, A.A.; SHEHATA, M.A.; MOHAMED, A.S.; SALEH, S.A.; SULIMAN, A.A. 2023. Relay intercropping of maize with common dry beans to rationalize nitrogen fertilizer. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 7:1052392. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1052392>
- FENG, C.; SUN, Z.; ZHANG, L.; FENG, L.; ZHENG, J.; BAI, W.; GU, C.; WANG, Q.; XU, Z.; VAN DER WERF, W. 2021. Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis. *Field Crops Research*. 270:108208. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108208>
- GARCÍA-RINCÓN, P.A.; NUÑEZ, J.M.; BAHAMÓN-MONJE, A.F. 2021. Características físicoquímicas y sensoriales de almendras fermentadas de cacao nacional (*Theobroma Cacao* L.) con adición de probióticos en el centro de investigaciones amazónicas, Cimaz Macagual (Caquetá, Colombia). *Ingeniería y Competitividad*. 23(2):e21210885. <https://doi.org/10.25100/iyv.23i2.10885>
- GÓMEZ BETANCUR, L.M.; MÁRQUEZ GIRÓN, S.M.; RESTREPO BETANCUR, L.F. 2018. La milpa como alternativa de conversión agroecológica de sistemas agrícolas convencionales de frijol (*Phaseolus vulgaris*), en el municipio El Carmen de Viboral, Colombia. *IDESIA*. 36(1):123-131. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292018000100123>
- GÓMEZ-CAMPEROS, J.; JARAMILLO, H.; GUERRERO-GÓMEZ, G. 2021. Digital image processing techniques for detection of pests and diseases incrops: a review. *Ingeniería y Competitividad*. 24(1):e30110973. <https://doi.org/10.25100/iyv.24i1.10973>
- GONZÁLEZ, H.; FUENTES, N. 2017. Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(1):17-31. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173401.60>
- GUAMÁN GUAMÁN, R.N.; DESIDERIO VERA, T.X.; VILLAVICENCIO ABRIL, Á.F.; ULLOA CORTÁZAR, S.M.; ROMERO SALGUERO, E.J. 2020. Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*. 7(2):47-56. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>
- HAN, F.; GUO, S.; NASEER, M.A.; GUO, R.; CAI, T.; ZHANG, P.; JIA, Z.; YANG, D.; CHEN, X.; REN, X. 2022. Potential use of maize-peanut intercropping to adapt to drought and nitrogen-shortage impacts. *Plant and Soil*. 499:255-274. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05526-x>
- HE, C.; ZHOU, B.; WANG, H.; WEI, Y.; HUANG, J. 2023. A first-year maize/cassava relay intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community in the symbiotic period. *Frontiers in Microbiology*. 14:1087202. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1087202>
- HOWELER, R.H. 2014. Sustainable soil and crop management of cassava in Asia: a reference manual. Ed. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Colombia. 280p.
- HUSS, C.P.; HOLMES, K.D.; BLUBAUGH, C.K. 2022. Benefits and risks of intercropping for crop resilience and pest management. *Journal of Economic Entomology*. 115(5):1350-1362. <https://doi.org/10.1093/jee/toac045>
- HUSSAIN, M.; UL-ALLAH, S.; FAROOQ, S. 2023. Integrated crop management in sustainable agriculture. *Agriculture*. 13(5):954. <https://doi.org/10.3390/agriculture13050954>
- KIROUANI, A.; BOUKHALFOUN, L.; OULDKIAR, R.; BOUZERZOUR, H. 2023. Analysis of the effect of GE interaction on the grain yield and its related traits in rain-fed Algerian durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) grown in contrasting environments. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 76(2):10297-10308. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v76n2.102517>
- LEÓN, S.T. 2010. Agroecología: desafíos de una ciencia ambiental en construcción. En: León, T.; Altieri, M. A. (eds.). *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones*. Ed. Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología. Universidad Nacional de Colombia. Colombia. p.53-77.
- LI, G.; GUO, X.; SUN, W.; HOU, L.; WANG, G.; TIAN, R.; WANG, X.; QU, C.; ZHAO, C. 2024. Nitrogen application in pod zone improves yield and quality of two peanut cultivars by modulating nitrogen accumulation and metabolism. *BMC Plant Biology*. 24(1):48. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04725-1>
- LI, L.; DUAN, R.; LI, R.; ZOU, Y.; LIU, J.; CHEN, F.; XING, G. 2022. Impacts of corn intercropping with soybean, peanut and millet through different planting patterns on population

- dynamics and community diversity of insects under fertilizer reduction. *Frontiers in Plant Science*. 13:936039. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.936039>
- LIU, Y.; YAN, Z.; WANG, J.; ZHAO, J.; LIU, Y.; ZOU, J.; LI, L.; ZHANG, J.; WAN, S. 2020. Optimizing initial nitrogen application rates to improve peanut (*Arachis hypogaea* L.) biological nitrogen fixation. *Agronomy*. 13(12):3020. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123020>
- LV, Z.; ZHOU, D.; SHI, X.; REN, J.; ZHANG, H.; ZHONG, C.; KANG, S.; ZHAO, X.; YU, H.; WANG, C.T. 2023. The determination of peanut (*Arachis hypogaea* L.) pod-sizes during the rapid-growth stage by phytohormones. *BMC Plant Biology*. 23(1):371. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04382-w>
- MARTIN, T.N.; FIPKE, G.M.; MINUSSI WINCK, J.E.; MARCHESI, J.A. 2020. ImageJ software as an alternative method for estimating leaf area in oats. *Acta Agronómica*. 69(3):162-169. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.69401>
- MARTÍNEZ DÍAZ, G. 2019. Efecto de la maleza como cobertera en la fertilidad del suelo y rendimiento de nogal pecanero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10(1):123-130. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1729>
- MBANJO, E.G.N.; RABBI, I.; FERGUSON, M.; KAYONDO, S.I.; ENG, N.H.; TRIPATHI, L.; KULAKOW, P.; EGESI, C. 2021. Technological innovations for improving cassava production in Sub-Saharan Africa. *Frontiers in Genetics*. 11:623736. <https://doi.org/10.3389/fgene.2020.623736>
- MONTERO, J. 2020. Importancia nutricional y económica del maní (*Arachis hypogaea* L.). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales (Bolivia)* 7(2):112-125.
- NEGASH, F.; MULUALEM, T. 2014. Enhanced land use system through cassava/maize intercropping in south region of Ethiopia. *Sky Journal of Agricultural Research*. 3(10):196-200.
- NICHOLLS, C.I.; ALTIERI, M.A. 2018. Caminos para la ampliación de la agroecología. *Boletín Científico 1. CELIA Ediciones*. Colombia. 34p.
- NORIEGA-NAVARRETE, J.L.; MORENO-SALAZAR, R.S.; LÓPEZ-CRUZ, I.L. 2021. Revisión: modelos de crecimiento y rendimiento de maíz en escenarios de cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 12(1):127-140. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2552>
- NWOKORO, C.C.; KREYE, C.; NECPALOVA, M.; OLUJIDE, A.; BARTHEL, M.; PYPERS, P.; HAUSER, S.; SIX, J. 2022. Cassava-maize intercropping systems in southern Nigeria: Radiation use efficiency, soil moisture dynamics, and yields of component crops. *Field Crops Research*. 283:108550. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108550>
- ONASANYA, O.O.; HAUSER, S.; NECPALOVA, M.; SALAKO, F.K.; KREYE, C.; TARIKU, M.; SIX, J.; PYPERS, P. 2021. On-farm assessment of cassava root yield response to tillage, plant density, weed control and fertilizer application in southwestern Nigeria. *Field Crops Research*. 262:108038. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108038>
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2021. Transformar los sistemas alimentarios y agrícolas: un reto que debemos afrontar juntos. Disponible desde Internet en: <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1254793/>
- PALACIOS, V.J.; MAVISOY, K.H. 2020. La agroforestería frente a la agenda 2030 para el desarrollo sostenible. Ed. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A. 73p.
- PEDELINI, R. 2008. Maní: guía práctica para su cultivo. *Boletín de Divulgación Técnica N°2*. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. 21p.
- PEREYRA, T.; OHANIAN, A.E.; SALUSSO, N. 2019. Eficiencia en el uso de radiación y agua, en alfalfa (*Medicago sativa* L.) intercalada con pasto de Sudán (*Sorghum sudanense*) y mijo perla (*Pennisetum americanum*). *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*. 27(1-4):13-19.
- RAMOS TORRES, D.I. 2021. Contribución de la educación superior a los Objetivos de Desarrollo Sostenible desde la docencia. *Revista Española de Educación Comparada*. 37:89-110. <http://dx.doi.org/10.5944/reec.37.2021.27763>
- RAZA, M.A.; GUL, H.; WANG, J.; YASIN, H.S.; QIN, R.; KHALID, M.H.B.; NAEEM, M.; YANG, L.; IQBAL, N.; GITARI, H.; AHMAD, S.; BATTAGLIA, M.; ANSAR, F.; YANG, F.; YANG, W. 2021. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. *Journal of Cleaner Production*. 308:127282. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127282>
- REYES-PALOMINO, S.E.; CANO CCOA, D.M. 2022. Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*. 24(1):53-64. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- RODRIGO-CANO, D.; PICÓ, M.J.; DIMURO, G. 2019. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la acción y la intervención social y ambiental. *Retos: Revista de Ciencias de la Administración y Economía*. 8(2):1-16. <https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.02>
- RUIZ, D.M.; MARTINEZ, J.P.; FIGUEROA, A. 2015. Agricultura sostenible en ecosistemas de alta montaña. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 13(1):129-138.

- RUIZ-GONZÁLEZ, R.O.; VICTORINO-RAMÍREZ, L. 2015. Respuesta del policultivo Jamaica-Frijol-Maíz a tratamientos de fertilización en Villa Flores, Chiapas, México. *Agrociencia*. 49(5):545-557.
- SADRAS, V.O.; VILLALOBOS, F.J.; FERERES, E. 2016. Crop development and growth. En: Villalobos, F.; Fereres, E. (eds). *Principles of agronomy for sustainable agriculture*. Ed. Springer. p.141-158. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_11
- SAMIDJO, G.; SARJIYAH. 2020. Effect of planting and harvesting time on cassava (*Manihot esculenta* Crantz) Var. Gambyong. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 458:012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/458/1/012036>
- SÁNCHEZ OLAYA, D.M.; ROMERO OSPINA, M.F.; SANDOVAL RODRÍGUEZ, W.; RIVERA RAMÍREZ, K.T.; SUAZA GARCÍA, E.L. 2023. Evaluation of the growth of maize in monoculture and when associated with peanuts and cassava in the Colombian. *Agronomía Colombiana*. 41(2):1-9. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v41n2.107281>
- SÁNCHEZ TORRES, J.D.; LIGARRETO MORENO, G.A.; LEIVA BARÓN, F.R. 2020. Variabilidad del crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz para choclo (*Zea mays* L.) como respuesta a diferencias en las propiedades químicas del suelo en la Sabana de Bogotá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 65(2):6579-6583.
- SANTOS, J.A.; NARVÁEZ, L.; SALCEDO, S.M.; ACEVEDO, A.N.; MERCADO, L.C.; SALCEDO, J.G. 2019. Fisiología del cultivo de yuca en el bosque seco tropical de Sucre-Colombia. *Temas Agrarios*. 24(1):17-26. <https://doi.org/10.21897/rta.v24i1.1774>
- SHAH, K.K.; MODI, B.; PANDEY, H.P.; SUBEDI, A.; ARYAL, G.; PANDEY, M.; SHRESTHA, J. 2021. Diversified crop rotation: An approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/8924087>
- SHIFERAW, B.; PRASANNA, B.M.; HELLIN, J.; BÄNZIGER, M. 2011. Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*. 3:307-327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- ŠIKULJAK, D.; MAROTTI, I.; BOSI, S.; ANĐELKOVIĆ, A.A.; BOŽIĆ, D.; VRBNICANIN, S.; TANVEER, A.; DINELLI, G. 2023. Effects of crop management systems on weed abundance and soil seed bank. *Journal of Crop Health*. 75:2355-2367. <https://doi.org/10.1007/s10343-023-00903-7>
- SOLANO, V. 2021. El maíz: semilla, cultivo, alimento, vida en las tradiciones indígenas mesoamericanas y chibchenses de Costa Rica. Ed. Centro de Investigaciones en Identidad y Cultura Latinoamericanas, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. 100p.
- SUÁREZ-LONDOÑO, A.S.; JIMÉNEZ-LÓPEZ, A.F.; CASTRO-FRANCO, M.; CRUZ-ROA, A.A. 2017. Clasificación y mapeo automático de coberturas del suelo en imágenes satelitales utilizando Redes Neuronales Convolucionales. *Orinoquia*. 21(1):64-75. <https://doi.org/10.22579/20112629.432>
- TAMAYO ORTIZ, C.V.; ALEGRE ORIHUELA, J.C. 2022. Asociación de cultivos, alternativa para el desarrollo de una agricultura sustentable. *Siembra*. 9(1):e3287. <https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3287>
- TANG, X.; ZHONG, R.; JIANG, J.; HE, L.; HUANG, Z.; SHI, G.; WU, H.; LIU, J.; XIONG, F.; ZHAO, H.; TANG, R.; HE, L. 2020. Cassava/peanut intercropping improves soil quality via rhizospheric microbes increased available nitrogen contents. *BMC Biotechnology*. 20:13. <https://doi.org/10.1186/s12896-020-00606-1>
- TAPIA-HERNÁNDEZ, A.; ALDASORO-MAYA, M.E.; RODRIGUEZ-ROBLES, U.; MARTÍNEZ-ZURIMENDI, P.; ROSSET, P. 2024. Milpa intercalada con árboles frutales: revisión y estudio de caso en el Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 21(2):168-185. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i2.1580>
- VARÓN DE AGUDELO, F.; RODRÍGUEZ, J.; VILLALOBOS, J.C.; PARODY, J. 2022. Manual de enfermedades y plagas del maíz. *Advanta*. 72p. Disponible desde Internet en: <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/fdb73c97-4dd3-41a2-8aee-1b6c9c724f30/content>
- VÉLEZ-VARGAS, L.D.; CLAVIJO-PORRAS, J.; LIGARRETO-MORENO, G.A. 2007. Análisis ecofisiológico del cultivo asociado maíz (*Zea mays* L.) -frijol voluble (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín (Colombia)*. 60(2):3965-3984.
- XIA, H.; WANG, L.; XUE, Y.; KONG, W.; XUE, Y.; YU, R.; XU, H.; WANG, X.; WANG, J.; LIU, Z.; GUO, X. 2019. Impact of increasing maize densities on agronomic performances and the community stability of productivity of maize/peanut intercropping systems. *Agronomy*. 9(3):150. <https://doi.org/10.3390/agronomy9030150>
- ZHANG, D.; SUN, Z.; LIU, F.; BAI, W.; YANG, N.; ZHANG, Z.; DU, G.; CHEN, F.; CAI, Q.; WANG, Q.; ZHANG, Y.; WANG, R.; ARSHAD, A.; HAO, X.; SUN, M.; GAO, Z.; ZHANG, L. 2020. Maize plant density affects yield,

- growth and source-sink relationship of crops in maize/peanut intercropping. *Field Crops Research*. 257:107926. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107926>
- ZHANG, L.; YUAN, J.; ZHANG, M.; ZHANG, Y.; WANG, L.; LI, J. 2022. Long term effects of crop rotation and fertilization on crop yield stability in southeast China. *Scientific Reports*. 12:14234. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17675-1>
- ZHANG, W.; SURIGAOGE, S.; YANG, H.; YU, R.; WU, J.; XING, Y.; CHEN, Y.; LI, L. 2024. Diversified cropping systems with complementary root growth strategies improve crop adaptation to and remediation of hostile soils. *Plant and Soil*. 502:7-30. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06464-y>