



Productividad de maíz (Diamantes 8843) bajo diferentes densidades de siembra y dosis de nitrógeno¹

Maize productivity (Diamantes 8843) under different planting densities and nitrogen doses

Wendy Lázaro-Rojas², Jorge Claudio Vargas-Rojas³, Edgar V. Vega-Villalobos⁴, Alfredo Alvarado-Hernández⁵, Gilberto Cabalceta-Aguilar⁵, Gabriel Garbanzo-León⁵

- ¹ Recepción: 16 de mayo, 2022. Aceptación: 11 de julio, 2022. Este trabajo formó parte del proyecto de investigación B7290 “Evaluación de la fertilización sobre mazorca expuesta en dos variedades de libre polinización de maíz (Diamantes 8843, JSAÉNZ) y maíz criollo en el trópico estacionalmente seco de Costa Rica” de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica (<https://vinv.ucr.ac.cr/sigpro/web/researchers/603800250>), San José, Costa Rica.
- ² Servicio Fitosanitario del Estado. Peñas Blancas, Guanacaste, Costa Rica. wlazaro@sfe.go.cr (<https://orcid.org/0000-0002-8914-446X>).
- ³ Universidad de Costa Rica, Sede Regional de Guanacaste. Liberia, Costa Rica. jorgeclaudio.vargas@ucr.ac.cr (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0002-1139-2148>).
- ⁴ Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Departamento de Cultivos, San José, Costa Rica. edgar.vega@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-5678-1710>).
- ⁵ Universidad de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Centro de Investigaciones Agronómicas, Sabanilla, San José. C.P. 11501, San José, Costa Rica. alfredo.alvarado@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0002-6930-6660>), gilberto@cabalceta.com (<https://orcid.org/0000-0002-3757-8207>), juan.garbanzo@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-2848-6199>).

Resumen

Introducción. En Costa Rica, el maíz (*Zea mays*) forma parte de la dieta de la población. Sin embargo, se ha reducido el área de siembra, debido a políticas comerciales y al reducido conocimiento del manejo agronómico del cultivo. **Objetivo.** Analizar el efecto de dosis de N y densidades de siembra sobre la productividad de maíz variedad Los Diamantes 8843, en Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó entre agosto y diciembre 2018, en la Finca Experimental de Santa Cruz, Universidad de Costa Rica. En un diseño de bloques completos al azar, se evaluaron tres densidades de siembra: 50 000, 57 143 y 66 666 plantas/ha y cuatro dosis crecientes de N: 0, 100, 200 y 300 kg ha⁻¹. Se cuantificó la altura, peso fresco de la planta, grosor del tallo, calidad de mazorca, absorción de nutrientes y rendimiento. Para cada variable se ajustó un análisis de varianza. **Resultados.** Hubo efecto significativo de la dosis de N sobre las variables altura, peso seco, número de granos por fila, número de mazorcas por parcela útil y absorción de nutrimentos, estas variables fueron mayores con dosis elevadas de N. Hubo efecto significativo de la densidad de siembra sobre la altura, número de mazorcas y absorción de nutrimentos, estas alcanzaron valores mayores en las densidades altas. Mayores índices de eficiencia se alcanzaron en las dosis de 100 kg ha⁻¹ y la densidad de 50 000 plantas/ha. El rendimiento fue menor en todas las densidades evaluadas cuando no se aplicó N. Las dosis de 100 y 200 kg ha⁻¹ presentaron los mayores rendimientos, independiente de la densidad de siembra. **Conclusión.** La dosis de 100 kg ha⁻¹ de N y la densidad de 57 143 plantas/ha mostró los valores más altos para los índices de eficiencia y la mayor producción.

Palabras clave: factores de eficiencia, fertilización con N, componentes de rendimiento, absorción de nutrientes.



Abstract

Introduction. In Costa Rica, maize (*Zea mays*) is an important component of the population's diet. However, the planting area has been reduced due to marketing policies and reduced knowledge of agronomic management of the crop. **Objective.** To analyze the effect of N doses and planting densities on the productivity of maize variety Los Diamantes 8843 in Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. **Materials and methods.** The study was carried out between August and December 2018 at the Santa Cruz Experimental Farm, Universidad de Costa Rica. In a randomized complete block design, three planting densities: 50,000, 57,143, and 66,666 plants/ha and four increasing doses of N: 0, 100, 200, and 300 kg ha⁻¹ were evaluated. Plant height, plant fresh weight, stem thickness, cob quality, nutrient uptake and yield were quantified. An analysis of variance was adjusted for each variable. **Results.** There was a significant effect of N dose over the variables height, dry weight, number of grains per row, number of ears per useful plot, and nutrient uptake. In general, these variables were higher at high N doses. There was significant effect of planting density on height, number of ears, and nutrient uptake, these variables reached higher values at high densities. Higher efficiency rates were achieved at 100 kg ha⁻¹ and at a density of 50,000 plants/ha. The yield was lower in any of the evaluated densities, when N was not applied. The doses of 100 and 200 kg ha⁻¹ showed the highest yields, regardless of planting density. **Conclusion.** The dose of 100 kg ha⁻¹ of N and the density of 57 143 plants/ha showed the highest values for the efficiency indices and the highest yield.

Keywords: efficiency factors, N fertilization, yield components, nutrient uptake.

Introducción

En Costa Rica, el cultivo del maíz ha sido parte importante de la dieta de la población, principalmente, en la región del Pacífico (Cascante Jiménez, 2009). Este cereal se cultiva desde la época precolombina y es utilizado por los pequeños productores de las zonas rurales con modalidad de agricultura familiar, donde las mazorcas y forraje producido son, en su mayoría, para el consumo propio y/o para la alimentación animal (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2014). Esto ocasiona que muchos agricultores diseñen manejos específicos, acorde a las características del agroecosistema, en función de factores como el clima, suelos y manejo de las variedades (Aguilar Capio et al., 2015; Bonilla & Meléndez, 2005).

En la década de los 80 se cultivaban 85 000 ha de maíz, mientras que para el año 2019 se reportó un área sembrada de 8000 ha, lo que significa una reducción del 90 % (Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2019). Esta reducción se debe a factores como la inseguridad del mercado, variabilidad en las condiciones climáticas, poca información agronómica para las nuevas variedades y la competencia con otros mercados extranjeros (Chacón Lizano, 2017; Morales-Abarca, 2018). Además, la disminución del área de siembra incentivó la importación a nivel comercial del grano. En el año 2016, para Centroamérica, Costa Rica fue el segundo importador de maíz comercial, con una estimación de consumo de 3,50 kg por habitante (Chacón Lizano, 2017).

La producción de maíz en el país se concentra en pequeños y medianos productores (Morales-Abarca, 2018) con el inconveniente de que el rendimiento productivo en Costa Rica es bajo (1420-1910 kg ha⁻¹), en comparación con otros productores como México (4200-9040 kg ha⁻¹), debido a la poca información de prácticas de manejo específico para cada sitio y para variedades del cultivo (Aguilar Carpio et al., 2015; Jiménez Ureña, 2019; Montesillo-Cedillo, 2016; Morales-Abarca, 2018; Soto Carreño & Hernández Córdova, 2012). La dosis de fertilización nitrogenada y la densidad de siembra, se consideran entre los factores más importantes que afectan el rendimiento del cultivo (Amanullah Khattak & Khalil, 2009; Garbanzo-León et al., 2021; Motato Alarcón et al., 2016; Quevedo et al., 2015).

La utilización de altas densidades de siembra aumenta la producción del grano de maíz y el rendimiento del cultivo (de la Cruz-Lázaro et al., 2009; Reiné et al., 2009; Testa et al., 2016; Ventimiglia & Torrens Baudrix, 2014). La densidad óptima para la producción de grano se encuentra entre las 40 000 y 100 000 plantas/ha, según la variedad de maíz (lo que depende de la altura de planta y el desarrollo del área foliar) (Olson & Sander, 1988). No obstante, si se utilizan densidades altas puede ocasionar la producción de mazorcas y granos pequeños, lo que va en detrimento del rendimiento y la calidad del grano (Campodónico, 2012; Cervantes-Ortíz et al., 2013; Stein et al., 2016).

Los trabajos donde se aplicaron diferentes dosis de fertilizante, presentaron resultados variables en función de las condiciones ambientales (temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar) en que se realizaron. Con altas densidades de siembra, pero fertilización con bajas dosis de nitrógeno, el rendimiento disminuyó (Gutiérrez & Luna, 2002), por lo que se hace necesario estudiar ambos factores en forma conjunta para cada variedad en diferentes condiciones ambientales y edáficas (Aguilar Carpio et al., 2015; Bonilla & Meléndez, 2005; Ciampitti, 2018; Instituto Nacional de Innovación y Transferencia Tecnológica Agropecuaria [INTA], 2008; Paliwal et al., 2001).

Una de las variedades de maíz seleccionada para la producción en el trópico seco es Los Diamantes 8843. Esta variedad es de polinización libre (VPL), de grano semidentado, de madurez tardía (120-135 días), con una densidad de siembra recomendada de 50 000 a 55 000 plantas/ha, presenta rendimientos que varían de 3 a 6 t ha⁻¹, puede adaptarse desde los 0 m s.n.m hasta los 1000 m s.n.m, puede tolerar altas temperaturas y abundantes lluvias (INTA & Agencia Española de Cooperación Internacional, 2005).

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de dosis de N y densidades de siembra sobre la productividad de maíz variedad Los Diamantes 8843 en Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica.

Materiales y métodos

Ubicación y caracterización del área experimental

El estudio se realizó en la Finca Experimental de Santa Cruz (FESC), Sede Regional Guanacaste, de la Universidad de Costa Rica, durante el período de agosto – diciembre del 2018. El área se encuentra localizada en las coordenadas geográficas 10°17'6,24" latitud norte y 85°35'42,95" longitud oeste, con una altitud de 54 m s.n.m. El suelo de la FESC se clasifica a nivel taxonómico como Vertic Haplustalfs asociado a Typic Ustorthents y Typic Haplusterts, de los órdenes Alfisoles, Vertisoles y Entisoles en sitios cercanos. Presenta un período seco y otro lluvioso, con una precipitación promedio de 1834 mm año⁻¹, con meses de lluvia entre mayo-noviembre, con temperatura media anual de 27,90 °C. Cuenta con un régimen de humedad de suelo ústico, por presentar más de 90 días secos (Cerdas Ramírez, 2015; Garbanzo-León et al., 2021; Vega Villalobos & Salas Camacho, 2012).

Las condiciones nutricionales en el suelo fueron altas en cationes, sin presencia de acidez intercambiable, salinidad y condiciones adecuadas de solubilidad según el pH (Cuadro 1). El sitio experimental durante el período 2018-2019, presentó una acidez nula de 0,12 cmol(+) L⁻¹, una CICE de 33,70 cmol(+) L⁻¹, con concentraciones altas de Ca (23,30 cmol(+) L⁻¹), Mg (10,1cmol(+) L⁻¹) y K justo en el nivel crítico (0,20 cmol(+) L⁻¹). Las concentraciones de los micronutrientes fueron superiores al nivel crítico, en excepción con el P que mostró una concentración baja (1 mg L⁻¹).

Establecimiento y manejo agronómico del experimento

Para el establecimiento inicial del experimento, a los veintidós días antes de la siembra, se realizó dos pases de arado a una profundidad de 20 a 30 cm. Luego, se pasó la rastra dos veces y se aplicó pendimetalina en una dosis de 2 L ha⁻¹ y atrazina en una dosis de 1,4 L ha⁻¹, para el control pre-emergente de malezas. Con estacas y cuerdas se delimitaron parcelas de 21 m² para un total de 48 parcelas y 1008 m² de área experimental.

Cuadro 1. Concentración química de nutrimentos en el suelo de donde se evaluó el efecto de dosis de N y densidades de siembra sobre la productividad de maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843. Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

Table 1. Chemical concentration of nutrients in the soil where the effect of N doses and planting densities on the productivity of maize (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843 was evaluated. Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

KCl Olsen	pH H ₂ O	cmol(+) l ⁻¹					%	mg l ⁻¹					mS cm ⁻¹
		acidez	Ca	Mg	K	CICE		P	Zn	Cu	Fe	Mn	
NC	5,5	0,5	4	1	0,20	5		10	3	1	10	5	1,5
Suelo	5,90	0,12	23,30	10,10	0,20	33,70	0,40	1	3,80	21	65	62	0,10

Laboratorio Suelos y Foliars del Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. Solución extractora KCl-Olsen modificado, NC: nivel crítico para suelos en general según parámetros del laboratorio. CICE: Capacidad de intercambio de Cationes Efectiva (acidez + Ca + Mg + K) / Soil and Foliar Laboratory of the Centro de Investigaciones Agronomicas, Universidad de Costa Rica. Extractor soil solution KCl-Olsen modified, NC: critical nutrients levels for Costa Rica soil according to Laboratory parameters. CICE: effective cation exchange capacity (acidity + Ca + Mg + K).

Para la siembra de maíz se utilizó la variedad Los Diamantes 8843. La semilla se trató días previos para la siembra con carboxim + captan con una dosis de 100 g⁻¹ 100 kg⁻¹ de semilla. Para la siembra se utilizó densidades de siembra crecientes de 50 000, 57 143 y 66 666 plantas/ha (50 cm entre hileras con una distancia entre plantas de 40, 35 y 30 cm respectivamente). La semilla se colocó en un orificio realizado con espeque, a una profundidad de 4 – 7 cm del suelo y luego fue cubierta con suelo.

Se utilizó un sistema de riego por goteo con distancia entre los goteros de 15 cm. La lámina de reposición neta, se calculó bajo los datos obtenidos en el sitio por Rojas (1985) a una profundidad radicular de 20 cm, con un porcentaje de agotamiento máximo del 50 % y una eficiencia del 90 %. La evapotranspiración calculada según la metodología de Allen et al. (2006) fue: 1,30, 1,20, 4,70, 5,20, 1,70 mm día⁻¹ para los meses de agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, respectivamente. La lámina de reposición neta calculada fue de 16,90 mm con una frecuencia de riego de nueve días en promedio.

Se realizó la aplicación del insecticida spinetoram en una dosis de 0,08 L ha⁻¹, debido a una incidencia de *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera:Noctuidae) a los 15 días después de la siembra (dds). Con respecto a la fertilización, el N fue un factor a evaluar en este experimento, para cada dosis de N se sumó el complemento de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 160 kg ha⁻¹ de K₂O, 40 kg ha⁻¹ de MgO, 54 kg ha⁻¹ de SO₄, 10 kg ha⁻¹ de ZnSO₄ y 5 kg ha⁻¹ de H₃BO₃. Las fórmulas se desarrollaron de forma manual, con base en las fuentes NO₃NH₄(33,5 – 0 – 0), Kmag (0 – 0 – 22 – 18 – 22), fosfato monopotásico (0 – 52 – 34, para el tratamiento testigo), DAP (18 – 46 – 0), KCl (0 – 0 – 60), sulfato de zinc (17 % SO₄ y 31 % Zn) y ácido bórico (17,5 %). Las aplicaciones del fertilizante se efectuaron en tres fracciones de manera manual, el primer fraccionamiento fue de 10 % a los 8 dds, el segundo fue de 40 % a los 20 dds y el tercero fue de 50 % a los 40 dds.

Tratamientos y diseño experimental

Se usaron tres densidades de siembra de 50 000, 57 143, 66 666 plantas/ha, y cuatro dosis de fertilización nitrogenada a razón de 0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹. De la combinación ortogonal de los niveles de los factores surgió una estructura factorial de doce tratamientos. El diseño experimental que se utilizó fue bloques completos al azar con cinco repeticiones por tratamientos. La unidad experimental fue una parcela de 7 m de largo por 3 m de ancho, para un área total de 21 m². Cada parcela tenía seis hileras de maíz, donde se consideró las cuatro líneas centrales

como parcela útil ($6 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$), el borde fue definido por las plantas de cada extremo según lo recomendado por Vargas Rojas y Navarro Flores (2017) para la zona de Santa Cruz, Guanacaste.

Variables evaluadas

Las variables morfológicas de este experimento, se evaluaron dentro de los estados fenológicos R5-R6. Los estados fenológicos se pueden encontrar entre los días 35 a 42 después de la aparición de los estigmas (Fallas et al., 2011). Estas fases se identificaron con base en la referencia desarrollada por Iowa State University (Ritchie & Hanway, 1993) para recolectar cinco plantas por tratamiento y medir la morfología de la planta y los contenidos nutricionales.

En cada planta se midió la altura con una cinta métrica desde la base del tallo inferior hasta la lígula superior visible. Además, se midió el grosor del tallo a 10 cm de la base inferior. Las plantas fueron divididas en raíz, panícula, tallos, hojas, granos, mazorca y tuza. Cada parte se pesó y se preparó para secarla a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 72 h. Transcurrido el tiempo, se pesaron las muestras para obtener la biomasa seca y cada sección se envió al Laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas para la determinación de los contenidos de N, P, K, Mg, S, Zn, y B presentes en los tejidos. Para el cálculo de absorción se siguió la metodología desarrollada por Bertsch (2009) para la cuantificación nutricional por tejido y después proyectada por planta.

Para las variables de producción se procedió a seguir la metodología desarrollada por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, 2012). Una vez que las plantas estuvieron en el estado fenológico R6 (grano duro), se cosecharon todas las mazorcas de la parcela útil, donde para cada repetición se cuantificó el número de plantas en la parcela útil y las mazorcas por planta. A cada mazorca se le cuantificó el número de granos, hileras y el peso fresco por mazorca. Después, estas fueron desgranadas y se cuantificó el peso de los granos por parcela útil. Para cada parcela útil se seleccionó una submuestra de 200 g de los granos, se cuantificó el peso húmedo y se redujo la humedad en un horno a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ por 48 h, con el fin de determinar el peso seco. Se generó una submuestra al azar de 200 g, se pesaron y se colocaron en una estufa por 48 h más a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ para obtener el peso seco.

Con la determinación de la absorción de nutrientes y el rendimiento de cada unidad experimental, se procedió a calcular el uso eficiente de N según la metodología definida por Fixen et al. (2015). Donde la eficiencia aparente de recuperación (ER) se define como en el incremento en la absorción de N por cada dosis de N usada para cada factor en este experimento. La eficiencia fisiológica (EF) es determinada por la cantidad en kg de incremento en la producción del grano sobre la cantidad (kg) de N absorbido en la planta. La eficiencia agronómica (EA) se explica por el incremento en la cantidad de grano (kg) por cada kg de N aplicado para cada factor en este ensayo. La eficiencia interna (EI) de utilización es determinada por la cantidad en producción de grano (kg) por cada kg de N absorbido. Se calculó el factor parcial de productividad (FPP), que es un cociente entre la cantidad de grano (kg) y la cantidad de N aplicado. Cada índice de eficiencia se determinó por cada repetición para obtener la variabilidad específica de este experimento.

Análisis estadístico

Para las variables altura de las plantas, grosor del tallo, peso fresco y seco de las plantas, el rendimiento (kg de grano) y los índices de eficiencia, se realizó un análisis de varianza para un arreglo factorial de tratamientos con nivel de significancia (α) de 0,05. Se comprobaron los supuestos de este modelo, mediante gráficos diagnósticos (cuantiles de términos del error, gráfico de residuos y gráfico de residuos vs predichos). En los términos del modelo donde existió diferencia significativa, se realizó una comparación de medias, mediante la diferencia mínima significativa de Fisher con un nivel de significancia (α) del 0,05. Todos los procedimientos se realizaron con el software estadístico InfoStat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

Resultados

Efectos de la densidad y dosis de N sobre la morfología de crecimiento en Los Diamantes 8843

En ninguna de las variables morfológicas hubo interacción entre los factores evaluados ($p>0,05$) (Cuadro 2). Al analizar los efectos principales, se encontró que altas dosis de N y altas densidades mostraron un incremento en la altura, dosis de 300 kg ha⁻¹ de N mostraron el mayor incremento de altura (223 cm), este mismo efecto se encontró al analizar el efecto con densidades por arriba de 57 143 plantas/ha. En cuanto al peso fresco, solo hubo efecto de dosis de N, los niveles donde se aplicó alguna cantidad de N mostraron mayor peso fresco que la dosis de 0 N. El grosor de tallo no mostró diferencias significativas ni para el factor densidad de siembra, ni para el factor dosis de N.

Cuadro 2. Efecto de dosis de N y densidades sobre la altura de las plantas, biomasa fresca, grosor del tallo y calidad de mazorcas de maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843 evaluada en la Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

Table 2. Effect of N doses and plant densities on plant height, fresh biomass, stem thickness, and cob quality of maize (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843 evaluated at the Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

Factores kg ha ⁻¹ N	Altura (cm)	Peso fresco (g)	Grosor tallo (cm)	FGM (n)	GFM (n)	NMPU (n)
300	223,29 A	998,16 A	26,45 A	12,30 A	35,67 A	34,87 A
200	207,35 B	883,06 A	24,93 A	12,40 A	34,75 AB	37,27 A
100	209,32 B	889,57 A	25,66 A	12,47 A	33,32 B	39,53 A
0	186,53 C	627,80 B	23,64 A	11,95 A	26,64 C	15,53 B
P-valor	<0,001	<0,001	0,200	0,070	<0,001	<0,001
F	14,37	6,48	1,61	2,53	38,35	38,57
Plantas/ha						
66 666	213,05 A	796,85 A	24,00 A	13,37 A	32,29 A	35,20 A
57 143	210,55 A	905,95 A	26,41 A	12,38 A	32,75 A	31,55 AB
50 000	196,31 B	846,84 A	25,00 A	12,09 A	32,76 A	28,65 B
P-valor	0,003	0,347	0,118	0,288	0,800	0,016
F	6,79	1,08	2,25	1,28	0,22	4,57
Dosis × densidad						
P-valor	0,696	0,988	0,973	0,2811	0,1358	0,0581
F	0,64	0,15	0,21	1,29	1,73	2,23

Medias con una misma letra no representan diferencias estadísticas ($p>0,05$) según la diferencia mínima significativa de Fisher, n= número, FGM= número filas de grano por mazorca, GFM= número de granos por fila de mazorca, NMPU= número de mazorcas por parcela útil. / Means with the same letter do not represent a statistical difference ($p>0,05$) according to Fisher's least significant difference, n= number, FGM= number of grain rows per cob, GFM= corn grains number per cob row, NMPU= number of cobs per useful plot.

Para las variables asociadas a la calidad de las mazorcas, la interacción densidad de plantas \times dosis no fue significativa ($p > 0,05$). Se encontró un incremento significativo en el número de mazorcas por parcela útil (NMPU), según las dosis y densidad de siembra (Cuadro 2), donde mayores dosis de N y mayores densidades presentaron un incremento en el NMPU. La dosis de 0 N ha⁻¹ mostró el menor NMPU significativamente distinto ($p < 0,001$) en comparación con las demás dosis. En lo que respecta al número de granos por filas de mazorca (GFM), solo se vio afectado por la dosis de N aplicada, las dosis de 200 y 300 kg ha⁻¹ de N tuvieron los valores mayores de GFC con diferencia estadística de la dosis de 0 kg ha⁻¹ de N, esta última tuvo el valor más bajo de GFM. El FGM no mostró efectos significativos cuando se compararon distintas dosis y distintas densidades de siembra.

El peso total de mazorcas por unidad experimental (PTM) presentó interacción significativa ($p = 0,0310$ y $F = 2,59$) entre dosis de N y densidades de siembra. La separación de medias para la combinación de los niveles de los factores se presenta en la Figura 1.

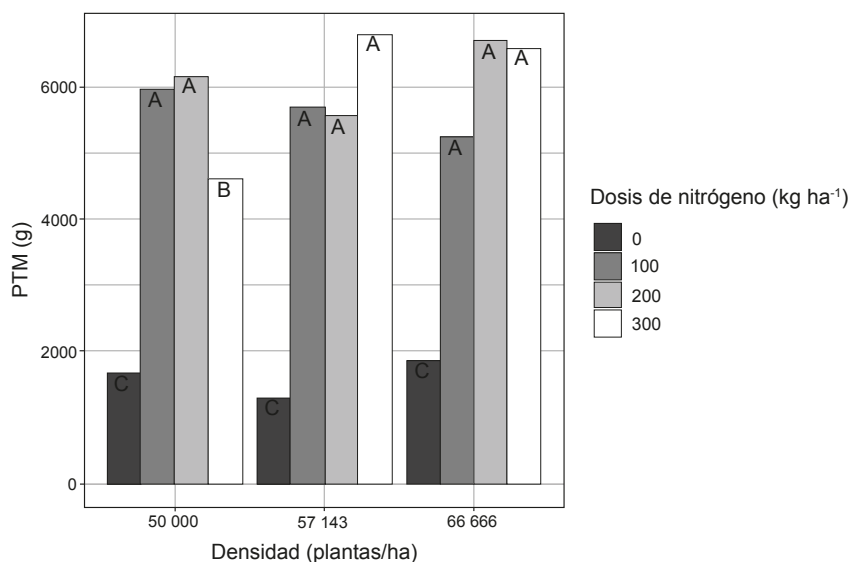


Figura 1. Efecto de la densidad de siembra y dosis crecientes de N sobre el peso total de mazorca (PMT) en plantas de maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843 en la Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

PTM = peso total de mazorcas por unidad experimental. Medias con una misma letra no representan diferencias estadísticas ($p > 0,05$) según la diferencia mínima significativa de Fisher.

Figure 1. Effect of planting density and increasing doses of N on total cob weight (PMT) in maize plants (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843 at the Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

PTM = total cob weight per experimental unit. Means with the same letter do not represent statistical differences ($p > 0,05$) according to Fisher's least significant difference.

Las dosis de 100 y 200 kg ha⁻¹ de N presentaron el mayor peso de mazorca total (PMT) en densidades de 50 000 y 57 143 plantas/ha (Figura 1). Las plantas no mostraron un efecto diferenciado entre usar dosis más altas (>200 kg ha⁻¹ de N) y las densidades más altas (>57 143 plantas/ha).

Efecto de dosis crecientes de N y diferentes densidades sobre la absorción de nutrimentos en R6 para la variedad Los Diamantes 8843

La absorción total de nutrientes en general, estuvo definida por la cantidad de plantas (biomasa) en el ensayo (Cuadro 3). Las altas densidades (66 666) y la mayor dosis de N (300 kg ha⁻¹ de N), mostraron un incremento significativo ($p < 0,01$) en la absorción de N, P, K, Mg, S y Zn, en comparación a las demás densidades y dosis. Las dosis de 100 y 200 kg de N ha⁻¹ no cuantificaron una diferencia significativa en la absorción de los demás nutrientes a excepción del B.

Cuadro 3. Absorción de nutrimentos en maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843 bajo el efecto de diferentes densidades de siembra y dosis de nitrógeno, en la Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

Table 3. Nutrient absorption in maize (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843 under the effect of different planting densities and nitrogen doses, at the Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

Factores plantas/ha	N		P		K		Mg		S		Zn	
	kg ha ⁻¹											
66 666	170,31	A	29,05	A	141,01	A	29,71	A	13,11	A	576,72	A
57 143	142,02	B	24,10	AB	120,40	B	24,71	B	11,32	AB	542,51	A
50 000	124,80	B	20,52	B	109,32	B	21,70	B	9,45	B	439,29	B
P-valor	0,002		0,085		0,009		0,001		0,002		0,013	
F	7,12		5,33		5,29		8,45		7,43		4,83	
kg ha ⁻¹ N												
300	195,52	A	32,46	A	143,81	A	32,91	A	14,40	A	666,70	A
200	158,03	B	25,27	BC	126,15	A	24,04	B	11,49	B	502,50	BC
100	143,23	B	25,21	B	138,44	A	25,77	B	11,33	B	510,01	B
0	85,90	C	18,03	B	85,90	B	17,62	C	7,90	C	398,71	C
P-valor	<0,001		0,0002		<0,001		<0,001		<0,001		0,001	
F	21,0		8,08		10,45		15,15		11,82		8,63	
Dosis × densidad												
P-valor	0,282		0,355		0,164		0,344		0,432		0,303	
F	1,29		1,14		1,62		1,16		1,01		1,24	

Medias con una misma letra no representan diferencia estadística ($p > 0,05$) según la diferencia mínima significativa de Fisher. / Means with the same letter do not represent a statistical difference ($p > 0,05$) according to Fisher's least significant difference.

La interacción entre dosis de N y densidad de siembra tuvo efecto significativo ($p = 0,0158$ y $F = 2,98$) en la absorción de boro en la variedad de maíz Los Diamantes 8843 (Figura 2). El boro mostró una mayor absorción al combinar dosis de 200 kg ha⁻¹ de N con densidades de 57 143 plantas/ha, este mismo efecto se encontró al combinar dosis de 300 kg ha⁻¹ con densidades de 66 666 plantas/ha.

Efecto de dosis crecientes de N y diferentes densidades sobre el rendimiento de la variedad Los Diamantes 8843

Para las variables peso seco de grano, granos por m², EA, EF y FPP, el término de interacción entre los factores no fue significativo ($p > 0,05$). Al analizar el efecto de los factores principales, tanto el peso de los granos como el número de granos por metro cuadrado, mostraron una tendencia de incremento al realizar aplicación de N, no obstante, estas variables no difirieron estadísticamente para las diferentes densidades (Cuadro 4). El mayor peso

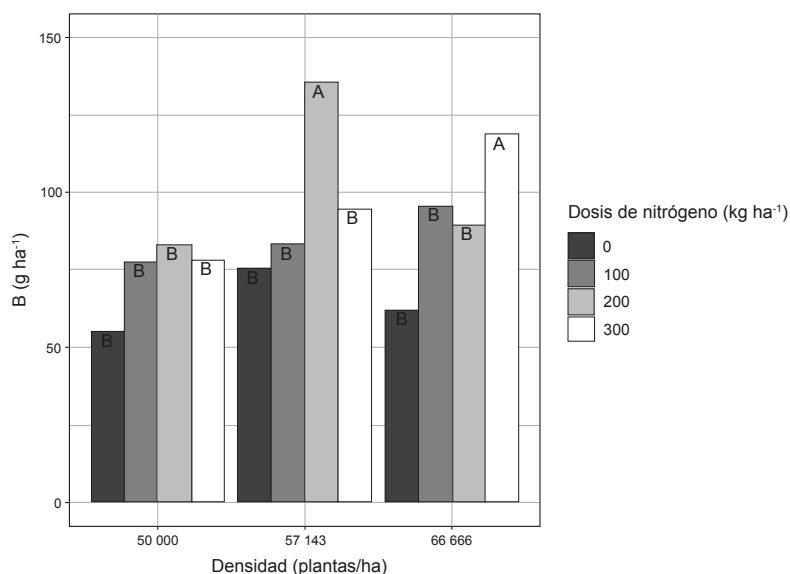


Figura 2. Interacción de la densidad de siembra y dosis de N en la absorción de boro en maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843. Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

Figure 2. Interaction of planting density and N dose in the absorption of boron in maize (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843. Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

Cuadro 4. Efecto de la densidad de siembra y dosis crecientes de N en variables de calidad de producción y eficiencias en el uso de N en maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843. Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

Table 4. Effect of planting density and increasing doses of N on production quality variables and efficiencies in the use of N in maize (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843. Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

Factores kg ha ⁻¹ N	Peso seco 1000 granos g	Granos por m ² n	EA -	EF -	FPP -
300	277,39 A	1980,15 A	15,75 C	53,88 A	21,60 C
200	272,65 AB	2085,46 A	24,35 B	66,39 A	33,20 B
100	259,74 B	1987,04 A	37,67 A	67,62 A	60,01 A
0	234,11 C	600,31 B	-	-	-
P-valor	0,006	<0,001	<0,001	0,539	<0,001
F	4,70	58,30	12,60	0,60	86,20
Plantas/ha					
66 666	264,55 A	1775,31 A	26,30 A	45,83 B	38,48 A
57 143	260,59 A	1685,50 A	25,96 A	81,90 A	39,11 A
50 000	264,53 A	1528,85 A	25,53 A	59,97 AB	36,79 A
P-valor	0,775	0,103	0,985	0,029	0,728
F	0,26	2,40	0,02	3,97	0,32
Dosis × densidad					
P-valor	0,165	0,116	0,492	0,849	0,176
F	1,62	1,83	0,87	0,34	1,69

EA: eficiencia agronómica, EF: eficiencia fisiológica, FPP: factor parcial de productividad. Medias con una misma letra no representan diferencia estadística ($p > 0,05$) según la diferencia mínima significativa de Fisher. / EA: agronomic efficiency, EF: physiological efficiency, FPP: partial productivity factor. Means with the same letter do not represent a statistical difference ($p > 0,05$) according to Fisher's least significant difference.

seco (272 – 277 g) se obtuvo con dosis de 200 y 300 kg ha⁻¹ de N. El número de granos por m² presentó diferencias significativas cuando se aplicó N en comparación con la dosis de 0 N.

La dosis de N de 100 kg ha⁻¹ tuvo la mayor EF y FPP en la variedad Los Diamantes 8843 en Santa Cruz, Guanacaste (Cuadro 4). Se encontró que las densidades de siembra no presentaron diferencias significativas en las eficiencias, a excepción del EF. Además, las dosis de N exhibieron efectos altamente significativos ($p < 0,001$), las dosis de 100 kg ha⁻¹ de N superaron en un 58 % en la eficiencia de fertilización y un 65 % en el factor parcial de producción a la dosis de 300 kg ha⁻¹ de N. En el caso de la eficiencia de fertilización, esta mostró solo una tendencia del mismo efecto con las dosis, no obstante, mostró un efecto significativo con la densidad de 57 143 plantas/ha.

La eficiencia aparente de recuperación (ER) e interna de utilización (EI), mostraron una interacción altamente significativa entre la dosis y la densidad de siembra; $p = 0,0003$ y $F = 7,04$ y $p = 0,0012$ y $F = 5,85$, de forma respectiva (Figura 3). Al comparar las interacciones se encontró que la mayor EI se obtuvo con las dosis de 200 y 100 kg ha⁻¹ de N en las densidades 50 000 y 57 143 plantas/ha; mientras que la ER presentó una mayor recuperación en las densidades de 50 000 y 66 666 plantas/ha con la dosis de 100 kg ha⁻¹ de N).

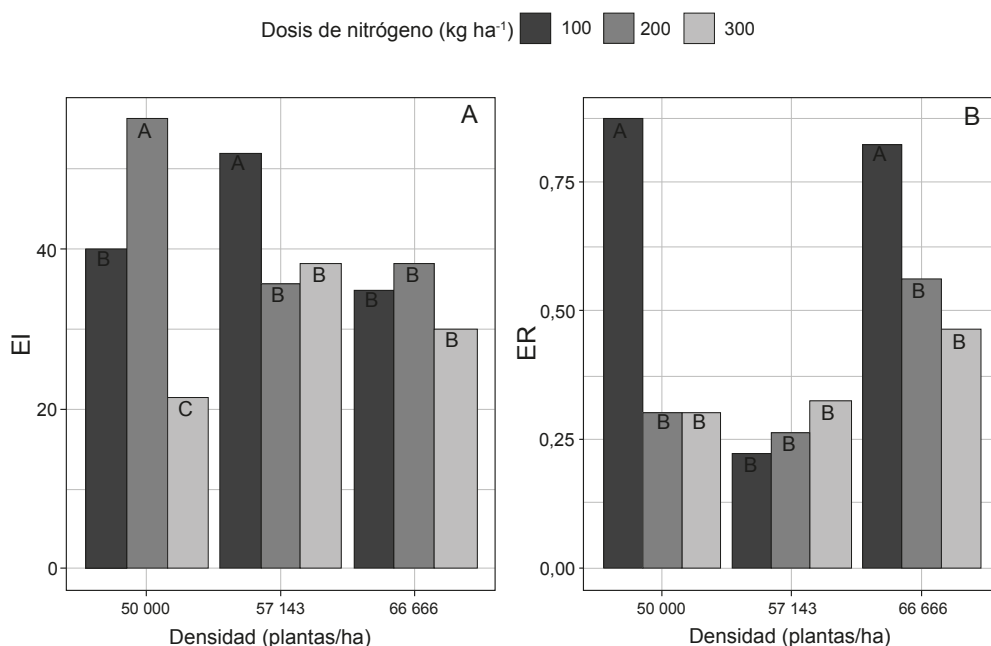


Figura 3. Efecto de la interacción entre dosis creciente de nitrógeno y diferentes densidades de siembras sobre la eficiencia interna de utilización y aparente de recuperación de N en maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843, evaluada en la Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

EI: internal utilization efficiency of N, ER: apparent recovery efficiency of N. Means with the same letter do not represent a statistical difference ($p > 0.05$) according to Fisher's least significant difference.

Figure 3. Effect of the interaction between increasing doses of nitrogen and different planting densities on the internal efficiency of use and apparent recovery of N in corn (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843 evaluated at the Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

EI: internal utilization efficiency of N, ER: apparent recovery efficiency of N. Means with the same letter do not represent a statistical difference ($p > 0.05$) regarding Fisher's least significant difference.

El rendimiento de grano (kg ha^{-1}) al 14 % de humedad, presentó efecto significativo para el término de interacción ($p = 0,0221$ y $F = 2,78$). La dosis de 200 kg ha^{-1} de N a una densidad de $66\ 666$ plantas/ha; mostró el mayor rendimiento de grano a 14 % de humedad, no obstante, esta no difirió de las demás dosis de N ni del rendimiento alcanzado en la densidad de $57\ 143$ plantas/ha (Figura 4). En la densidad de $50\ 000$ plantas/ha, el mayor rendimiento se obtuvo con la dosis de 200 kg ha^{-1} de N ($5727,3 \text{ kg ha}^{-1}$), que tuvo una diferencia significativa con la dosis de 300 kg ha^{-1} de N ($4163,2 \text{ kg ha}^{-1}$) y la dosis de 0 kg ha^{-1} de N ($1455,1 \text{ kg ha}^{-1}$), esta última fue la que mostró el menor rendimiento. En el caso de la densidad de $57\ 143$ plantas/ha, la dosis de 300 kg ha^{-1} de N, presentó una tendencia de aumento en la producción y fue la que tuvo mayor rendimiento ($6175,6 \text{ kg ha}^{-1}$), esta solo difirió del testigo sin fertilización (0 kg ha^{-1} de N), el cual tuvo el rendimiento más bajo ($1123,8 \text{ kg ha}^{-1}$) significativamente ($p < 0,001$). Al analizar el efecto en la densidad de $66\ 666$ plantas/ha, las dosis de 100 kg ha^{-1} de N ($4833,8 \text{ kg ha}^{-1}$), 200 kg ha^{-1} de N ($6267,9 \text{ kg ha}^{-1}$) y 300 kg ha^{-1} de N ($5853,5 \text{ kg ha}^{-1}$), fueron las de mayor rendimiento, estas no mostraron una diferencia estadísticamente significativa entre las dosis de N, a excepción del tratamiento 0 kg ha^{-1} de N ($1712,6 \text{ kg ha}^{-1}$), el cual presentó el menor rendimiento.

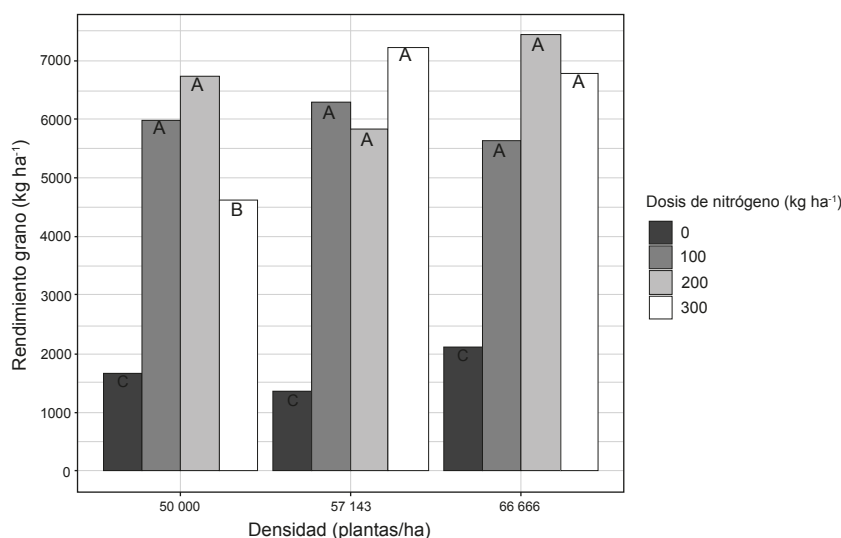


Figura 4. Rendimiento en grano a 14 % de humedad bajo dosis creciente de nitrógeno y diferentes densidades de siembras en maíz (*Zea mays*) variedad Los Diamantes 8843, evaluada en la Finca Experimental de Santa Cruz, Sede Regional de Guanacaste, Universidad de Costa Rica. Agosto / diciembre 2018.

Medias con una misma letra no representan diferencia estadística ($p > 0,05$) según la diferencia mínima significativa de Fisher.

Figure 4. Grain yield at 14 % moisture under increasing doses of nitrogen and different planting densities in maize (*Zea mays*) variety Los Diamantes 8843 evaluated at the Santa Cruz Experimental Farm, Guanacaste Regional Campus, Universidad de Costa Rica. August / December 2018.

Means with the same letter do not represent a statistical difference ($p > 0,05$) according to Fisher's least significant difference.

Discusión

La altura y la biomasa de las plantas de maíz variedad los Diamantes 8843, aumentaron conforme se incrementó la dosis de fertilización nitrogenada. Dosis altas de N pueden estimular el crecimiento de tallos y área foliar en maíz (Balta-Crisólogo et al., 2015; González Torres et al., 2016; Salcedo Candela, 2016). Las altas densidades

tuvieron efecto en el crecimiento de las plantas, en comparación con las densidades bajas, crecieron en promedio 8 % más; es probable que sea un efecto de la competencia por la intersección de luz (Cervantes-Ortíz et al., 2013; Virgen-Vargas et al., 2014), debido a que los factores de agua y nutrimentos para este caso no fueron limitantes a excepción de la dosis 0 % de N.

En bajas densidades el grosor de tallo mostró una tendencia a incrementar. Algunos trabajos han reportado que conforme crecen las plantas, el diámetro tiende a disminuir (Gurdián Rocha & Espinoza Núñez, 2013; Martínez Juárez, 2018); en otros estudios se determinó que la densidad influye significativamente sobre el diámetro de la planta (Castillo Cajina & Bird Moreno, 2013). No obstante, para este experimento no se encontraron diferencias estadísticas significativas para el grosor de tallo. Para efectos de producción de maíz es importante que la planta tenga más énfasis en el desarrollo y peso de granos que en desarrollo estructural, sin embargo, el desarrollo vegetativo puede ser de utilidad para alimentación animal, la cual requiere más biomasa y proteína cruda que producción de grano. El uso de forrajes en la alimentación animal está bien estudiado con el uso de cálculo indirecto de la proteína cruda a partir de los contenidos de N presentes en los forrajes (Alfaro & Montoya, 2020; Araya-Mora & Boschini-Figueroa, 2005; Cerdas-Ramírez et al., 2021).

Las dosis crecientes de N tuvieron un efecto en el número de granos por filas en las mazorcas (GFM), este efecto se registró significativamente al pasar de 27 GFM en el tratamiento 0 kg ha⁻¹ de N a 36 GFM con la dosis 300 kg ha⁻¹ de N. Estos resultados respaldan el efecto de las dosis altas de N en el maíz, empero esto no definió que el mayor número de granos en la mazorca aumentara significativamente la producción (Cuadro 2).

Las variables filas de grano por mazorca (FGM) y el número de mazorcas por parcela útil (NMPU), no mostraron diferencias significativas con el incremento de las dosis de N, es posible que estas variables sean más intrínsecas a la característica de la variedad Los Diamantes 8843. Por el contrario, al analizar el efecto de las densidades de siembra por aparte, se encontró que las altas densidades incrementaron el NMPU; en este sentido, Al-Naggar et al. (2015) y Blanco-Valdes & González-Viera (2021) indicaron que cuando se siembra a una densidad por encima de la óptima, disminuye el rendimiento del cultivo, porque las plantas producen menos mazorcas. En cuanto al peso total de las mazorcas por unidad experimental (PTM) (Figura 1), un incremento en el GFM y NMPU no significó un efecto fuerte en la productividad, debido a que el PTM demostró que el peso fue similar al usar dosis de 100 y 200 kg ha⁻¹ de N, para Santa Cruz, Guanacaste.

La absorción de los nutrientes fue afectada por la cantidad de biomasa, debido a las altas densidades de siembra y las dosis de N (Cuadro 3). El efecto encontrado con las dosis altas de N, influyó en un mayor crecimiento en la planta, lo que incrementó la biomasa, esto también ocurrió al usar densidades de siembra altas, ya que un mayor número de individuos hizo que la biomasa fuera mayor. Dado que los cálculos de absorción están definidos por concentraciones de nutrientes y la biomasa seca del sistema, las densidades de siembra altas incrementan la biomasa, lo que incrementa la absorción por área. Este mismo efecto fue encontrado por Uriarte (2018), donde las plantas con mayor dosis de N incrementaron las absorciones de otros nutrimentos. Para este estudio se encontró un efecto sinérgico en función de N y B, en donde dosis altas de N (<200 kg ha⁻¹) incrementaron la absorción de B, mismo efecto encontrado por Ratto y Míguez (2006), quienes analizaron fertilizaciones nitrogenadas en maíz, estos autores encontraron un incremento en la absorción de otros micronutrientes. En Santa Cruz, Guanacaste, la mayor absorción de N en la variedad de maíz J-Sáenz, se mostró en las dosis altas de nitrógeno (200 y 300 kg ha⁻¹), con un incremento correlativo en la absorción de P, Mg, S y Zn (Garbanzo-León et al., 2021), lo que coincidió con el resultado de este estudio.

Cuando la EA es superior a veinticinco unidades significa que los sistemas agrícolas son manejados de forma adecuada a bajo niveles de aplicaciones de N (Stewart, 2007), para este estudio la dosis de 100 kg ha⁻¹ de N obtuvo un índice de EA de 38 (Cuadro 4), lo que también se respalda con el FPP, donde se encontró un índice de 60. La EA y FPP para Los Diamantes 8843, indicó que por cada kg de N aplicado hubo un incremento de al menos 38 y 60

unidades para la dosis más baja de N (100 kg ha^{-1} de N), mientras que para la dosis más alta (200 y 300 kg ha^{-1} de N) el incremento fue de solo dieciséis y veintiún unidades, respectivamente.

A partir de 200 kg ha^{-1} de N, el agroecosistema donde se efectuó esta investigación sería ineficiente para la producción de la variedad de maíz, lo que coincide con Aguilar Carpio et al. (2016), quienes reportaron que las dosis altas de N ($>100 \text{ kg ha}^{-1}$) mostraron disminución en los índices de eficiencia en el cultivo del maíz. En lo que respecta al factor densidad de siembra, se encontró que la densidad de $57\ 144$ plantas/ha mostró el valor más alto y cercano a lo deseado para ambos índices. Para que los sistemas de producción sean eficientes se debe buscar los valores más altos en los índices de eficiencia, esto predice que el manejo dado para cada sitio en específico es el más eficiente que se puede encontrar (Aguirre Valdivia & Vargas Gutiérrez, 2018; Snyder, 2009; Tasistro, 2013), lo cual para este trabajo se expresó en los factores de densidad de siembra y dosis de N.

La producción y nutrición más balanceada para este experimento se encontró para la dosis de 100 kg ha^{-1} de N a una densidad de siembra de $57\ 143$ plantas/ha y 200 kg ha^{-1} de N a una densidad de $50\ 000$ plantas/ha, en función de la eficiencia interna de utilización (EI) (Figura 4). Los rangos en EI por arriba de 65 unidades demostraron que los sistemas tienen nutrición balanceada a niveles altos de rendimiento (Stewart, 2007). Para este experimento estos dos factores mostraron diferencias estadísticamente significativas en comparación con las demás dosis de N y densidades de siembra, lo que coincide con Garbanzo-León et al. (2021), en el sentido que la densidad intermedia $57\ 143$ plantas/ha fue la que tuvo el mayor EI.

Para este trabajo, la producción de grano para la variedad Los Diamantes 8843 estuvo entre 5621 y 7241 kg ha^{-1} de grano (14% humedad) (Cuadro 4). Todos los tratamientos sin dosis de N e independiente de la densidad de siembra, mostraron los menores rendimientos del grano, lo que indica que el aporte de N tuvo efectos en el aumento de la producción. Una de las prácticas de los agricultores en la zona rurales, consiste en la aplicación de la fórmula comercial de fertilizante $10 - 30 - 10$ y, es frecuente, que se realice solo a la siembra (INTA, 2008), se ha señalado que la poca disponibilidad de N reduce la tasa de crecimiento, la producción de granos y el rendimiento (Cervantes-Ortíz et al., 2013; Tapia Palomeque, 2020).

Las dosis crecientes de nutrimentos no mostraron un efecto estadísticamente significativo entre aplicaciones de $100 - 300 \text{ kg ha}^{-1}$ de N para cada densidad. Pero se encontró un incremento de 1620 kg según el factor separado. Los resultados reflejaron una variabilidad importante en el sistema donde cada factor puede tener un efecto económico significativo para los productores de maíz. El efecto de menor rendimiento en la dosis de N más alta y la densidad de siembra más baja (Figura 4), se puede deber a factores como desbalances nutricionales en la absorción, antagonismo entre nutrimentos a nivel de suelo y fisiológico, la pérdida de fertilizante por volatilización al encontrarse más superficie expuesta o a algún efecto de dilución en la concentración de nutrimentos vinculados en la producción como el caso de K (Adriano et al., 1971; Barker & Pilbeam, 2015; Rietra et al., 2017; Terman et al., 1975). Efectos similares encontraron Garbanzo-León et al. (2021) y Oyarzun Arrechea (2010), donde dosis altas de N no mostraron efectos significativos en el rendimiento con otras variedades de maíz. Por el contrario, en un estudio desarrollado por Uriarte (2018), donde utilizó dosis crecientes de 100 , 200 y 300 kg ha^{-1} de N en maíz, presentó un mayor rendimiento con la dosis más alta de $10\ 746 \text{ kg ha}^{-1}$, sin embargo, este autor usó una densidad de $85\ 000$ plantas/ha con otras variedades diferentes a las encontradas en el país. En un estudio de dosis creciente de N, realizado en las zonas de Los Chiles y Pérez Zeledón de Costa Rica con la variedad Los Diamantes 8843, a una densidad de siembra de $53\ 333$ planta/ha, se encontró un aumento con la aplicación de dosis de N con rendimientos de $2,6$ y $4,4 \text{ t ha}^{-1}$ para cada zona, respectivamente (Bonilla Morales, 2010). En este trabajo para la misma variedad en Santa Cruz, Guanacaste, se superó a la productividad alcanzada por Bonilla Morales (2010). Otros trabajos con la variedad J-Sáenz encontraron rendimientos de 3320 kg ha^{-1} a una dosis de 100 kg ha^{-1} de N para la misma zona de estudio de este experimento (Garbanzo-León et al., 2021), lo que demuestra que el potencial productivo de Los Diamantes 8843 en Santa Cruz está por arriba de los 6000 kg ha^{-1} de grano seco a 14% de humedad.

Conclusiones

La mayor producción de biomasa, medida como peso fresco, se dio a dosis altas de N, mientras que las densidades utilizadas no mostraron diferencia para esta variable.

Las densidades de siembra y dosis de N altas, presentaron mayor absorción de N, P, K, Mg, S y Zn, en comparación con las demás densidades y dosis.

El peso seco de 1000 granos y los granos por m² tuvieron valores mayores cuando se utilizó fertilización nitrogenada, sin embargo, estas variables no fueron afectadas por las densidades de siembra utilizadas.

La dosis de 0 kg ha⁻¹ de N fue la tuvo menor rendimiento en grano a 14 % de humedad en todas las densidades de siembra evaluadas.

La dosis de 300 kg ha⁻¹ de N no favoreció el rendimiento en grano a 14 % de humedad en la densidad de siembra de 50 000 plantas/ha. Sin embargo, en esta densidad con las dosis de 100 kg ha⁻¹ o 200 kg ha⁻¹ se alcanzan los mismos rendimientos que en densidades mayores.

La dosis de 100 kg ha⁻¹ de N y la densidad de siembra de 57 143 plantas/ha, a excepción de eficiencia relativa, tuvieron los mayores índices de eficiencia.

Referencias

- Adriano, D. C., Paulsen, G. M., & Murphy, L. S. (1971). Phosphorus-iron and phosphorus-zinc relationships in corn (*Zea mays* L.) seedlings as affected by mineral nutrition. *Agronomy Journal*, 63(1), 36–39. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ1971.00021962006300010013X>
- Aguilar Carpio, C., Escalante Estrada, J. A. S., & Aguilar Mariscal, I. (2015). Análisis de crecimiento y rendimiento de maíz en clima cálido en función del genotipo, biofertilizante y nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 33(1), 51–62. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/44>
- Aguilar Carpio, C., Escalante Estrada, J. A. S., Aguilar Mariscal, I., Mejía Contreras, J. A., Conde Martínez, V. F., & Trinidad Santos, A. (2016). Eficiencia agronómica, rendimiento y rentabilidad de genotipos de maíz en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 34(4), 419–429. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/176/143>
- Aguirre Valdivia, J. K., & Vargas Gutiérrez, C. S. (2018). *Evaluación de la eficiencia agronómica y económica de uso de nitrógeno de maíz (Zea mays L.) variedad SEMSA "TEPEYAC", Yalaguina, Madriz, Nicaragua, 2017* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/3776/>
- Al-Naggar, A. M. M., Shabana, R. A., Atta, M. M. M., & Al-Khalil, T. H. (2015). Maize response to elevated plant density combined with lowered N-fertilizer rate is genotype-dependent. *The Crop Journal*, 3(2), 96–109. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2015.01.002>
- Alfaro, R., & Montoya, J. (2020). *Determinación de la capacidad productiva y valor nutricional del forraje Cuba OM-22 bajo condiciones del bosque húmedo tropical del Pacífico Central de Costa Rica*. Universidad Técnica Nacional.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>

- Amanullah, Khattak, R. A., & Khalil, S. K. (2009). Plant Density and Nitrogen Effects on Maize Phenology and Grain Yield. *Journal of Plant Nutrition*, 32(2), 246–260. <https://doi.org/10.1080/01904160802592714>
- Araya-Mora, M., & Boschini-Figueroa, C. (2005). Producción de forraje y calidad nutricional de variedades de *Pennisetum purpureum* en la Meseta Central de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 16(1), 37–43. <https://doi.org/10.15517/AM.V16I1.5180>
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (Eds.). (2015). *Handbook of plant nutrition* (2nd ed.). Taylor and Francis.
- Balta-Crisólogo, R. A., Rodríguez-del Castillo, Á. M., Guerrero-Abad, R., Cachique, D., Alva-Plasencia, E., Arévalo-López, L., & Loli, O. (2015). Absorción y concentración de nitrógeno, fósforo y potasio en sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) en suelos ácidos, San Martín, Perú. *Folia Amazónica*, 24(2), 23–30. <https://doi.org/10.24841/FA.V24I2.68>
- Berstch, F. (2009). *Absorción de nutrimentos por los cultivos* (1^a ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Blanco-Valdes, Y., & González-Viera, D. (2021). Influencia de la densidad de población en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Cultivos Tropicales*, 42(3), Artículo e08. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1602>
- Bonilla, N., & Meléndez, W. (2005). *Curso producción de semillas de maíz*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F03-8042.pdf>
- Bonilla Morales, N. A. (Ed.) (2010). Fertilización nitrogenada de variedades de maíz en dos localidades maiceras de Costa Rica. *Alcances Tecnológicos*, 8(1), 39–44. http://revista.inta.go.cr/index.php/alcances_tecnologicos/article/view/77/61
- Campodónico, F. (2012). *Evaluación de rendimientos de maíz en función de distintas densidades de siembra, en el partido de Lima, provincia de Buenos Aires* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Argentina]. Repositorio de la Universidad Católica Argentina. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/373>
- Castillo Cajina, R., & Bird Moreno, R. (2013). *Caracterización del cultivo de maíz en Nicaragua: un análisis de varianza de los determinantes del rendimiento*. Banco Central de Nicaragua. <https://bit.ly/3yHE8Sc>
- Cascante Jiménez, J. A. (2009). *Producción de maíz para autoconsumo*. Infoagro. <https://bit.ly/3H1NRXF>
- Cerdas Ramírez, R. (2015). Comportamiento productivo del pasto maralfalfa (*Pennisetum* sp.) con varias dosis de fertilización nitrogenada. *InterSedes*, 16(33), 124–145. <https://doi.org/10.15517/ISUCR.V16I33.19028>
- Cerdas-Ramírez, R., Vega-Villalobos, E. V., & Vargas-Rojas, J. C. (2021). Productividad del pasto Cuba OM-22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*) con distintas dosis de fertilización nitrogenada. *InterSedes*, 22(45), 136–161. <https://doi.org/10.15517/ISUCR.V22I45.47069>
- Cervantes-Ortíz, F., Covarrubias-Prieto, J., Rangel-Lucio, J. A., Terrón-Ibarra, A. D., Mendoza-Elos, M., & Preciado-Ortiz, R. E. (2013). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la producción de semilla híbrida de maíz. *Agronomía Mesoamericana*, 24(1), 101–110. <https://doi.org/10.15517/am.v24i1.9645>
- Chacón Lizano, M. (2017). *Evolución del cultivo de maíz en Costa Rica*. Oficina Nacional de Semillas. <https://bit.ly/3PlkC3E>
- Ciampitti, I. (2018). *Espigas anormales en maíz*. Kansas State University. <https://bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/EP169S.pdf>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2012). *Manual de determinación de rendimiento*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, & Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <http://hdl.handle.net/10883/18249>
- de la Cruz-Lázaro, E., Córdova-Orellana, H., Estrada-Botello, M., Mendoza-Palacios, J., Gómez-Vázquez, A., & Brito-Manzano, N. (2009). Rendimiento de grano de genotipos de maíz sembrados bajo tres densidades de población. *Universidad y Ciencia*, 25(1), 93–98. <https://era.ujat.mx/index.php/rera/article/view/223>

- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2020). *Infostat* (No. 2020). Centro de Transferencia InfoStat. <https://www.infostat.com.ar/index.php?mod=page&id=15>
- Fallas, R., Bertsch, F., Echandi, C., & Henríquez, C. (2011). Caracterización del desarrollo y absorción de nutrimentos del híbrido de maíz HC-57. *Agronomía Costarricense*, 35(2), 33–47. <https://doi.org/10.15517/RAC.V35I2.6677>
- Fixen, P., Brentrup, F., Bruulsema, T., Garcia, F., Norton, R., & Zingore, S. (2015). Nutrient/fertilizer use efficiency: measurement, current situation and trends. In P. Drechsel, P. Heffer, H. Magen, R. Mikkelsen, & D. Wichelns (Eds.), *Managing water and fertilizer for sustainable agricultural intensification* (1st ed., pp. 8–38). International Fertilizer Industry Association, International Water Management Institute, International Plant Nutrition Institute, & International Potash Institute. <https://bit.ly/3XMX1wY>
- Garbanzo-León, G., Alvarado-Hernández, A., Vargas-Rojas, J. C., Cabalceta-Aguilar, G., & Vega-Villalobos, E. V. (2021). Fertilización con nitrógeno y potasio en maíz en un Alfisol de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 32(1), 137–148. <https://doi.org/10.15517/am.v32i1.39822>
- González Torres, A., Figuerola Viramonte, U., Preciado Rangel, P., Núñez Hernández, G., Luna Ortega, J. G., & Antuna Grijalva, O. (2016). Uso eficiente y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero en suelos diferentes. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(2), 301–309. <https://bit.ly/3FhznkT>
- Gurdian Rocha, M. J., & Espinoza Núñez, R. J. (2013). *Efecto de seis tratamientos nitrogenados bajo riego localizado de 2.8l de agua/metro lineal/día en la producción de chilote en el cultivo del maíz (Zea Mays L.), variedad NB-S, a una densidad poblacional de 125,000 ptas ha⁻¹* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria. <http://repositorio.una.edu.ni/2182/>
- Gutiérrez, J., & Luna, M. (2002). Riego, densidad de plantas y fertilización nitrogenada en producción de maíz híbrido en Zacatecas. *Agricultura Técnica en México*, 28(2), 95–103.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2014). *Las cadenas de valor de maíz blanco y frijol en Centroamérica: actores, problemas y acciones para su competitividad*. <https://bit.ly/3Lkt2VQ>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2019). *Resultados Encuesta Nacional Agropecuaria 2019*. <https://bit.ly/3VMjh8x>
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2008). *Manual de recomendaciones técnicas del cultivo de maíz (Zea mays)*. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-2479.PDF>
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, & Agencia Española de Cooperación Internacional. (2005). *Proyecto de Granos Básicos: Variedad de Maíz Los Diamantes 8843*. <https://bit.ly/38wBhAK>
- Jiménez Ureña, F. (2019). *Alternativas de encadenamiento productivo para fomentar el valor agregado en la producción de maíz en la Región Sur de Costa Rica* [Tesis de grado, Universidad Nacional]. Repositorio de la Universidad Nacional. <https://bit.ly/3uj2iPw>
- Martínez Juárez, C. K. (2018). *Evaluación de las deficiencias tempranas de nitrógeno en maíz (Zea mays L.), y su relación con los contenidos de clorofila por influencia de dosis de fertilización nitrogenada. Yalaguina, Nicaragua 2017* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/3774/>
- Montesillo-Cedillo, J. L. (2016). Rendimiento por hectárea del maíz grano en México: distritos de riego vs temporal. *Economía Informa*, 398, 60–74. <https://doi.org/10.1016/J.ECIN.2016.04.005>

- Morales-Abarca, L. F. (2018). Producción y productividad de los cultivos de frijol y maíz en Costa Rica de 1984 al 2014. *E-Agronegocios*, 4(1), 2–18. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/eagronegocios/article/view/3666/3649>
- Motato Alarcón, N. E., Pincay Menéndez, D. J., Avellán Chancay, M. del C., Falcones Vélez, M. K., & Aveiga Villacis, E. C. (2016). Fertilización Del Híbrido Experimental De Maíz Iniap Nitrógeno. *ESPAMCIENCIA*, 7(2), 109–116. <https://bit.ly/3FjcJJ2>
- Olson, R., & Sander, D. (1988). Corn production. In G. Spague, & J. Dudley (Eds.), *Corn and corn improvement* (3rd ed., pp. 639–678). American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., & Soil Science Society of America, Inc. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr18.3ed.c11>
- Oyarzun Arrechea, M. (2010). *Respuesta productiva de un cultivo de maíz (“Zea mays” L. Var. Dracma) a distintas dosis de nitrógeno con dos tipos de riego (aspersión e inundación) y efecto sobre la lixiviación de nitratos* [Tesis de licenciatura, Universidad Pública de Navarra]. Repositorio de la sitorio de la Universidad Pública de Navarra. <https://core.ac.uk/reader/10850870>
- Paliwal, R. L., Granados, G., Lafitte, H. R., & Violic, A. D. (2001). *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción*. FAO. <https://www.fao.org/3/x7650S/x7650s00.htm>
- Quevedo, Y., Barragan, E., & Beltran, J. (2015). Efecto de altas densidades de siembra sobre el híbrido de maíz (*Zea mays* L.) Impacto. *Scientia Agroalimentaria*, 2, 18–24. <http://revistas.ut.edu.co/index.php/scientiaagro/article/view/741>
- Ratto, S., & Miguez, F. (2006). Cinc en el cultivo de maíz, deficiencia de oportunidad. *Informaciones Agronómicas*, 63, 8–15. <https://bit.ly/3GYreDr>
- Reiné, R., Barrantes, O., Broca, A., & Ferrer, C. (2009). *La multifuncionalidad de los pastos: producción ganadera sostenible y gestión de los ecosistemas* (1^a ed.). Sociedad Española para el Estudio de los Pastos.
- Rietra, R. P. J. J., Heinen, M., Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2017). Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(16), 1895–1920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>
- Ritchie, S., & Hanway, J. (1993). *How a corn plant develops* (Special report No. 48). Iowa State University of Science and Technology. <https://bit.ly/3yG3a44>
- Rojas, O. E. (1985). *Estudio agroclimático de Costa Rica* (1^a ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/8219>
- Salcedo Candela, S. E. (2016). *Comparativo de fuentes nitrogenadas en un suelo arenoso utilizando como cultivo indicador al maíz (Zea mays L.), a nivel de invernadero* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio de la Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2628>
- Snyder, C. S. (2009). Eficiencia del uso del nitrógeno: desafíos mundiales, tendencias futuras. *Informaciones Agronómicas*, 75, 1–5.
- Stein, M., Miguez, F., & Edwards, J. (2016). Effects of plant density on plant growth before and after recurrent selection in maize. *Crop Science*, 56(6), 2882–2894. <https://doi.org/10.2135/CROPSCI2015.09.0599>
- Soto Carreño, F., & Hernández Códova, N. (2012). Influencia de tres fechas de siembra en el crecimiento y rendimiento de especies de cereales cultivadas en condiciones tropicales. Parte II. cultivo del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench VAR. Isiap Dorado). *Cultivos Tropicales*, 33(2), 50–55.

- Stewart, W. M. (2007). Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, 67, 1–6.
- Tapia Palomeque, G. E. (2020). *Evaluación del comportamiento del maíz (Zea mays L.), variedad INIAP – 122 bajo dos densidades poblacionales y cuatro niveles de nitrógeno en siembra directa* [Tesis de licenciatura, Universidad Central del Ecuador]. DSpace. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21507>
- Tasistro, A. (2013). *Eficiencia de uso de nutrientes* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=cg03K5U1dOY>
- Testa, G., Reyneri, A., & Blandino, M. (2016). Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacings. *European Journal of Agronomy*, 72, 28–37. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2015.09.006>
- Terman, G. L., Allen, S. E., & Bradford, B. N. (1975). Nutrient Dilution—Antagonism Effects in Corn and Snap Beans in Relation to Rate and Source of Applied Potassium. *Soil Science Society of America Journal*, 39(4), 680–685. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1975.03615995003900040029X>
- Uriarte, F. P. (2018). *Respuesta al nitrógeno y micronutrientes en base a zinc del cultivo de maíz bajo riego* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Río Negro]. Repositorio de la Universidad Nacional de Río Negro. <https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/2540>
- Vargas Rojas, J. C., & Navarro Flores, J. R. (2017). Determinación del tamaño y la forma de unidad experimental, con el método de curvatura máxima, para ensayos de rendimiento de maíz (*Zea mays*), Guanacaste, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 9(1), 135–144. <https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1689>
- Vega Villalobos, E. V., & Salas Camacho, R. E. (2012). Curvas de absorción de nutrientes bajo dos métodos de fertilización en sandía, en Guanacaste, Costa Rica. *Revista InterSedes*, 13(26), 21–42. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/2988/2900>
- Ventimiglia, L., & Torrens Baudrix, L. (2014). *Maíz: efecto del genotipo, la densidad de siembra y el espaciamiento entre hileras, en la producción de forraje y grano, en siembras temprana*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://bit.ly/3Ppa6sc>
- Virgen-Vargas, J., Zepeda-Bautista, R., Ávila-Perches, M. Á., Espinosa-Calderón, A., Arellano-Vázquez, J. L., & Gómez-Vázquez, A. J. (2014). *Producción de semilla de líneas progenitoras de maíz: densidad de población e interacción*. *Agronomía Mesoamericana*, 25(2), 323–335. <https://doi.org/10.15517/AM.V25I2.15439>