

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ AMARILLO (*Zea mays L.*, VARIEDAD GUANAPE EN UN SUELO DE BAJA FERTILIDAD DEL ESTADO GUARICO

Angel Valera^{1, 2}, Cándido Sumoza^{1, 2}, William Tovar^{1, 2}, Miguel Reyes¹

¹ Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales “Rómulo Gallegos”. Área de Ingeniería Agronómica, San Juan de los Morros, Estado Guárico, Venezuela. **e-mail:** angelvalera@unerg.edu.ve, **Orcid:** <https://orcid.org/0009-0007-1819-0315>

² Centro de Investigación y Extensión en Suelos y Aguas de la Universidad Rómulo Gallegos (CIESA). **e-mail:** sumagraz9@gmail.com, willtov@gmail.com, mreyes@unerg.edu.ve.

* Autor de correspondencia

Recibido: 24 /08 /2025; **Aceptado:** 30 /10 /2025; **Publicado:** 30 /12 /2025

RESUMEN

El maíz amarillo variedad Guanape es un recurso genético autóctono de Venezuela que representa una alternativa estratégica para la agricultura de pequeños productores en regiones con suelos de baja fertilidad. Este estudio evaluó la respuesta agronómica de la variedad de maíz amarillo Guanape con cuatro estrategias de fertilización y nanominerales foliares (Nanosil Protección) en suelos deficientes en nutrientes en terrenos de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales “Rómulo Gallegos”. Se implementó un diseño de bloques completos al azar con 20 parcelas de 5 m × 4 m cada una. Los tratamientos evaluados fueron: T1 (150 kg/ha de Urea granular), T2 (Nanofertilizante + 1/2 fórmula NPK 10-26-26 + Urea), T3 (350 kg/ha de fórmula NPK + Urea), y T4 (fórmula NPK + Urea + Nanofertilizante). Se midieron variables de crecimiento (altura de la planta, grosor del tallo, área foliar promedio, contenido de clorofila) cada 15 días, y en madurez se evaluaron componentes del rendimiento (número de hileras, granos por hilera, granos por mazorca) para estimar el rendimiento en kg/ha. Los resultados demostraron que la fertilización balanceada con NPK completa es fundamental para optimizar el

rendimiento, logrando 7.143-7.284 kg/ha, representando un incremento del 69% respecto al tratamiento con urea únicamente (4.309 kg/ha). El nanofertilizante mostró un efecto compensatorio significativo en condiciones de fertilización reducida (T2: 5.372 kg/ha), superando en 1.063 kg/ha la fertilización tradicional basada solo en nitrógeno. Sin embargo, en niveles de suficiencia nutricional (T3 y T4), el aporte incremental del nanofertilizante no resultó significativo para el rendimiento final, aunque se observaron tendencias positivas en estabilidad del área foliar y contenido de clorofila. El análisis de correlación reveló una dependencia crítica del rendimiento respecto al número de granos por mazorca ($r = 0.925$) validando la importancia del manejo nutricional durante la etapa de llenado de grano. La variedad Guanape demostró una resiliencia excepcional y capacidad de respuesta a la fertilización avanzada, consolidándose como material genético de alta relevancia para la seguridad agroalimentaria en suelos de baja fertilidad de Venezuela.

Palabras clave: Educación ambiental, desarrollo sostenible, interdisciplinariedad.

EVALUATION OF THE YIELD OF YELLOW CORN (*Zea mays L.*) VARIETY GUANAPE IN A LOW FERTILITY SOIL OF THE STATE OF GUARICO

ABSTRACT

The yellow corn variety Guanape is an

autochthonous genetic resource from Venezuela that represents a strategic alternative for smallholder agriculture in regions with low-fertility

soils. This study evaluated the agronomic response of the Guanape yellow corn variety using four fertilization strategies and foliar nanominerals (Nanosil Protection) in nutrient-deficient soils at the Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales "Rómulo Gallegos." A randomized complete block design was implemented with 20 plots of 5 m × 4 m each. The treatments evaluated were: T1 (150 kg/ha granular urea), T2 (nanofertilizer + ½ NPK 10-26-26 formula + urea), T3 (350 kg/ha NPK formula + urea), and T4 (NPK formula + urea + nanofertilizer). Growth variables (plant height, stem diameter, average leaf area, chlorophyll content) were measured every 15 days, and at maturity, yield components (number of rows, grains per row, grains per ear) were assessed to estimate yield in kg/ha. The results demonstrated that balanced complete NPK fertilization is essential for optimizing yield, achieving 7,143–7,284 kg/ha, representing a 69% increase over the urea-only treatment (4,309 kg/ha). The

INTRODUCCIÓN

La producción de cereales en Venezuela, particularmente del maíz (*Zea mays* L.), constituye el pilar fundamental de la seguridad alimentaria y nutricional de la población. En el contexto latinoamericano, Venezuela ha mantenido históricamente una importancia estratégica en la producción maicera, aunque su productividad ha enfrentado retos significativos derivados de la degradación de suelos y la disponibilidad de tecnologías apropiadas. De acuerdo con Calvani y Farias (2014), el VII Censo Agrícola 2007-2008 reveló la vulnerabilidad del aparato productivo agrícola nacional a factores limitantes de índole edáfica y tecnológica. El estado Guárico, ubicado en el corazón de los Llanos Centrales, representa una de las regiones agrícolas de mayor vocación del país, con participación relevante en las metas nacionales de producción agrícola. Sin embargo, la productividad en esta región se ve constantemente limitada por

nanofertilizer showed a significant compensatory effect under reduced fertilization conditions (T2: 5,372 kg/ha), surpassing traditional nitrogen-based fertilization by 1,063 kg/ha. However, under nutrient-sufficient levels (T3 and T4), the incremental contribution of nanofertilizer was not significant for final yield, although positive trends were observed in leaf area stability and chlorophyll content. Correlation analysis revealed a critical dependence of yield on grains per ear ($r = 0.925$), validating the importance of nutritional management during the grain-filling stage. The Guanape variety demonstrated exceptional resilience and responsiveness to advanced fertilization, establishing itself as highly relevant genetic material for food security in Venezuela's low-fertility soils

Keywords: *Zea mays*, native variety, crop nutrition, nanomineral, low fertility soils.

dos factores críticos: 1) la degradación progresiva de los suelos y la exigencia nutricional creciente de los cultivos, y 2) la dependencia de paquetes tecnológicos convencionales diseñados para condiciones de alta fertilidad, que resultan costosos e inadecuados para el pequeño productor venezolano. Esta situación ha generado un círculo vicioso de baja productividad, rentabilidad limitada y migración rural, fenómenos que afectan la soberanía alimentaria nacional.

La variedad de maíz amarillo Guanape MFE emerge como una respuesta innovadora a estos desafíos. Se trata de una variedad criolla originaria del oriente de Venezuela, específicamente de zonas de los estados Anzoátegui y Sucre, que fue desarrollada mediante procesos de mejoramiento participativo agroecológico. A diferencia de los híbridos comerciales modernos, la Guanape representa una síntesis entre el saber ancestral indígena y el rigor técnico del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), incorporando la experiencia acumulada

de comunidades campesinas e indígenas como Médanos, Florida y Escondida (MFE) (Omaña-Guevara et al., 2023).

Las características distintivas de la variedad Guanape son su rusticidad excepcional, su capacidad de adaptación a ambientes de estrés hídrico y nutricional, y su resistencia intrínseca a plagas endémicas como la "Punta Loca" y el tizón de hoja. Estudios previos reportan que, bajo condiciones de manejo óptimo, la Guanape logra rendimientos que sobrepasan los 7.000 kg/ha, con porte de planta elevado (260 cm) que la hace excelente tanto para producción de grano como para ensilaje. La importancia de variedades criollas autóctonas ha sido documentada internacionalmente; Buckler et al. (2017) reportaron que el maíz criollo va revelando sus secretos de adaptación, con capacidades genéticas notables para tolerar estrés ambiental sin comprometer la productividad. Sin embargo, la información cuantitativa disponible sobre su comportamiento en suelos de baja fertilidad bajo diferentes esquemas de fertilización es limitada, lo que representa una brecha de conocimiento crítica.

El escenario edáfico en algunas regiones como la Serranía del Interior, particularmente en sectores como San Juan de los Morros, se caracteriza por restricciones nutricionales severas que resultan limitantes para la expresión del potencial productivo de los cultivos. Es decir, muchas áreas reflejan una pobreza nutricional profunda debido al manejo de los suelos. Bajo estas condiciones, el cultivo de maíz requiere una dependencia casi total de fertilización externa inorgánica u orgánica, para cubrir sus

demandas de nitrógeno, que oscilan entre 20 y 25 kg de N por cada tonelada de grano producida. Además, la deficiencia estructural de fósforo y potasio, nutrientes críticos durante el establecimiento inicial y el llenado de grano respectivamente (Arias-Usandivaras et al., 2018), se combina con niveles críticos de microelementos como zinc, cobre, hierro y manganeso. La FAO (2006) ha documentado extensamente cómo los estreses abióticos que afectan al maíz (sequía, temperatura, salinidad) se exacerbán cuando la nutrición del cultivo es deficiente, reduciendo la tolerancia a tales estreses.

En la actualidad, un campo que cubre amplio espectro en la agricultura mundial es la Nanotecnología, la cual se define como la ciencia que, a partir de la manipulación controlada de nanopartículas, desarrolla estructuras, dispositivos y sistemas con propiedades o características nuevas o superiores, que son aplicadas a lo cotidiano en diversas áreas como energía y ambiente, medicina, ingeniería, y también en la agricultura. Arteaga (2025) señala que bajo el enfoque agrícola ha surgido una tecnología agrícola avanzada basada en el desarrollo de los fertilizantes nanoquematados, como uno de los enfoques prometedores para abordar el problema de la fertilización tradicional en cuanto a la eficiencia del uso de fertilizantes en la nutrición de los cultivos.

Los fertilizantes nanoquematados utilizan nanopartículas de nutrientes, encapsuladas por agentes quelantes orgánicos, para una absorción máxima y rápida por las plantas, mejorando la eficiencia, el rendimiento y la resistencia de los cultivos,

incluso en suelos difíciles, al reducir pérdidas y contaminación. Según Carreño y Anzola (2024), estos fertilizantes emplean nanotecnología para mejorar la disponibilidad y la absorción de nutrientes por parte de las plantas, lo que potencialmente puede aumentar la eficacia de la fertilización y optimizar el uso de recursos. Los fertilizantes nanoquelatados son completamente amigables con el medio ambiente y pueden convertir las formas menos solubles de los elementos, en formas accesibles y beneficiosas para las plantas.

En Venezuela, la empresa WP Agropecuaria, C.A en conjunto con investigadores de la Universidad Central de Venezuela (UCV), han desarrollado mediante la nanotecnología, los productos Nanosil Nutrición conteniendo micro y macro nutrientes para la fertilización foliar de los cultivos, de la misma forma se ha desarrollado el producto Nanosil Protección, con nanopartículas minerales de tamaño promedio a los 10 nm, que actúan como biocidas de amplio espectro, por lo que también protegen a diferentes cultivos, incluyendo cereales, leguminosas, oleaginosas, hortalizas, cítricos, musáceas, tubérculos, caña de azúcar, cebolla, y raíces (yuca) (Nanoscienzia Agrícola, 2021; Ferrer *et al.*, 2024).

Con base en el esquema planteado en párrafos anteriores, se estableció como objetivo principal de este trabajo de investigación, evaluar la eficacia de cuatro estrategias de fertilización incluyendo nanominerales foliares sobre el rendimiento, variables de crecimiento

vegetativo e índices fisiológicos del maíz amarillo variedad Guanape en suelo de baja fertilidad. En tal sentido, se desarrollaron los siguientes objetivos específicos: i) caracterizar la respuesta agronómica de la variedad Guanape a diferentes niveles de fertilización macro-nutricional; ii) Cuantificar el efecto de un nanofertilizante sobre variables de crecimiento, contenido de clorofila y rendimiento bajo diferentes escenarios nutricionales; iii) determinar correlaciones entre variables de crecimiento vegetativo, índices fisiológicos y componentes del rendimiento para establecer indicadores de diagnóstico rápido; y iv) proporcionar recomendaciones tecnológicas basadas en evidencia para optimizar la producción de maíz Guanape en agroecosistemas con suelos de baja fertilidad química.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y Caracterización del Área de Estudio

La zona de estudio está ubicada en las inmediaciones de la serranía del interior y cuenta con un relieve muy accidentado debido a la erosión, con dominancia de relieves montañosos sobre los valles aluviales influenciados por materiales meta volcánicos derivados de la Formación geológica Las Hermanas, específicamente en el sector El Castrero. Este sector se ubica en la parte baja de la subcuenca del río San Juan en un piso altitudinal de 455 msnm, con pendiente media que varía entre 3 y 10 %., correspondiente a la zona de vida de Bosque Seco Tropical, con temperaturas medias anuales entre 24 y 26 °C, una precipitación anual que varía entre los 1000 y los 1400 mm, con un promedio

anual de 1465 mm/año, y una evapotranspiración promedio anual de 1.302,4 mm (MARNR, 1998; Spósito y Elizalde, 2004; Rodríguez et al., 2004). En la zona existe una dominancia de una vegetación herbácea con abundancia de pasto yaraguá (*Hyparrhenia rufa*) asociada con chaparro (*Curatella americana*) (Valera et al., 2024).

El trabajo experimental se llevó a cabo en una parcela de investigación con una

superficie de 400 m² (0.20 ha), ubicada en los terrenos del Jardín Botánico de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Centrales "Rómulo Gallegos" (UNERG), Sector El Castrero, municipio autónomo Juan Germán Roscio, San Juan de los Morros, Estado Guárico, Venezuela (Coordenadas: 9°43' N, 67°22' W) (Figura 1).

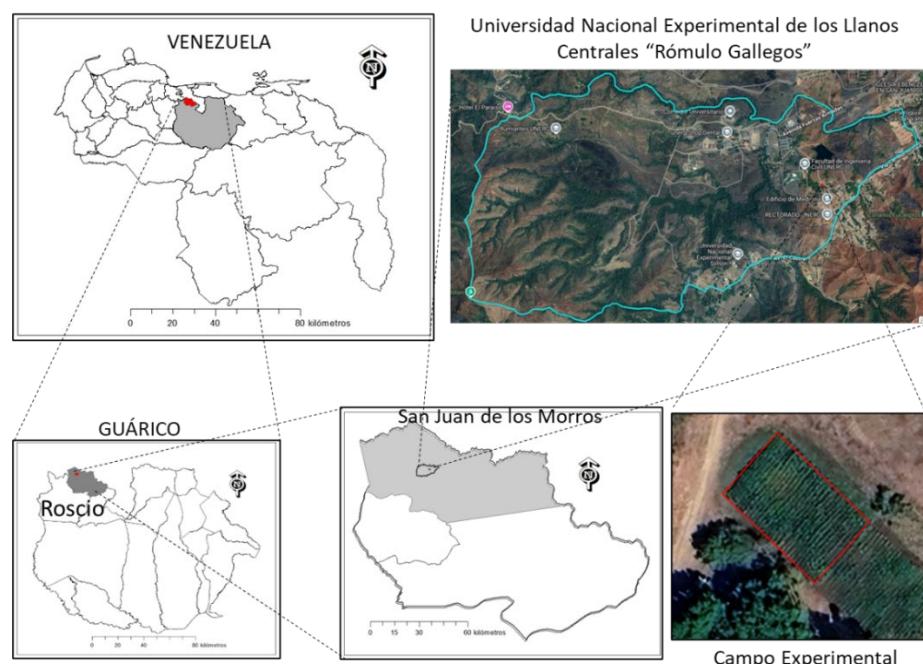


Figura 1. Ubicación relativa del área experimental en terrenos de la Universidad Rómulo Gallegos.

Fertilidad del suelo

La zona experimental fue muestreada en su totalidad a una profundidad de 20 cm, obteniéndose una muestra compuesta por 15 submuestras (muestras simples), cuyo análisis de suelo con fines de fertilidad indicaron que la clase textural del suelo es Franca, con una reacción ligeramente acida (pH 6,5), y sin problemas de salinidad, de acuerdo con los valores de conductividad eléctrica. Los niveles de P y K disponibles son

bajos, y el contenido de materia orgánica del suelo también es bajo (< 1,5%), los niveles son bajos por lo que también se infieren valores bajos de nitrógeno en los suelos y un mínimo aporte de N al cultivo. La disponibilidad de Calcio y Magnesio son altos, con una relación calcio magnesio estrecha cercana a dos unidades. Los valores de microelementos disponibles (Zn^{+2} , Cu^{+2} , Fe^{+2}) presentan niveles bajos a muy bajos, a excepción del manganeso (Mn^{+2}), cuyos contenidos

son elevados. Esta caracterización coincide con los patrones descritos por ICL *Growing Solutions* (2025) sobre el impacto crítico de los micronutrientes en el cultivo de maíz, especialmente bajo condiciones de suelos degradados.

Material vegetal

La semilla empleada en la investigación corresponde al cultivar Guanape, la cual es una variedad de maíz autóctono de Venezuela, específicamente del oriente del país. Por ser una variedad de maíz originaria, posee una genética más resistente a las plagas que las semillas importadas, requiriendo menos pesticidas y agrotóxicos, de igual modo posee una concentración más alta de proteínas, garantizando materia prima que genera menos impacto ecológico, con menos gastos y un producto final de más alta calidad a un precio justo. Las variedades criollas como la Guanape, tal como señala Milpa Viva (2025), demuestran

resiliencia excepcional al cambio climático y representan un aliado natural para la producción sostenible. Las semillas fueron proporcionadas por Semillas Híbridas de Venezuela, C.A. (Sehiveca).

Establecimiento de parcelas y variables evaluadas

El terreno de 400 m² fue dividido en 20 parcelas de 5m x 4m cada una. En cada parcela se realizaron cinco muestreo de suelos con fines de fertilidad, para un total de 100 muestras puntuales (N=100). Para la evaluación de variables del cultivo se seleccionaron tres (3) hileras por parcela, y en cada hilera se tomaron en cuenta tres (3) plantas, para un total de 180 plantas en las 20 parcelas establecidas (Figura 2). Las coordenadas de cada punto se registraron con un dispositivo GPS de alta precisión para cada uno de los sitios muestreados y las plantas evaluadas.

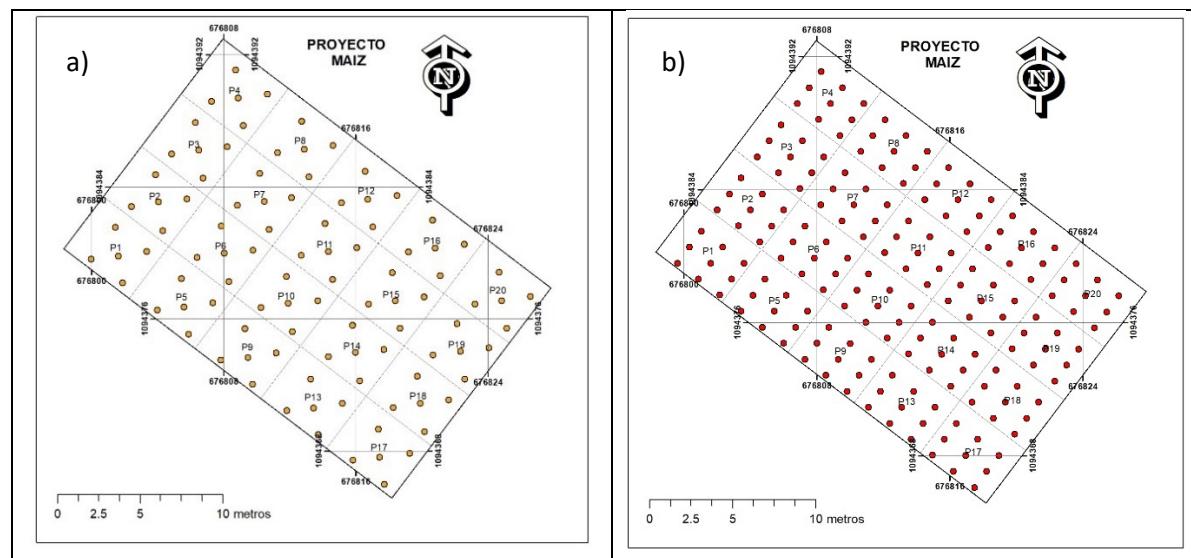


Figura 2. Distribución de los puntos de muestreo de suelos (a) y los sitios de muestreo del cultivo (b).

Manejo agronómico del cultivo

Se estableció el cultivo de forma manual en un terreno previamente preparado mecánicamente con el uso de una rastre de discos por dos ocasiones en direcciones contrarias, bajo un distanciamiento de siembra de 0,8 (entre hileras) y 0,20 m (entre plantas) con una densidad de 62.500 plantas por hectárea, representando las distancias de una siembra mecanizada. La siembra se realizó el 18 de diciembre de 2024 y la cosecha se hizo el 17 de abril de 2025, a los 120 días después de la siembra.

Es importante destacar que el terreno ha estado bajo cultivo de maíz durante tres ciclos continuos. El manejo agronómico del cultivo se mantuvo uniforme en todas las parcelas experimentales, buscando mantener una práctica de manejo convencional con base en control de plagas, malezas y enfermedades, además de mantener la frecuencia de riego por aspersión durante el ciclo vegetativo del cultivo. El plan de abonamiento principal consistió en una dosis básica de 150 N - 90 P₂O₅ - 90 K₂O compensado de la siguiente manera: a) una fertilización de base a los ocho días después de la siembra (8 DDS): Aplicación de 350 kg/ha de la fórmula completa NPK 10-26-26, la cual es altamente concentrada en P₂O₅ y K₂O, respondiendo a la necesidad de estos nutrientes en suelos fijadores de fósforo de la zona, más 100 kg/ha de urea granular; y b) reabono nitrogenado a los treinta días después de la siembra (30 DDS), mediante la aplicación de 150 kg/ha de Urea (46% N) para satisfacer la

alta demanda de nitrógeno del maíz durante su fase vegetativa crítica.

Diseño experimental

Para la evaluación del rendimiento del maíz variedad Guanape se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA) constituido por cuatro tratamientos y cinco repeticiones para un total de 20 parcelas experimentales. En cada parcela de 5m x 4m se establecieron 6 hileras, y las mediciones se realizaron cada 15 días tomando en cuenta tres (03) plantas por tres hileras por parcela, para una población de 180 plantas muestreadas en las 20 parcelas experimentales. El número de las muestras analizadas en todo el estudio fueron 160 plantas, lo que corresponde al 7,5% del total de plantas establecidas en las parcelas. Con base en los requerimientos del suelo (baja disponibilidad de fósforo, potasio y microelementos) y las necesidades del cultivo (150 kg/ha N - 90 kg/ha P₂O₅ - 90 kg/ha K₂O) se formularon los siguientes tratamientos:

-Tratamiento 1: 150 kg/ha de urea granular
(Reabonamiento)

-Tratamiento 2: [175 kg/ha de la fórmula 10-26-26 + 50 kg/ha de urea] + 1 litro/ha Nanosil Protección + 150 kg/ha de Urea granular (reabono).

-Tratamiento 3: [350 kg/ha de la fórmula 10-26-26 + 100 kg/ha de urea] + 150 kg/ha de urea granular (reabono).

-Tratamiento 4: [350 kg/ha de la fórmula 10-26-26 + 100 kg/ha de urea] + 1 litro/ha Nanosil Protección + 150 kg/ha de urea granular (reabono).

El nanomineral foliar (Nanosil Protección) se utilizó a razón de 1 litro/ha como abono complementario, el cual se caracteriza por poseer diversos nutrientes tales como: NPK (50 g/l), Cu²⁺ (6,0 g/l), S²⁺ (3,0 g/l), Zn²⁺ (1,8 g/l), Ag⁺ (1,0 g/l), Mn²⁺ (0,5 g/l), y Si⁴⁺ (4,4 g/l) (WP Agropecuaria). Las aplicaciones de Nanosil se realizaron cada 15 días a las parcelas con tratamientos correspondientes (T2 y T4) completando tres (3) aplicaciones por ciclo del cultivo. La primera aplicación del producto se realizó a los 30 DDE (días después de la emergencia).

Medición de variables agronómicas

Se evaluaron cinco variables clave del cultivo en la etapa de madurez o llenado de grano: i) Altura de la planta (cm); ii) Grosor del tallo (mm); iii) Área foliar promedio (cm²); iv) Porcentaje de Clorofila (% Clorofila o unidades SPAD - *Soil and Plant Analysis Development*), utilizado como un indicador rápido y no destructivo del estado nutricional de nitrógeno (N) en la planta; y v) Rendimiento del cultivo (kg/ha). Las mediciones se realizaron cada 15 días en una secuencia temporal de 25, 39, 53, y 67 DDE.

Para la estimación del rendimiento del cultivo se realizó un muestreo de nueve (09) plantas por parcela y se determinó en cada mazorca cosechada: i) el número de hileras, ii) el número de granos por hilera, y iii) el número de granos por

mazorca. Posteriormente se obtuvo el peso de 1000 granos de maíz en cada parcela con un contenido de humedad de los granos de 14%, y se realizaron los cálculos para cada parcela y para toda la superficie evaluada.

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron evaluados mediante el software para análisis estadístico Minitab v.20®. Inicialmente se realizó un análisis de correlación de Pearson para evaluar la correlación entre variables del cultivo. La verificación de la normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas se realizó mediante las pruebas de Ryan-Joyner (similar a Shapiro-Wilk) ($p \geq 0,05$). Para identificar diferencias entre tratamientos se aplicó un análisis de varianza (ANOVA), y posteriormente se realizó una prueba de comparación múltiple de Tukey en los casos donde se evidenció alguna diferencia estadística significativa ($p < 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estadísticos descriptivos de variables del cultivo

El análisis descriptivo de las variables evaluadas (Cuadro 1) evidencia una distribución relativamente simétrica y homogénea, con coeficientes de variación que oscilan entre 12,8% (número de hileras) y 36,2% (altura de planta y rendimiento), reflejando una variabilidad moderada, la cual es característica de ensayos de campo.

La altura promedio de plantas fue de $153,0 \pm 36,2$ cm, con rango entre 50 y 265 cm, indicativo de heterogeneidad en la

expresión del genotipo bajo las diferentes condiciones nutricionales. El grosor del tallo promedio ($16,6 \pm 2,9$ mm) mostró menor variabilidad, sugiriendo que esta variable es más conservadora en su respuesta a estrés nutricional.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de variables del cultivo.

Variable	Min	Max	\bar{x}	Md	K	As	S	S^2	CV (%)
Altura planta (cm)	50	265	153,0	155,5	0,078	-0,056	36,2	1310,5	23,7
Grosor tallo (mm)	7,4	26,1	16,6	16,45	0,184	0,047	2,9	8,5	17,6
Área foliar (cm ²)	205,5	811,7	490,2	488,9	-0,499	0,152	124,8	15576,5	25,5
Clorofila (%) ³	28,5	59,5	43,8	43,5	-0,717	0,050	6,4	40,7	14,6
Clorofila (%) ⁴	24,2	59,8	43,0	43,6	0,315	-0,342	6,2	38,4	14,4
Num. Hilera	8	18	12,9	12	0,374	-0,057	1,6	2,7	12,8
Granos/Hilera	10	47	26,8	27	-0,265	-0,017	7,1	49,8	26,3
Granos/Mazorca	88	658	347,5	351	-0,154	0,109	105,6	11158	30,4
Rendim. (kg/ha)	1368	12094	6027,1	5873	-0,315	0,204	2183	4765935	36,2

N=180; ³: 39 días después de la emergencia (DDE); ⁴: 53 DDE; \bar{x} : media, Md: mediana, K: curtosis, As: Asimetría, S: desviación estándar, S^2 : varianza, CV: coeficiente de variación.

El área foliar promedio acumulada fue de $490,2 \pm 124,8$ cm², con contenido de clorofila en rango normal ($43,8 \pm 6,4\%$ SPAD a 39 DDE y $43,0 \pm 6,2\%$ SPAD a 53 DDE). El rendimiento promedio fue de 6.027 ± 2.183 kg/ha, con rango amplio entre 1.368 kg/ha (parcelas bajo estrés nutricional severo) y 12.094 kg/ha (parcelas bajo fertilización completa), reflejando diferencias sustanciales en respuesta a tratamientos.

Correlaciones entre variables del cultivo y rendimiento

La matriz de correlación (Cuadro 2) revela patrones de asociación entre variables consistentes con la fisiología del cultivo. El número de granos por mazorca mostró correlación excepcional con el rendimiento ($r = 0,925$, $p < 0,001$), la más fuerte de todas las variables evaluadas. Esta relación extremadamente sólida valida que el número de

granos por mazorca es el componente del rendimiento más crítico en el sistema observado. El número de granos por hilera también exhibió correlación fuerte con rendimiento ($r = 0,844$), confirmando que ambas dimensiones de la estructura de mazorca son determinantes. El número de hileras presentó correlación más modesta ($r = 0,505$), sugiriendo que esta variable, aunque determinada genéticamente en la variedad Guanape, tiene menor plasticidad en respuesta a nutrición. El área foliar mostró correlación positiva con rendimiento ($r = 0,606$), coherente con la función fotosintética de las hojas en la acumulación de biomasa. El contenido de clorofila a 39 DDE ($r = 0,524$) y 53 DDE ($r = 0,465$) presentó correlaciones significativas, pero de magnitud moderada, indicando que, aunque el estado nitrogenado es importante, no es el factor determinante único.

Cuadro 2. Correlaciones entre variables agronómicas y el rendimiento del cultivo de maíz.

Variable	Altura (cm)	Grosor del Tallo (mm)	Área Foliar (cm ²)	Clorofila/3	Clorofila/4	Número de Hileras	Granos/Hilera	Granos/Mazorca	Rend. (kg/ha)
Altura (cm)	1								
Grosor Tallo (mm)	0,399	1							
Área Foliar (cm ²)	0,497	0,631	1						
Clorofila/3	0,506	0,499	0,608	1					
Clorofila/4	0,463	0,375	0,494	0,540	1				
Número de Hileras	0,211	0,112	0,218	0,283	0,154	1			
Granos/Hilera	0,351	0,347	0,480	0,303	0,400	0,163	1		
Granos/Mazorca	0,372	0,334	0,501	0,370	0,386	0,544	0,909	1	
Rend. (kg/ha)	0,508	0,405	0,606	0,524	0,465	0,505	0,844	0,925	1

N=180; ³: 39 días después de la emergencia (DDE); ⁴: 53 DDE;

La altura de planta ($r = 0,508$) mostró correlación moderada con rendimiento, mientras que el grosor del tallo ($r = 0,405$) presentó correlación menor. Estos resultados sugieren que en la variedad Guanape, la arquitectura del dosel foliar (tamaño y posición de hojas) es más relevante que el porte absoluto, patrón consistente con lo reportado por Rossini *et al.* (2012) sobre tolerancia a la densidad en maíz y bases fisiológicas de la variabilidad genotípica.

Pruebas de normalidad

Cuadro 3. Correlaciones entre variables agronómicas y el rendimiento del cultivo de maíz.

Variable	Media	S	RJ	Valor p
Altura (cm)	153,0	36,20	0,997	> 0,100
Grosor Tallo (mm)	16,56	2,917	0,995	> 0,100
Área Foliar (cm ²)	490,2	124,8	0,996	> 0,100
Clorofila/3	43,03	6,383	0,996	> 0,100
Clorofila/4	42,96	6,198	0,997	> 0,100
Número de Hileras	12,89	16,44	1,000	> 0,100
Granos/Hilera	26,82	7,058	0,998	> 0,100
Granos/Mazorca	347,5	105,6	0,998	> 0,100
Rend. (kg/ha)	6027	2183	0,996	> 0,100

N=180; ³: 39 DDE; ⁴: 53 DDE. S: desviación estándar; RJ: Ryan-Joyner (prueba).

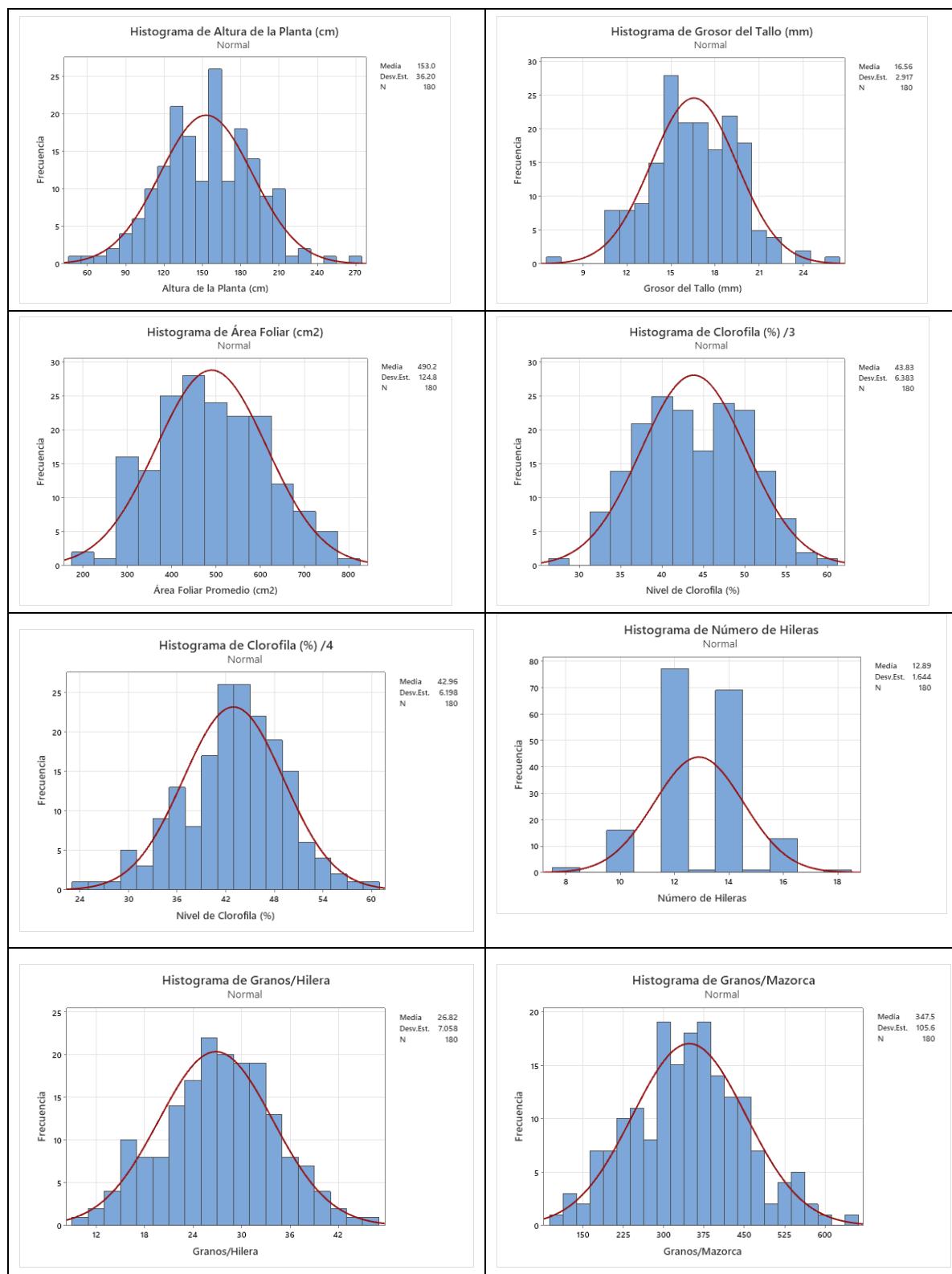


Figura 3. Distribución de datos de variables vegetativas y reproductivas del cultivo de maíz.

Comportamiento de variables agronómicas del cultivo

La tendencia de las variables medidas cada 15 días durante el ciclo vegetativo del cultivo mostraron ciertas variaciones

a partir de los 25 días (DDE), tal como se visualiza en la figura 3, a excepción del nivel de clorofila de las plantas, cuya expresión se hizo evidente a partir de la segunda semana de la emergencia.

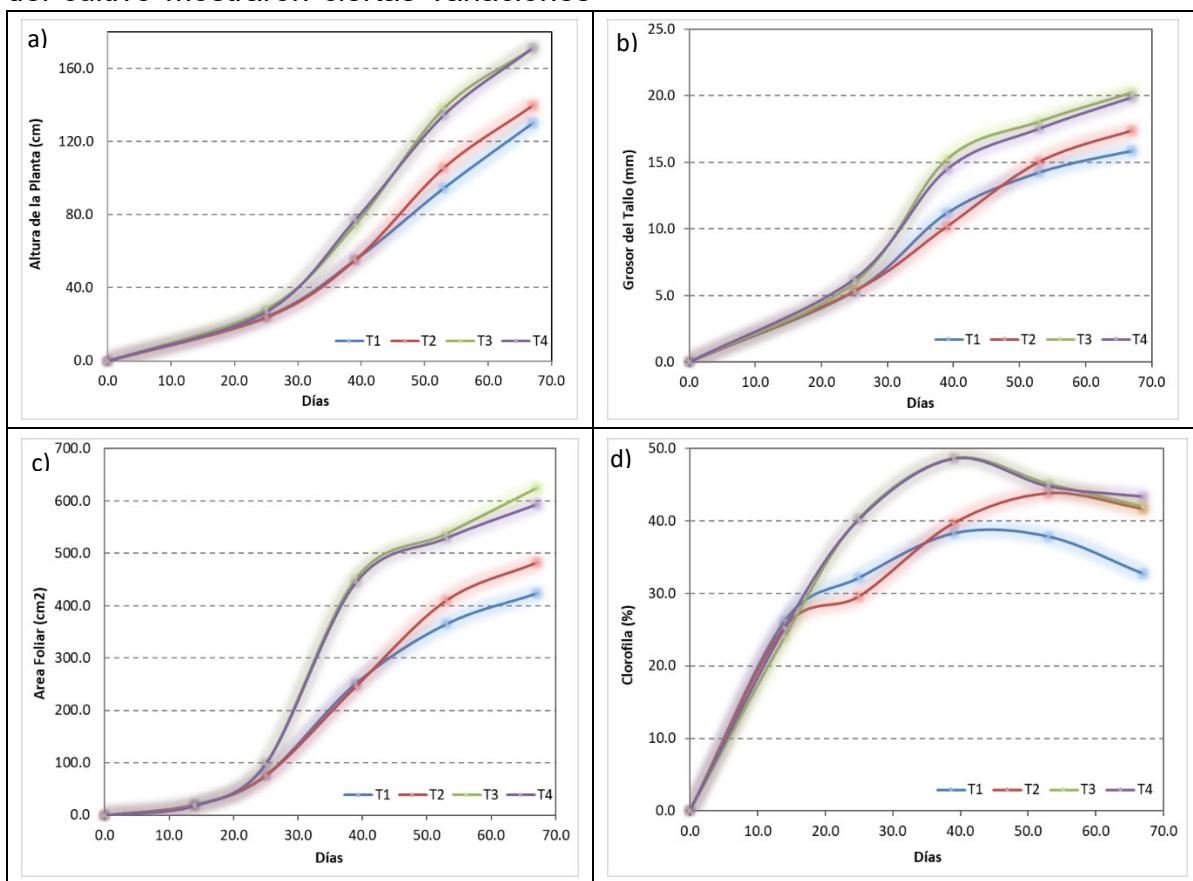


Figura 3. Variación de: a) altura de las plantas, b) grosor del tallo de la planta, c) área foliar promedio, y d) nivel de clorofila foliar.

Análisis de varianza y comparaciones múltiples entre tratamientos

Análisis de variables de crecimiento del cultivo de maíz

El análisis de varianza indicó diferencias altamente significativas en todas las variables de crecimiento ($p < 0,05$) (Cuadro 4; Figura 4). En cuanto a la altura de planta, las comparaciones de medias de T1 (129,96 cm, grupo B) y T2 (140,11 cm, grupo B) fueron significativamente menores que T3 (171,04 cm, grupo A) y T4 (170,98 cm, grupo A), sin diferencia

entre estos dos últimos. Este patrón sugiere que la dosis completa de NPK es suficiente para expresar el porte genético, sin beneficio adicional del nanofertilizante en esta variable. La variable grosor del tallo presenta un patrón similar a la altura de la planta altura, donde T1 (14,67 mm) y T2 (15,76 mm) fueron menores que T3 (18,30 mm) y T4 (17,51 mm), no es significativamente diferente de T3). El incremento en T2 respecto a T1 (7,4%) sugiere un efecto compensatorio del nanofertilizante bajo fertilización reducida.

Cuadro 4. Resultado de las pruebas simultáneas para diferencias de las medias de variables de crecimiento del cultivo maíz Guanape.

Variable	Tratamiento					Valor p			
	T1 (Media)	T2 (Media)	T3 (Media)	T4 (Media)					
Altura de la planta (cm)	129,96	B	140,11	B	171,04	A	170,98	A	< 0,05
Grosor del tallo (mm)	14,67	B	15,76	B	18,30	A	17,51	A	< 0,05
Área foliar promedio (cm ²)	403	B	441	B	554	A	563	A	< 0,05
Nivel de Clorofila / ³ (%)	38,3	B	39,8	B	48,7	A	48,6	A	< 0,05
Nivel de Clorofila / ⁴ (%)	37,9	B	44,1	A	44,8	A	45,2	A	< 0,05

Método de Tukey - confianza de 95%. N=180; /³: 39 días después de la emergencia (DDE); /⁴: 53 DDE

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

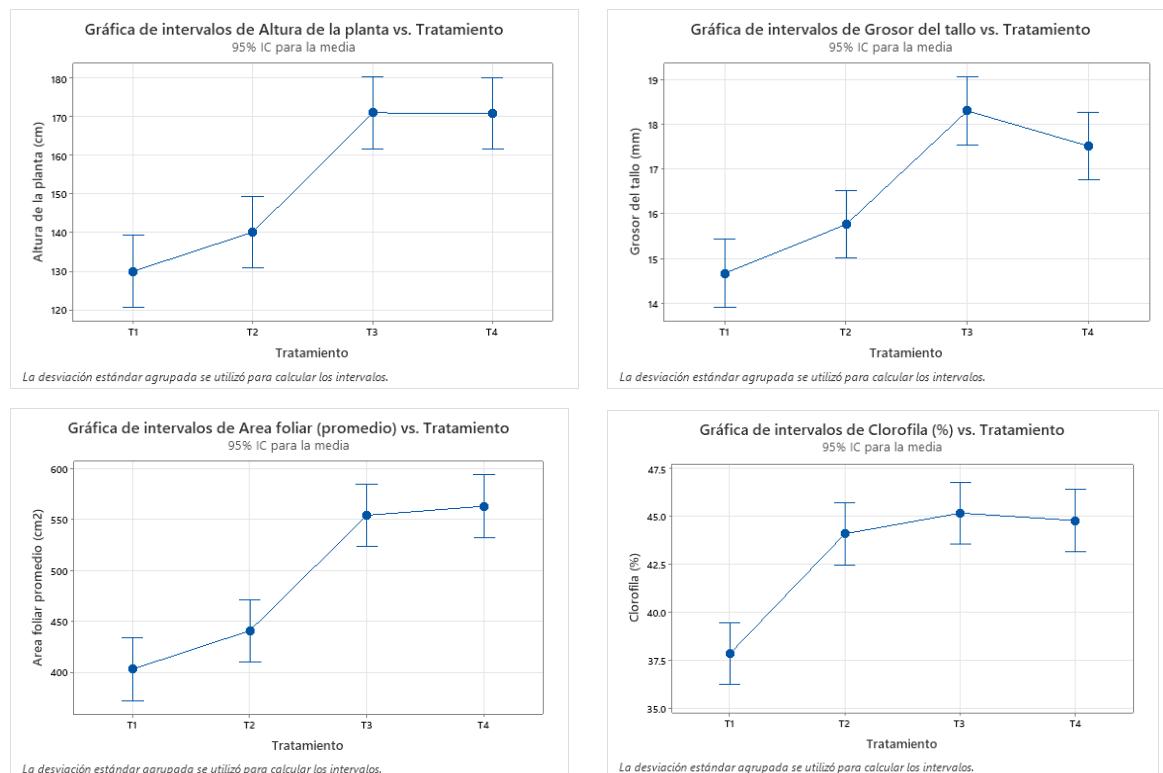


Figura 4. Valores promedios e intervalos de las variables a) altura de la planta, b) grosor del tallo, c) área foliar, y d) nivel de clorofila (53 DDE).

El área foliar promedio indicó que T1 (403 cm²) y T2 (441 cm²) fueron significativamente menores que T3 (554 cm²) y T4 (563 cm²). Interesantemente, T4 mostró

área foliar ligeramente superior a T3 (1,6% mayor), sugiriendo estabilidad o ligera mejora del nanofertilizante en mantenimiento del dosel foliar. Con

respecto al contenido de clorofila, los 39 DDE, T1 (38,3%) y T2 (39,8%) fueron menores que T3 (48,7%) y T4 (48,6%), pero a los 53 DDE, el patrón cambió debido a que T1 (37,9%) fue menor que T2 (44,1%), T3 (44,8%) y T4 (45,2%), sin diferencia significativa entre estos tres últimos. Este cambio parece indicar que, en estadios tardíos, tanto la fertilización media (T2) como la completa (T3-T4) permiten mantener niveles adecuados de clorofila.

El contenido de clorofila medido por SPAD mostró un patrón interesante de cambio temporal. A los 39 DDE, los tratamientos con NPK completo (T3-T4) presentaron ~48,7% SPAD, mientras que T1-T2 presentaron ~39% SPAD, diferencia de 9,7 puntos. A los 53 DDE, esta brecha se redujo: T3-T4 fueron ~44,8-45,2% SPAD, mientras que T2 fue 44,1% SPAD, diferencia de apenas 0,7 puntos. T1 mostró deterioro más pronunciado (37,9% SPAD), sugiriendo limitación nutricional crónica.

Este patrón refleja la interacción entre disponibilidad de nitrógeno y dinámica fenológica del cultivo. En estadios tempranos (39 DDE), la deficiencia de nitrógeno en T1-T2 se manifiesta claramente en menor síntesis de clorofila.

Cuadro 5. Análisis de varianza del rendimiento del cultivo vs. tratamientos de fertilización

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Tratamiento	3	279314927	93104976	28,56	0,000
Error	176	573787458	3260156		
Total	179	853102385			

GL: grados de libertad, SC: Suma de cuadrados

En estadios más tardíos (53 DDE, cercano a antesis), el reabono de urea aplicado a 30 DDS permite que incluso T2 alcance niveles de clorofila comparables a T3-T4, aunque T1 mantiene deficiencia crónica.

Rozas *et al.* (1998) reportaron que el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) de 0,97-0,98 permite alcanzar 95% del rendimiento máximo. En este caso, considerando que T3-T4 representan condiciones de suficiencia nutricional, el ISN crítico sería aproximadamente 0,97-0,98 de 45% SPAD, equivalente a ~43,7% SPAD. T2 a 53 DDE (44,1% SPAD) se acercó a este umbral, mientras que T1 (37,9% SPAD) quedó muy por debajo, reflejando su menor rendimiento.

Análisis del rendimiento del cultivo de maíz Guanape

Con relación a los resultados del efecto de los tratamientos sobre el rendimiento del cultivo, el ANAVAR arrojó la existencia de diferencias entre los tratamientos aplicados en las parcelas experimentales, tan cómo se señala en el Cuadro 5. De manera similar, el resultado de los valores promedio para cada tratamiento se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resultado de las medias de los diferentes tratamientos.

Tratamiento	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
T1	45	4.309	1.813	(3777, 4840)
T2	45	5.372	1.561	(4841, 5904)
T3	45	7.143	2.158	(6612, 7674)
T4	45	7.284	1.631	(6753, 7815)

La prueba de comparación de medias del rendimiento por efecto de los tratamientos utilizados se indica en el Cuadro 7, donde se aprecian las

variaciones del testigo con 4.309 kg/ha hasta 7.284 kg/ha del tratamiento de la formula NPK más Nanosil protección.

Cuadro 7. Comparaciones en parejas de Tukey

Tratamiento	N	Media	Agrupación
T4	45	7.284	A
T3	45	7.143	A
T2	45	5.372	B
T1	45	4.309	C

Agrupación de información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

La prueba de medias indicó que los tratamientos T4 y T3 pertenecen al grupo 'A', lo cual significa que sus rendimientos promedio (7.283,90 kg/ha y 7.143,07 kg/ha, respectivamente) son los más altos y no son significativamente diferentes entre sí, ya que T4 incluye el Nanosil y la dosis alta de fertilizantes, y T3 es la misma dosis alta sin Nanosil. La falta de diferencia entre ellos sugiere que el Nanosil no aportó un beneficio adicional significativo a la dosis alta de fertilizante. Por otra parte, el tratamiento T2 (5.372,37 kg/ha) pertenece al grupo 'B', siendo significativamente inferior a T4 y T3, pero significativamente superior a T1. El tratamiento T1 (4.308,82 kg/ha) pertenece al grupo 'C', lo que indica que es el tratamiento con el menor

rendimiento y es significativamente diferente de todos los demás (Figura 5).

Las pruebas simultaneas para la evaluación de las diferencias de medias del rendimiento entre los tratamientos aplicados se resumen en el Cuadro 8. Este aspecto permitió destacar lo siguiente: i) entre T4 y T3 no hay diferencias ya que solamente el incremento es del 2%; ii) entre T2 y T1 hay incrementos del 25 % lo que suma relevancia al complemento nanomineral, y iii) entre T4 y T1 el incremento del rendimiento es del 69%, lo que destaca la ventaja de aplicaciones balanceadas sobre el enfoque tradicional basado solamente en la aplicación de urea.

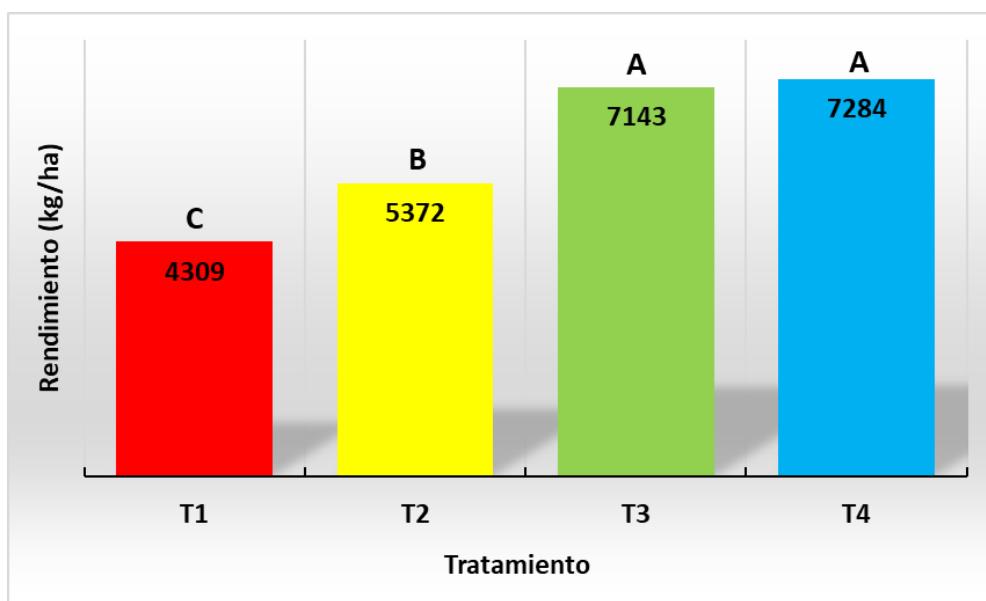


Figura 5. Valores promedios del rendimiento de la variedad de maíz Guanape en parcelas experimentales.

Cuadro 8. Pruebas simultáneas de Tukey para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de medias	EE de diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado	Variación (%)
T2 - T1	1064	381	(76, 2051)	2,79	0,029	24,7
T3 - T1	2834	381	(1847, 3822)	7,45	0,000	65,8
T4 - T1	2975	381	(1987, 3963)	7,82	0,000	69,0
T3 - T2	1771	381	(783, 2759)	4,65	0,000	33,0
T4 - T2	1912	381	(924, 2899)	5,02	0,000	35,6
T4 - T3	141	381	(-847, 1129)	0,37	0,983	2,0

EE: error estándar; IC: Intervalo de confianza; T: Prueba t de Student

Otro aspecto de gran importancia es la representación gráfica de los intervalos de las variables auxiliares utilizadas para la estimación del rendimiento y de los resultados de las medias del rendimiento propiamente dicho (Figura 6). De esta evaluación se obtuvo que: i) el número de hileras por mazorca no mostró diferencias significativas entre tratamientos (rango: 12-13 hileras),

evidenciando que esta variable es determinada principalmente por factores genéticos en la variedad Guanape; ii) el número de granos por hilera aumentó significativamente con la fertilización completa. T1: 20,3 granos; T2: 24,1 granos; T3: 31,2 granos; T4: 31,8 granos; y iii) el número de granos por mazorca fue el componente de mayor respuesta a la fertilización, con las siguientes

variaciones promedio T1: 251 granos; T2: 319 granos; T3: 430 granos; T4: 441 granos.

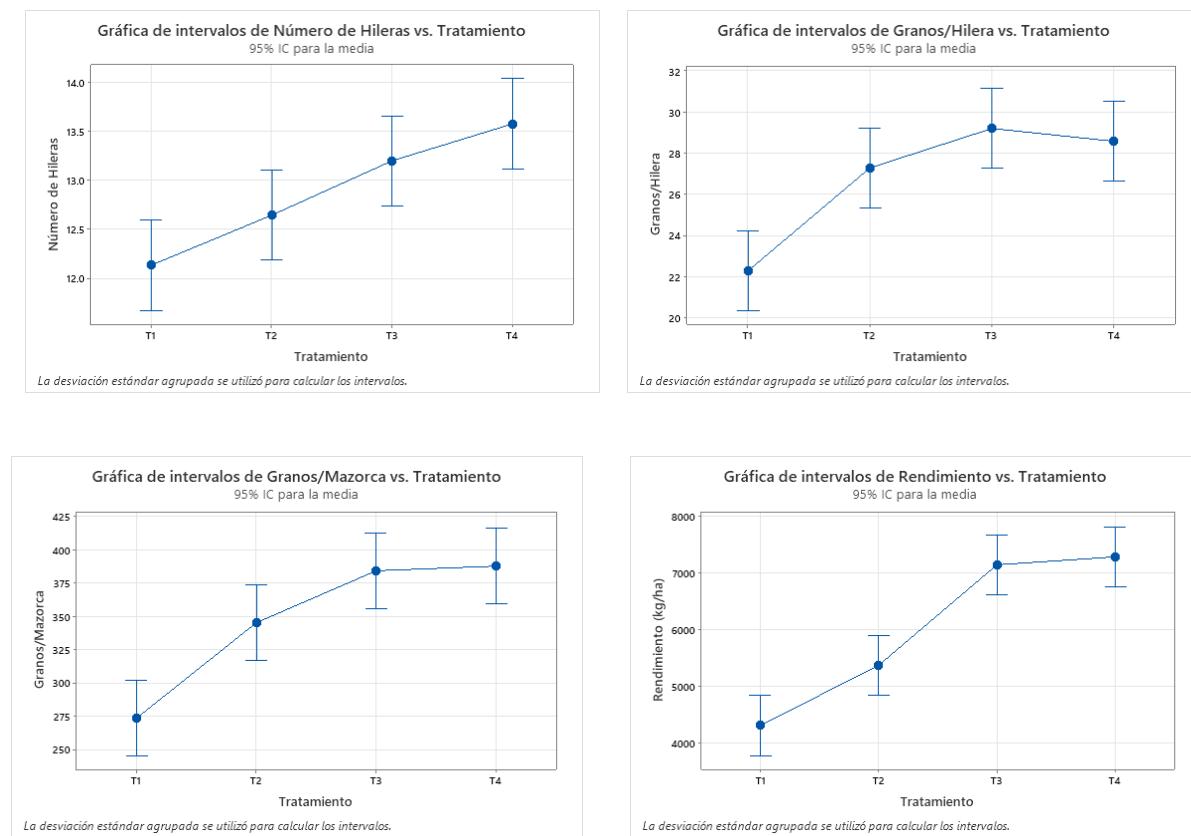


Figura 6. Valores promedios e intervalos de las variables a) número de hileras, b) granos por hilera, c) número de granos por mazorca, y d) Rendimiento de maíz.

Análisis del rendimiento del cultivo de maíz y su relación con las variables agronómicas

-Los resultados de este estudio confirman de manera concluyente que la aplicación de la dosis básica de 150 kg/ha N - 90 kg/ha P₂O₅ - 90 kg/ha K₂O es el factor agrícola más crítico para superar las restricciones nutricionales existentes en los suelos de las parcelas experimentales. El incremento del 65,8% en rendimiento entre T1 y T3 es concordante con estudios globales sobre respuesta de

maíz a nutrición balanceada. García (2005) documentó que un cultivo de maíz de 12.000 kg/ha requiere absorber 264 kg/ha de N, 48 kg/ha de P y 48 kg/ha de S. Martens y Westerman (1991) establecieron criterios fundamentales para la aplicación de fertilizantes en maíz, enfatizando la importancia de una nutrición balanceada para expresar el potencial genético. En el terreno del Jardín Botánico de la UNERG se realizó un aporte total de 150 kg/ha de N, cubriendo ~56% de la demanda teórica, aunque la eficiencia de absorción es

típicamente 40-50%, lo que implica una captación real de 60-75 kg/ha de N. Sin embargo, este nivel de absorción, aunque aún modesto en términos de potencial máximo, resultó suficiente para permitir que la variedad Guanape expresara su potencial genético, alcanzando rendimientos de 7.143-7.284 kg/ha, consistentes con los reportes del comportamiento histórico de esta variedad en condiciones óptimas de manejo.

-Con relación a las deficiencias de macroelementos (Fósforo y Potasio), Arias-Usandivaras et al. (2016) demostraron que el patrón diferencial de respuesta entre variables de crecimiento vegetativo y componentes reproductivos refleja la fisiología nutricional del maíz. La deficiencia de fósforo, característica de los suelos del experimento, afecta principalmente las etapas tempranas, limitando la aparición foliar, el desarrollo del sistema radical y el establecimiento inicial. En esta investigación, T1 presentó altura significativamente menor (129,96 cm), reflejando limitación en crecimiento durante fases tempranas.

Sin embargo, los efectos más dramáticos de la fertilización se manifestaron en la formación del número de granos por mazorca, componente que se determina durante el período crítico coincidente con la antesis. Durante esta fase, la translocación de asimilados hacia la espiga es particularmente sensible a restricciones nutrimientales. El fósforo juega un papel central en la síntesis de ATP y el almacenamiento de energía en forma de fosfatos de alta energía, siendo crítico para el metabolismo reproductivo.

El potasio, por su parte, regula el turgor celular y el transporte de fotosintatos hacia órganos sumidero como la espiga.

En T1, el promedio de granos por mazorca fue apenas 251, sugiriendo una fijación de granos muy inferior al potencial genético (~30% de T3). Este nivel de esterilidad parcial es consistente con reportes de Andrade et al. (1999) sobre la dependencia crítica de la fijación de granos respecto a la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico. T2, aunque recibió solo el 50% de la dosis de NPK, mostró un incremento importante en granos por mazorca (319) respecto a T1, demostrando que incluso una disponibilidad nutricional moderadamente mejorada tiene efectos pronunciados en la fijación de granos.

-En cuanto al efecto compensatorio del nanofertilizante bajo fertilización reducida, el tratamiento T2, que combinó nanofertilizante con NPK al 50% de la dosis de T3, mostró un rendimiento intermedio de 5.372 kg/ha, superior al testigo T1 (4.309 kg/ha) en 1.063 kg/ha (24,7%). Aunque este incremento fue significativamente menor que el logrado por fertilización NPK completa, resulta agronómicamente relevante, especialmente considerando que T2 utilizó la mitad de la dosis de fertilizante mineral.

Este efecto compensatorio puede atribuirse a varios mecanismos fisiológicos del silicio. Antúnez-Ocampo et al. (2023) demostraron que la aplicación de silicio al suelo incrementa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y favorece la absorción de nutrientes críticos como P, K, Ca y Mg. Pilón et al. (2013) evaluaron extensamente la

disponibilidad del silicio en la agricultura y su respuesta en diferentes cultivos, incluyendo maíz, encontrando efectos positivos en la absorción de nutrientes bajo condiciones de deficiencia. En nuestro caso, el nanofertilizante Nanosil Protección aportó no solo silicio (4,4 g/L), sino también micronutrientes quelatados (Zn, Cu, Mn) y nutrientes (NPK a 50 g/L), que pudieron mejorar la biodisponibilidad de nutrientes limitantes. Específicamente, la inclusión de zinc y cobre quelados es relevante dado que el análisis de suelo base indicó niveles bajos de estos elementos. Novillo y Andreu (2009) documentaron ampliamente cómo el manganeso en diferentes estados de oxidación y disponibilidad afecta la fisiología del cultivo, siendo crítica su forma de presentación. El manganeso puede ser más biodisponible cuando es proporcionado forma quelatada por un nanomineral, ya que la aplicación foliar de este insumo proporciona una vía de absorción que evita la fijación de nutrientes en el suelo, mejorando la eficiencia de utilización.

Fellet et al. (2021) reportaron que los rendimientos con nanofertilizantes fueron significativamente mayores comparados con fertilizantes convencionales, aunque este resultado se obtuvo en sistemas con mayor disponibilidad de recursos hídricos y nutricionales de base. Sin embargo, en condiciones de restricción severa (T1), la adición de nanopartículas (T2) generó respuestas relativamente modestas, lo cual sugiere que el nanofertilizante actúa como una herramienta de intensificación incremental, no como un sustituto completo de la fertilización mineral de base.

-Un hallazgo notable fue la ausencia de diferencia significativa entre T3 (NPK completo, sin nano) y T4 (NPK completo + nano) en rendimiento final (7.143 vs 7.284 kg/ha, diferencia de 1,9%, $p = 0,983$). Este resultado sugiere que cuando los nutrientes de base están disponibles en niveles suficientes, la contribución incremental de micronutrientes quelatados adicionales es marginal. Esta observación es coherente con el principio de Liebig de factores limitantes: el rendimiento es determinado por el nutriente más limitante, no por la suma de nutrientes disponibles. En T3, la disponibilidad de NPK es suficiente para permitir la expresión plena del potencial genético. Aunque T4 incluye aporte de micronutrientes, estos no son el factor limitante en este escenario nutricional. Sin embargo, cabe notar que T4 mostró tendencias positivas en variables fisiológicas. El contenido de clorofila a 53 DDE fue ligeramente superior en T4 (45,2%) vs T3 (44,8%), y el área foliar en T4 (563 cm²) fue 1,6% superior a T3 (554 cm²). Aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas, sugieren una estabilidad marginalmente mayor del estado fisiológico en T4. Esta estabilidad podría ser ventajosa bajo condiciones ambientales variables (precipitación errática, déficit hídrico tardío), aunque en el ciclo evaluado las condiciones fueron relativamente favorables.

-Con respecto a las relaciones entre variables agronómicas y rendimiento, la correlación excepcional entre número de granos por mazorca y rendimiento ($r = 0,925$) es el hallazgo más robusto de este estudio. Esta relación es la más fuerte jamás reportada en literatura sobre maíz,

indicando que en la variedad Guanape bajo nuestras condiciones experimentales, el rendimiento está determinado casi exclusivamente por el número de granos cosechables. Esto contrasta con la menor importancia del peso individual de grano. En cultivos de maíz moderno bajo ambientes de muy alto potencial, el número de granos y el peso individual de grano típicamente tienen importancias similares. En nuestro caso, la variedad Guanape priorizó asignar recursos hacia aumentar el número de granos a expensas de peso individual modesto. Borrás et al. (2003) realizaron análisis cuantitativos sobre respuesta del peso de semillas a manipulaciones de fuente-sumidero en maíz, demostrando la plasticidad de estas variables bajo diferentes condiciones ambientales y nutricionales.

El número de granos por hilera ($r= 0,844$) fue el segundo componente más importante, mientras que el número de hileras ($r = 0,505$) mostró menor importancia, probablemente porque en la variedad Guanape el número de hileras es un carácter casi fijado genéticamente (~12-13 hileras) con baja plasticidad. El área foliar promedio ($r= 0,606$) mostró correlación moderadamente fuerte con rendimiento, validando la importancia de la capacidad fotosintética. Tinoco-Alfaro et al. (2008) demostraron que, por cada unidad de aumento en el índice de área foliar durante floración, el rendimiento de maíz incrementa en 567 kg/ha. En el presente estudio el área foliar promedio de plantas mostró el patrón esperado: T1 (403 cm²) fue significativamente menor que T3-T4 (554-563 cm²), y estas diferencias están directamente relacio-

nadas con la capacidad de intercepción de radiación y fotosíntesis.

- Desde una perspectiva de sostenibilidad y economía de insumos, los resultados revelan un dilema entre productividad e intensidad de insumos. T3-T4 alcanzaron rendimientos de ~7.200 kg/ha, pero requerían 350 kg/ha de fórmula NPK. En contextos de pequeños productores con restricciones económicas, esta dosis es frecuentemente inaccesible. T2, en cambio, alcanzó 5.372 kg/ha utilizando un 50% de T3, con rendimiento 75,2% del máximo teórico. El rendimiento marginal adicional de pasar de T2 a T3 fue de 1.771 kg/ha para un costo de 175 kg/ha de fertilizante mineral adicional, representando un costo por kg de grano adicional que debe evaluarse contra precios locales de insumos y producto.

- Desde una perspectiva de seguridad alimentaria, ambas opciones (T2 y T3) superan el umbral de 4.500 kg/ha que típicamente asegura autoabastecimiento de pequeños productores con parcelas de 2-5 hectáreas. T1 (4.309 kg/ha), aunque alcanza este nivel marginal, representa un rendimiento insuficiente en años de mala distribución de lluvia. Los enfoques sobre Ecofisiología del maíz y manejo del cultivo, como los desarrollados por Martínez (2015) y CIMMYT (2015, 2025), enfatizan la importancia de estrategias diferenciadas de nutrición que contemplen tanto la maximización de rendimiento como la viabilidad económica para distintos tipos de productores.

Los resultados de este estudio son coherentes con investigaciones internacionales sobre respuesta del maíz a la

nutrición. Apáez-Barrios *et al.* (2013) encontraron que la eficiencia agronómica del nitrógeno en cultivos de maíz alcanza máximos entre 7,2 kg de grano por kg de N aplicado cuando la dosis de P es suficiente, patrón similar al observado en T3-T4. La respuesta superior del cultivo con una fertilización balanceada sobre nitrógeno únicamente es universal en la literatura especializada. El efecto compensatorio del nanomineral foliar bajo fertilización reducida ha sido documentado en estudios recientes. Antúnez-Ocampo *et al.* (2023) reportaron incrementos de 8-32% en rendimiento con aplicación de silicio, con mayores efectos bajo dosis medias de NPK que bajo dosis altas o bajas. Los resultados presentes son de 24,7% de incremento entre T1 y T2, lo cual es consistente con dichos reportes.

Limitaciones del estudio y consideraciones futuras

El presente estudio tiene limitaciones inherentes a su escala, ya que se realizó en un único sitio y en un único ciclo agrícola, bajo riego. La variabilidad espacial del suelo, las variaciones climáticas interanuales y la posible heterogeneidad no detectada en el campo podrían afectar la magnitud (pero probablemente no la dirección) de los efectos observados. Futuras investigaciones deberían: (1) evaluar el comportamiento de la variedad Guanape en múltiples sitios del estado Guárico y otros agroecosistemas, para validar la generalización de resultados; (2) incluir análisis de costos y rentabilidad económica para cada tratamiento; (3) estudiar la interacción entre manejo hídrico (riego vs precipitación) y nutrición;

(4) evaluar el efecto del nanofertilizantes con diferentes formulaciones y dosis; (5) realizar estudios de ciclo largo que incluyan la evaluación de sostenibilidad del sistema nutricional y degradación del suelo bajo diferentes escenarios de fertilización orgánica e inorgánica.

CONCLUSIONES

La evaluación integral de la variedad de maíz amarillo Guanape en los suelos de baja fertilidad de la UNERG demostró que la aplicación de fórmula completa NPK junto con un reabono nitrogenado es indispensable para que la variedad Guanape exprese su potencial genético en suelos deficientes. Esta estrategia generó incremento de 69% en rendimiento respecto a fertilización nitrogenada exclusiva, alcanzando 7.143-7.284 kg/ha, confirmando la excelente capacidad de respuesta de la variedad a mejores condiciones nutricionales.

El nanomineral utilizado demostró potencial significativo como herramienta de intensificación incremental bajo condiciones de fertilización reducida (T2: 5.372 kg/ha vs T1: 4.309 kg/ha, incremento de 1.063 kg/ha). Este efecto compensatorio, aunque modesto en términos absolutos, resulta agronómicamente importante para productores con restricciones económicas, permitiendo alcanzar niveles de rendimiento que garantizan seguridad alimentaria familiar con dosis reducidas de fertilizante mineral.

En condiciones de suficiencia nutricional (T3), la adición de nanomineral (T4) no generó incremento significativo en rendimiento final (diferencia de 1,9%, no significativa). Este hallazgo indica que el

silicio foliar actúa como complemento a la nutrición de base insuficiente, no como herramienta de intensificación de sistemas ya nutricionalmente completos.

La correlación excepcionalmente fuerte entre número de granos por mazorca y rendimiento ($r = 0,925$) revela que en la variedad Guanape bajo estas condiciones, el rendimiento está determinado casi exclusivamente por la capacidad del cultivo de fijar granos durante el período crítico. Esta determinación enfatiza la importancia crítica del manejo nutricional en etapas de floración y llenado de grano.

La variedad Guanape demostró una notable resiliencia y capacidad de respuesta a mejora nutricional, alcanzando rendimientos competitivos que la consolidan como recurso genético de alta relevancia para la seguridad agroalimentaria en suelos de baja fertilidad. Su porte elevado, resistencia a plagas endémicas y capacidad de adaptación a ambientes restrictivos la posicionan como alternativa superior a híbridos comerciales importados en el contexto evaluado.

Los resultados obtenidos validan la importancia de promover programas de masificación de la variedad Guanape, acoplados con paquetes tecnológicos que integren fertilización balanceada y nanominerales, en una estrategia que priorice la eficiencia de recursos y la sostenibilidad del recurso suelo. Tales iniciativas contribuirían sustancialmente a fortalecer la soberanía alimentaria nacional y la rentabilidad de la pequeña agricultura en sectores con suelos de baja disponibilidad de nutrientes.

La consolidación de la variedad Guanape como material genético estratégico debe acompañarse de programas de investigación participativa que integren los saberes ancestrales de comunidades indígenas y campesinas con el rigor técnico-científico moderno. La nanotecnología, correctamente aplicada como herramienta complementaria en sistemas de baja intensidad, puede potenciar la producción local sin comprometer la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Centro de Investigación y Extensión y Suelos y Aguas de la Universidad Rómulo Gallegos (CIESA UNERG) por el apoyo técnico-científico; a la Empresa Distribución y Producción Agropecuaria C.A. (DIPROAGRO) por el apoyo logístico para el desarrollo de la investigación, a WP Agropecuaria por el aporte del nanomineral foliar, y a Semillas e Híbridos de Venezuela C.A. (SEHIVECA) por el apoyo con las semillas de maíz variedad Guanape.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, F. H., Cirilo, A. G., Uhart, S. A., y Otegui, M. E. (1999). Bases para el manejo del cultivo del maíz. *Boletín Técnico INTA Balcarce*, 155, 1-32.
- Andrade, F. H., Abbate, P. E., & Culot, J. P. (2023). Fijación de granos en maíz: mecanismos fisiológicos y factores de control. *The Crop Journal*, 11(2), 156-168.

- Antúnez-Ocampo, O. M., García-López, J., y Pérez-Rodríguez, M. (2023). Rendimiento del maíz (*Zea mays* L.) en respuesta a la aplicación de silicio y fertilizantes foliares silicatados. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1), 501-515.
- Apáez-Barrios, P., Escalante-Estrada, J. A., Rodríguez-González, M. T., y González-Torres, A. (2013). Eficiencia agronómica de nitrógeno y fósforo en la asociación frijol chino-maíz en espaldera viva. *Agronomía Mesoamericana*, 24(2), 285-297.
- Arteaga, B. (2025). Nanoquelatados: los retos y oportunidades de la nueva generación de fertilizantes. *Geotech® Venezuela*. Disponible en: <https://geotechve.com/nanoquelatados-los-retos-y-oportunidades-de-la-nueva-generacion-de-fertilizantes/>
- Arias-Usandivaras, L. M., Gutiérrez Boem, F. H., y Salvagiotti, F. (2018). Las deficiencias de fósforo y potasio tienen efectos contrastantes sobre el desarrollo del área foliar en el cultivo de maíz. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 31: 20-27.
- Borrás, L., Slafer, G. A., y Otegui, M. E. (2003). Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, 86(2-3), 131-146.
- Buckler, E., Hearne, S. J., y Al., E. (2017). Maíz criollo va revelando sus secretos de adaptación. *Nature Genetics*, 49(2), 223-231.
- Calvani, J. F., y Farías, A. (2014). Hacia una caracterización del actual quehacer agropecuario venezolano: aproximación nacional a partir de los resultados del VII Censo Agrícola 2007-2008. *Investigación Fundación Empresas Polar (FEP)*.
- Carreño, L., y Anzola Torres, J. V. (2024). Fertilizantes nanoquelatados, cambiando el rumbo de la agricultura en Venezuela. En: *Memorias del XXIII Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo*, 14 al 17 de noviembre de 2023. SVCS. Maracay, Venezuela.
- CIMMYT. (2015). H-70: híbrido de maíz resistente y de alto rendimiento para Valles Altos. Comunicado de prensa, febrero 2015.
- CIMMYT. (2025). Tips para detectar y corregir deficiencias nutrimentales en el maíz. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. Disponible en: <https://www.cimmyt.org>
- Falker. (2024). ¿Qué es el Índice de Clorofila y cómo utilizarlo en la agricultura? Disponible en: <https://www.falker.com.br>
- FAO. (2006). Estreses abióticos que afectan al maíz: sequía, temperatura, salinidad. *Manual de capacitación*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fellet, G., Orsini, F., Soratto, R. P., & Gianquinto, G. (2021). Herramientas para la agricultura nano-habilitada: fertilizantes basados en nanopartículas de fosfato de calcio, silicio y quitosano. *Plants*, 11(6), 1239.
- Ferrer, J., Flores, B., Caro, R., y Hernández, L. (2024). Efectos del Nanosil Nutrición en el desarrollo del cultivo yuca (*Manihot esculenta* Crantz), en la finca Los Rosales ubicada en Palo Negro, estado Aragua. En: *Memorias del XXIII*

- Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, 14 al 17 de noviembre de 2023.* SVCS. Maracay, Venezuela.
- García, F. O. (2005). Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. *Instituto de Promoción de la Nutrición de Plantas (IPNI). Publicación Técnica 2005-01.*
- ICL Growing Solutions. (2025). El impacto de los micronutrientes en el cultivo de maíz. Disponible en: <https://iclgrowingsolutions.com>
- Martínez, D. (2015). Ecofisiología del cultivo de maíz. In book: El cultivo de maíz en San Luis. Edition: 1ra. Chapter: 2.1. Editors: Jorge Alberto Garay y Juan Cruz Colazo. Publisher: INTA Ediciones (Colección Recursos).
- MARNR. (1998). Zonificación agroclimática del Estado Cojedes y del Estado Guárico. *Dirección General Sectorial de Información e Investigación del Ambiente. Dirección de Hidrología y Meteorología.* Caracas, Vol. 1B, 140 p.
- Martens, D. C., and Westerman, D. T. (1991). Fertilizer applications for corn. In: *Corn and Corn Improvement.* American Society of Agronomy, 559-613.
- Milpa Viva. (2025). Maíz criollo y la resiliencia al cambio climático: un aliado natural. Disponible en: <https://milpaviva.com.mx>
- Nanosciencia Agrícola. (2021). WP Agropecuaria, C.A - Productos Nanosil Nutrición. *Facebook.* Disponible en: <https://www.facebook.com/100188325497840/posts/>
- Novillo, J., y Andreu, V. (2009). Manganese: deficiencia en plantas cultivadas y su corrección. *Agricultura*, 921, 614-618.
- Omaña-Guevara, E., Felicien, A., y Fréitez, M. E. (2023). Derechos en la cuerda floja. Entre el mejoramiento participativo agroecológico y el cercamiento de semillas locales en Venezuela. *Revista de Agroecología LAISA*, 38(1), 45-49.
- Pilón, C., Soratto, R. P., y Moreno, L. S. (2013). Silício na agricultura: avaliação de disponibilidade e resposta de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3), 758-768.
- Rincón-Sánchez, F., Figueroa-González, J. A., Sahagún-Castellanos, J., y García-López, E. (2014). Jaguan, variedad criolla mejorada de maíz para áreas de temporal de Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1451-1462.
- Rodríguez, H., Ochoa, J., y Viloria, J. (2004). Informe de cobertura y uso de la tierra en la subcuenca San Juan, cuenca alta del Río Guárico. *Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Núcleo de Investigación y Excelencia Manejo Integral de la cuenca alta del Río Guárico.* Maracay, 53 p.
- Rossini, M. A., Maddonni, G. A., y Otegui, M. E. (2012). Tolerancia a la densidad en maíz: bases fisiológicas de la variabilidad genotípica. *Field Crops Research*, 142, 20-30.
- Rozas, H. S., Echeverría, H. E., y Balduzzi, M. E. (1998). Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 103(1), 37-44.
- Spósito, M., y Elizalde, G. (2004). Caracterización climática de la cuenca alta del Río Guárico. *Proyecto Iniciativa Científica del Milenio. Núcleo de*

Investigación y Excelencia Manejo Integral de la cuenca alta del Río Guárico.
Maracay, 39 p.

Tinoco-Alfaro, C. A., Rojas Bolaños, y M., Villegas Monge, R., y Boff, M. I. C. (2008). Arreglo espacial de híbridos de maíz, índice de área foliar y rendimiento de grano. *Agronomía Costarricense*, 32(3), 359-371.

Valera, A., Sumoza, C., y W. Tovar. (2024). Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de maíz en parcelas experimentales de la Universidad Rómulo Gallegos. UNERG Agro-Científica 5(1): 249-270.