

Características productivas del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante la modelación de DSSAT, frente al cambio climático en diferentes densidades de siembra en época lluviosa

Productive characteristics of maize (*Zea mays* L.) cultivation using DSSAT modeling, in the face of climate change at different planting densities during the rainy season

Darío Fernando Herrera Jácome, Víctor Manuel Brito Gómez, Rovinson Eduardo Corrales Camacho, Ivonne Rocío Pillasagua León & Diego Javier Conrado Palma

DIMENSIÓN CIENTÍFICA

enero - junio, V^o7 - N^o1; 2026

Recibido: 18-12-2025

Aceptado: 30-12-2025

Publicado: 08-01-2026

PAIS

- Ecuador - Quevedo
- Ecuador - Quevedo
- Ecuador - Quevedo
- Ecuador - Quevedo
- Ecuador - Quevedo

INSTITUCIÓN

- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo
- Universidad Técnica Estatal de Quevedo

CORREO:

- ✉ dherrera@uteq.edu.ec
- ✉ vbritog@uteq.edu.ec
- ✉ rcorralesc@uteq.edu.ec
- ✉ ivonne.pillasagua2014@uteq.edu.ec
- ✉ dconradop@uteq.edu.ec

ORCID:

- <https://orcid.org/0000-0003-2569-796X>
- <https://orcid.org/0000-0001-7655-1480>
- <https://orcid.org/0009-0008-6811-2275>
- <https://orcid.org/0009-0002-0173-8966>
- <https://orcid.org/0000-0002-1917-0814>

FORMATO DE CITA APA.

Herrera, D., Brito, V., Corrales, R., Pillasagua, I. & Conrado, P. (2026). Características productivas del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante la modelación de DSSAT, frente al cambio climático en diferentes densidades de siembra en época lluviosa. *Revista G-ner@ndo*, V^o6 (N^o2.). Pág. 21- 59.

Resumen

El estudio es relevante porque permitió comprender cómo el maíz responde a la variabilidad climática mediante simulaciones precisas, aportando información confiable para mejorar decisiones de manejo y optimizar la producción en época lluviosa. El objetivo general fue evaluar las características productivas del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante la modelación de DSSAT frente al cambio climático con diferentes densidades de siembra en época lluviosa. La metodología integró simulaciones con DSSAT y datos reales para evaluar el comportamiento reproductivo del maíz en tres escenarios de manejo. Se utilizaron condiciones climáticas locales, parámetros edáficos y características del cultivo para calibrar el modelo. Las variables productivas fueron analizadas mediante indicadores estadísticos que garantizaron exactitud y confiabilidad en los resultados. Los resultados muestran que, en los tres escenarios de densidad, las condiciones agroclimáticas de la época lluviosa permitieron un desarrollo fisiológico estable del maíz. DSSAT reprodujo adecuadamente la acumulación de biomasa aérea, el comportamiento vegetativo y la dinámica del peso de raíz, reflejando transiciones reproductivas coherentes en todos los casos. No obstante, el modelo mostró discrepancias significativas en la estimación del rendimiento y del nitrógeno, lo que evidencia la necesidad de una calibración más rigurosa de los parámetros genéticos y nutricionales. Los tres escenarios confirmaron que DSSAT es preciso para simular crecimiento y biomasa, pero insuficiente para rendimiento y nitrógeno. Se requiere una calibración más específica para mejorar su utilidad agronómica.

Palabras clave: Maíz, simulación, clima, densidad, productividad

Abstract

The study is relevant because it provided insight into how corn responds to climate variability through accurate simulations, providing reliable information to improve management decisions and optimize production during the rainy season. The overall objective was to evaluate the productive characteristics of corn (*Zea mays* L.) cultivation using DSSAT modeling in response to climate change with different planting densities during the rainy season. The methodology integrated DSSAT simulations and real data to evaluate the reproductive behavior of corn in three management scenarios. Local climatic conditions, edaphic parameters, and crop characteristics were used to calibrate the model. The productive variables were analyzed using statistical indicators that ensured accuracy and reliability in the results. The results show that, in the three density scenarios, the agroclimatic conditions of the rainy season allowed for stable physiological development of corn. DSSAT adequately reproduced the accumulation of above-ground biomass, vegetative behavior, and root weight dynamics, reflecting consistent reproductive transitions in all cases. However, the model showed significant discrepancies in the estimation of yield and nitrogen, highlighting the need for more rigorous calibration of genetic and nutritional parameters. The three scenarios confirmed that DSSAT is accurate.

Keywords: Maize, simulation, climate, plant density, productivity

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes en el mundo, ya que es un alimento y forraje y materia prima para diversas industrias. En Ecuador es un grano importante para la seguridad alimentaria y la economía agrícola, sobre todo en las zonas donde prevalece la agricultura de subsistencia. Pero el cambio climático amenaza la producción agrícola, alterando los patrones de lluvia, provocando temperaturas extremas y cambiando la fertilidad del suelo. Estas condiciones desfavorables podrían afectar la productividad del maíz y, por ende, el sustento de miles de familias agricultoras (García, et al., 2020).

La modelización agroclimática se erige como una herramienta fundamental para prever y atenuar el impacto del cambio climático sobre los cultivos. El modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) es un modelo ampliamente utilizado a nivel mundial para simular el crecimiento y rendimiento de cultivos en condiciones variables de clima y manejo. Estas herramientas permiten una toma de decisiones basada en datos científicos y ayudan a la adaptación y sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Alderman & Comprehensive, 2020). Caracterizando la respuesta agronómica del maíz simulado con el modelo DSSAT en condiciones de siembra convencional en Ecuador. Esta investigación pretende analizar cómo la temperatura, la precipitación y la disponibilidad de nutrientes influyen en el rendimiento del maíz en condiciones climáticas actuales y futuras. Además, busca desarrollar información para la planificación agrícola, apoyando a los agricultores en el desarrollo de estrategias más resilientes ante el clima cambiante (Aguilar, et al., 2017). La siembra tradicional, a pesar de ser la más común, puede no ser la más efectiva para adaptarse al clima. Por lo cual, evaluar su comportamiento a través de herramientas de modelación permitirá reconocer posibles restricciones y oportunidades para mejorar su manejo (Varshney, et al. 2021).

Esta nueva aproximación busca fortalecer la capacidad de respuesta de los sistemas agrícolas nacionales, aportando insumos técnicos para la formulación de políticas públicas orientadas a la sostenibilidad y la seguridad alimentaria. Además, integra la modelación agroclimática con prácticas agrícolas tradicionales para enfrentar los efectos del cambio climático en el cultivo de maíz y generar alternativas de solución basadas en evidencia científica. En este sentido, la presente investigación se enfocó en evaluar las características productivas del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante la modelación DSSAT frente al cambio climático, considerando diferentes densidades de siembra durante la época lluviosa (Deras, 2020).

La cosecha de maíz en Ecuador depende de agricultores que cultivan bajo prácticas tradicionales, transmitidas de generación en generación, basadas en su experiencia y conocimiento sobre los ciclos climáticos. Pero en los últimos años estos conocimientos no han sido suficientes para hacer frente a la alteración de los regímenes de lluvia, los periodos secos prolongados y los sucesos inesperados como heladas o lluvias torrenciales. Por lo cual, estos cambios han provocado una reducción en la estabilidad de la producción, principalmente en áreas donde el maíz es base del autoconsumo y principal sustento familiar (García, et al., 2020). Por otro lado, el cambio climático ha alterado las condiciones agroambientales en las que se ha desarrollado tradicionalmente el cultivo, creando incertidumbre en la planificación agrícola. En Ecuador, la variabilidad interanual de las lluvias y el aumento progresivo de la temperatura modifican el ciclo fenológico del maíz, disminuyen la eficiencia en el uso del agua y lo hacen más susceptible a plagas y enfermedades (Alderman & Comprehensive, 2020). Todo esto demuestra la necesidad de conocer la manera en que el clima influye en la productividad, sobre todo en áreas que dependen de las lluvias.

Aquí es donde la agroclimatología viene a ofrecer herramientas para estudiar la interacción planta-suelo-clima y así poder anticipar impactos y desarrollar estrategias de manejo, poder predecir el comportamiento del maíz en diferentes condiciones climáticas es esencial para

reducir pérdidas y guiar decisiones técnicas. Por ello, la simulación agrícola es una herramienta que permite estimar con exactitud la respuesta del cultivo a cambios en temperatura, radiación, disponibilidad hídrica y densidad de siembra, información esencial para la adaptación productiva, (Jácome, et al., 2025).

Es por ello, que, con el objetivo de disminuir la incertidumbre en la producción de maíz, los modelos de simulación se erigen como herramientas para analizar rendimientos y predecir escenarios futuros. DSSAT, por ejemplo, puede combinar datos climáticos, de suelo y de manejo para predecir el crecimiento y rendimiento del cultivo en condiciones particulares. Así, su uso permite reconocer cuellos de botella productivos, analizar opciones de manejo y justificar medidas para fortalecer la resiliencia del sector agrícola (García, et al., 2020.). Por lo tanto, el estudio se vuelve importante al proporcionar información técnica que pueda dar solución a los problemas actuales de la agricultura ecuatoriana y mejorar el manejo del cultivo ante la variabilidad climática (Aguilar, et al., 2017).

El maíz es uno de los principales cultivos en Ecuador por la demanda en los mercados nacionales e internacionales, pero su producción ha variado en los últimos años. Esta vulnerabilidad está relacionada con la persistencia de prácticas tradicionales, la baja adopción de tecnologías de gestión y la falta de sistemas de vigilancia climática para anticipar riesgos. Los cambios de temperatura y precipitación han afectado el desarrollo del cultivo, generando ciclos irregulares de producción y disminuyendo la capacidad de respuesta de los agricultores. A esto se suma que la mayoría de los productores son pequeños y medianos agricultores con pocos recursos para implementar medidas de adaptación, lo que agudiza la vulnerabilidad del sistema productivo y compromete la sostenibilidad del cultivo.

Si no se toman medidas de mitigación y adaptación, el rendimiento del maíz se irá reduciendo con el tiempo a causa del cambio climático. Los cambios en los regímenes de lluvia,

el aumento de sequías y el aumento gradual de temperaturas impactarán directamente en el desarrollo del cultivo, creando un ambiente de inestabilidad productiva, esto podría interrumpir el abasto nacional y hacer más vulnerable a las familias campesinas que dependen del maíz como principal fuente de ingreso. Pero la falta de estrategias soportadas en herramientas de modelación limitará la capacidad de los productores para anticipar escenarios negativos y tomar medidas preventivas. Sin un manejo técnico para manipular densidades de siembra, fechas de siembra y prácticas de conservación de suelo, se aumentará el riesgo de pérdidas económicas y se disminuirá la rentabilidad del cultivo. Esto puede generar flujos migratorios rurales, agudizar desigualdades y deteriorar el tejido productivo en áreas rurales, desestabilizando la seguridad alimentaria y el desarrollo territorial. El maíz (*Zea mays* L.) sigue siendo un cultivo estratégico en el sistema agroalimentario ecuatoriano, sustentando la economía rural y abasteciendo las cadenas de consumo humano, animal e industrial (Varshney, et al.2021). Su importancia se manifiesta en la dependencia que miles de productores tienen hacia este cereal como una fuente de ingreso y estabilidad económica. Sin embargo, en los últimos años su productividad se ha visto amenazada por los impactos del cambio climático, manifestados en alteraciones en el régimen de lluvias, elevación de temperaturas y mayor incidencia de eventos climáticos extremos.

Ante esta situación, la modelación agrícola es una herramienta informática esencial para predecir escenarios y analizar la respuesta del cultivo ante diferentes condiciones climáticas (Deras, 2020). En específico, el modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) es capaz de simular el crecimiento, desarrollo y rendimiento del maíz en función de datos climáticos, edáficos y de manejo, su aplicación ha sido verificada en los Andes, con capacidad para predecir con exactitud variables agronómicas y evaluar estrategias de adaptación frente a la variabilidad climática. La importancia de la investigación radica en combinar la modelación agroclimática con datos reales de la planta de maíz en condiciones locales y

densidades de siembra de temporada lluviosa. Esta metodología permitió reconocer patrones de comportamiento productivo y modelar escenarios que ayuden a disminuir la incertidumbre en la planificación agrícola. Al usar datos simulados y de campo, la investigación proporciona información validada que contribuye a entender mejor el cultivo en condiciones climáticas actuales y futuras.

Además, la investigación crea información valiosa para la administración agrícola y las políticas de resistencia climática. Los resultados sientan las bases para hacer recomendaciones técnicas que mejoren el rendimiento, sean más eficientes en el uso de los recursos y mejoren la capacidad de los agricultores para hacer frente a la variabilidad climática. Esta evidencia se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular con aquellos relacionados con seguridad alimentaria y acción climática, para el desarrollo de estrategias que fomenten sistemas agrícolas sostenibles y adaptados al contexto ecuatoriano, (Herrera-Jácome, et al., 2023).

Los autores expresan su sincero agradecimiento al grupo de investigación “Desarrollo Agropecuario y Gestión Sostenible” de la Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas (FCPB) por el acompañamiento académico, el respaldo técnico y el trabajo colaborativo que hicieron posible esta investigación. Asimismo, se reconoce a la Dirección de Investigación, Ciencia y Tecnología por el soporte institucional brindado en el marco de la Décima Convocatoria del Fondo Competitivo de Investigación, Ciencia y Tecnología (FOCICYT) 2024–2026 de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ). De manera especial, se agradece a BASF por su valioso apoyo y las facilidades otorgadas para la ejecución de las actividades de campo, contribuyendo significativamente a la calidad de la información generada.

Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque de modelización y simulación, utilizando el modelo DSSAT como principal herramienta metodológica para analizar el comportamiento

reproductivo y productivo del maíz frente a escenarios asociados al cambio climático. Se aplicó el método de observación para el seguimiento sistemático de las fases fenológicas del cultivo, registrando semanalmente variables climáticas, fisiológicas y de rendimiento. De manera complementaria, el método deductivo permitió interpretar los resultados a partir de referentes bibliográficos sobre la incidencia de factores climáticos en cultivos agrícolas, mientras que el método explicativo facilitó el análisis de la relación entre las variables climáticas simuladas y las respuestas agronómicas del maíz, evidenciando los efectos del cambio climático sobre su desarrollo reproductivo.

Las fuentes de información incluyeron datos primarios generados por el modelo DSSAT, tales como rendimiento, biomasa e indicadores de eficiencia en el uso de agua y nutrientes, los cuales fueron contrastados y contextualizados con datos de campo provenientes de un sistema convencional de siembra. De forma complementaria, se recurrió a fuentes secundarias como artículos científicos, libros especializados, manuales técnicos y bases de datos académicas sobre cambio climático y modelación agrícola. El diseño de la investigación no respondió a un esquema experimental clásico, dado que se basó en simulaciones computacionales con datos históricos y agronómicos; por ello, el análisis se estructuró mediante tablas de frecuencia para identificar patrones y asociaciones entre variables dependientes biomasa, índice de cosecha, días a floración y materia seca acumulada y variables independientes de tipo climático, edáfico, agronómico y paramétrico definidos en DSSAT.

El tratamiento de los datos se realizó mediante indicadores estadísticos que permitieron evaluar la exactitud y confiabilidad del modelo DSSAT frente a datos observados de campo. Se emplearon el coeficiente de correlación de Pearson (r) para medir la relación lineal entre valores simulados y observados (Rodríguez, 2019), el error cuadrático medio (RMSE) para cuantificar la magnitud del error (Espinoza, 2020), el error cuadrático medio normalizado $CV(RMSE)$ para comparar variables de distinta escala, el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF) para

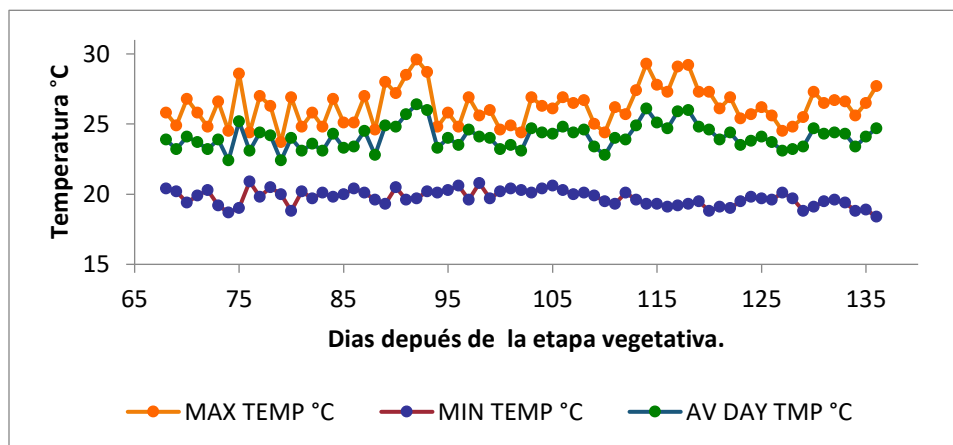
evaluar el ajuste global del modelo (Rodríguez, 2019), y el índice de concordancia de Willmott (d) para estimar la concordancia general entre simulaciones y observaciones (Gaviria & Márquez, 2020). Estos indicadores permitieron validar el desempeño del modelo y fortalecer la capacidad predictiva del estudio en la evaluación de escenarios climáticos y estrategias de manejo agrícola.

Análisis de Resultados

Temperatura

En la figura 2 se puede observar la fluctuación de la temperatura en un periodo de crecimiento vegetal. Los resultados indican una temperatura máxima (Tmax) que fluctuó entre 23.7 °C y 29.6 °C y una temperatura mínima (Tmin) más estable, entre 18.4 °C y 20.9 °C; la estabilidad de la temperatura mínima es determinante, ya que de ella dependen los grados día acumulados, una medida del tiempo fisiológico del cultivo, (Valencia, et al., 2023). Esta estabilidad nocturna o en periodos de menor radiación solar, tal como se aprecia en los datos, es fundamental para un desarrollo predecible de la planta, en tanto que oscilaciones erráticas podrían alterar la fructificación y el crecimiento en general.

Figura 1. Temperatura

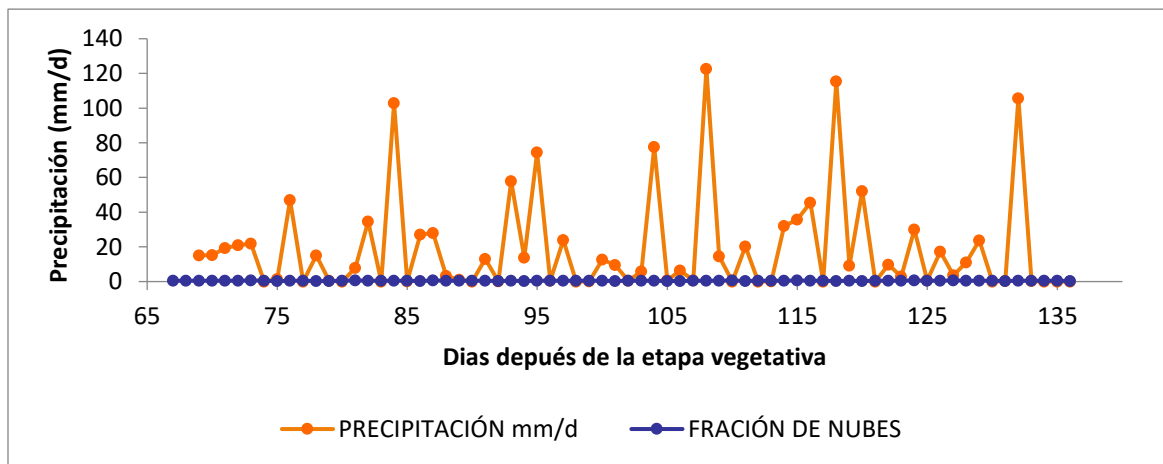


Fuente: Tomado de Boletín Agroclimático. Decadal 21 al 31 de octubre 2025. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2025.

Precipitación y nubosidad

La Figura 3 evidencia una alta variabilidad en la precipitación, con valores diarios que oscilaron entre 0 mm y 122.60 mm, reflejando un patrón climático típico de zonas tropicales. Esta irregularidad representa un desafío considerable para la gestión agrícola, ya que influye directamente en la disponibilidad hídrica durante las etapas críticas del cultivo. En la investigación de (39), señalan que esta variabilidad obliga a utilizar herramientas predictivas como DSSAT para anticipar escenarios y reducir riesgos. Asimismo, (Valencia, et al., 2023), la fracción de nubosidad mostró valores entre 0.26 y 0.67, evidenciando periodos de cielos despejados y otros de cobertura moderada. Esta dinámica influye en la radiación disponible para la fotosíntesis y en la regulación térmica del cultivo, aspectos que, según determinan buena parte del rendimiento.

Figura 2. Precipitación y nubosidad diaria



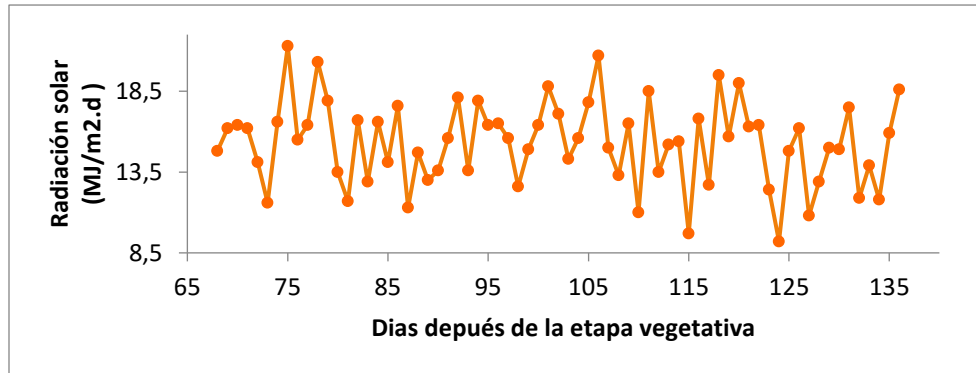
Fuente: Tomado de Boletín Agroclimático. Decadal 21 al 31 de octubre 2025. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2025.

Radiación solar

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la radiación solar, variable fundamental para los procesos fotosintéticos de crecimiento vegetal. Existe una gran dispersión de los valores, que varían entre $9.2 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ y $21.3 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. Esta variación diaria de la energía lumínica

disponible influye directamente en la productividad del cultivo. Como señala (Deras, 2020), la radiación solar es un factor que influye en la energía acumulada para el crecimiento de las plantas. Los valores extremos de radiación que se aprecian en la gráfica son típicos de zonas tropicales en las que la nubosidad y la lluvia oscilan.

Figura 3. Radiación solar



Fuente: Tomado de Boletín Agroclimático. Decadal 21 al 31 de octubre 2025. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2025.

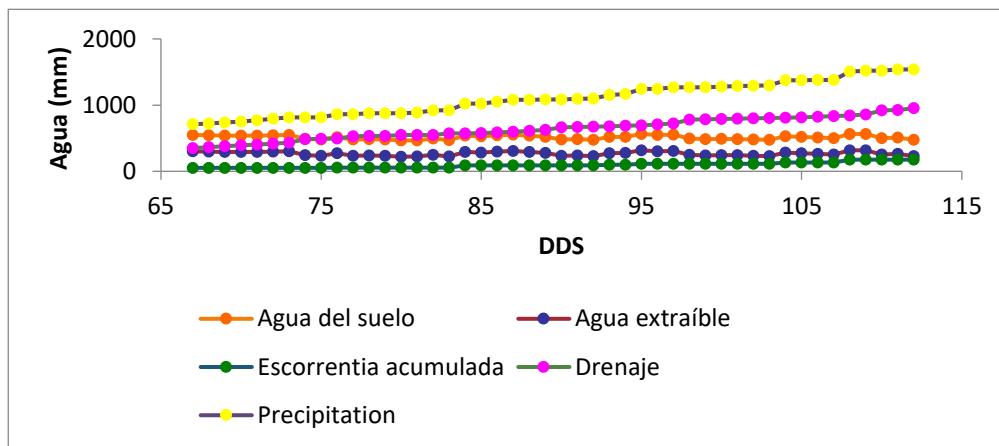
Suelo de escenario 1

En la Figura 5, se observa que el balance hídrico del suelo en la fase reproductiva, mostrando las tendencias de cinco variables principales: precipitación, drenaje, escurrimiento, extracción de agua del suelo y agua total en el suelo. La precipitación que varía entre 738 mm y 1571 mm es la mayor fuente de entrada de agua al sistema y su incremento continuo evidencia un periodo de acumulación hídrica. La sustracción de agua del suelo (220 - 319 mm), que es el agua absorbida por las raíces de la planta, tiende a aumentar y es variable. Esto denota una gran exigencia hídrica por parte del cultivo, que es una necesidad fisiológica de la planta y depende de las condiciones ambientales, como la radiación solar y la temperatura (Liu et al. 2021).

En cuanto a las salidas de agua del sistema, el drenaje (378 - 959 mm) y la escurrimiento acumulada (53-176 mm) se comportan de manera diferente. El drenaje, que es la percolación

del agua a través del perfil del suelo, va en aumento: de 350 mm a 950 mm; esto indica que el suelo está saturado en muchos puntos y el agua sobrante no puede ser retenida, en dependencia de la magnitud de la lluvia. Por el contrario, la escorrentía acumulada va en aumento de forma más lenta, lo que puede ser un indicativo de que la orografía y la capacidad de infiltración del suelo se encargan de gestionar la mayor parte de los excesos de lluvia mediante el drenaje. La variable agua total en el suelo (466 – 565 mm), que es la cantidad de agua disponible en el perfil del suelo, permanece constante. Este equilibrio entre entradas (lluvia) y salidas (drenaje, escorrentía y extracción) indica una regulación por el sistema suelo-planta, pero con pérdidas significativas por drenaje, a tener en cuenta para mejorar el riego y evitar la lixiviación de nutrientes, como indican estudios de dinámica hídrica en suelos agrícolas (Velásquez, 2021).

Figura 4. Suelo escenario 1



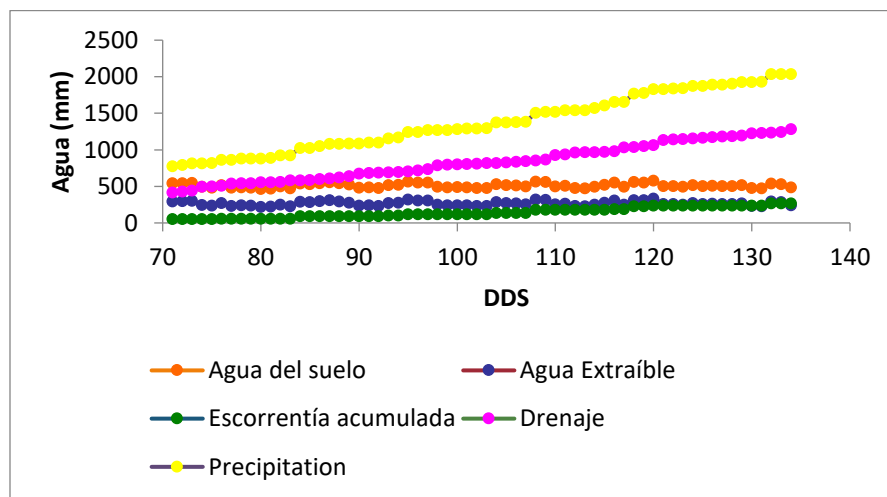
Fuente: Tomado de Boletín Agroclimático. Decadal 21 al 31 de octubre 2025. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2025.

Suelo escenario 2

En la Figura 6 se puede observar que el balance hídrico del suelo, donde la precipitación es la principal entrada de agua y va acumulándose desde 738 mm hasta más de 2035 mm, demostrando las zonas variables tropicales (18). En respuesta, el drenaje profundo se elevó (387–1304 mm), lo que sugiere saturación del suelo y riesgo de lixiviación de nutrientes. Por el

contrario, la captación de agua por el cultivo se mantuvo constante (213-333 mm), lo que indica una demanda hídrica constante a pesar de los excedentes de lluvia. El agua total en el suelo siguió una tendencia creciente con pequeñas oscilaciones, lo que indica un equilibrio entre entradas y salidas. Estos resultados concuerdan con lo expresado por (García, et al. 2020), que señalan la necesidad de una gestión eficiente del agua para el desarrollo de cultivos y la conservación de recursos.

Figura 5. Suelo escenario 2



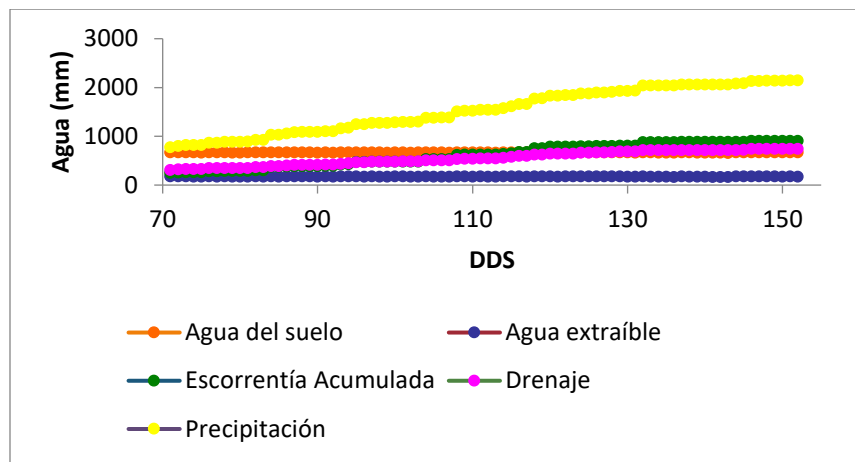
Fuente: Tomado de Boletín Agroclimático. Decadal 21 al 31 de octubre 2025. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2025.

Suelo escenario 3

En la figura 7 se ilustra la dinámica del balance hídrico del suelo en el periodo de crecimiento del cultivo. La precipitación como principal fuente de agua aumentó de 750 mm a más de 2000 mm (Espinoza, 2020). Igualmente, el drenaje se incrementó gradualmente (300-750 mm), se saturó y provocó pérdida de nutrientes por lixiviación. La absorción por las raíces se mantuvo constante en 650 mm, lo que demuestra una máxima absorción sin aprovechar el agua excedente.

La escorrentía acumulada fue pequeña, lo que indica que el agua sobrante se perdió principalmente por percolación profunda. Finalmente, el agua total en el suelo aumentó ligeramente, con un equilibrio dinámico entre entradas y salidas. De acuerdo con lo estudios de (Caviedes, et al. 2022) estos resultados demuestran la importancia de una eficiente gestión del agua para asegurar el rendimiento del cultivo y la conservación de nutrientes.

Figura 6. Suelo escenario 3



Fuente: Tomado de Boletín Agroclimático. Decadal 21 al 31 de octubre 2025. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2025.

Descripción el comportamiento reproductivo del cultivo de maíz bajo las diferentes densidades de siembra en época lluviosa.

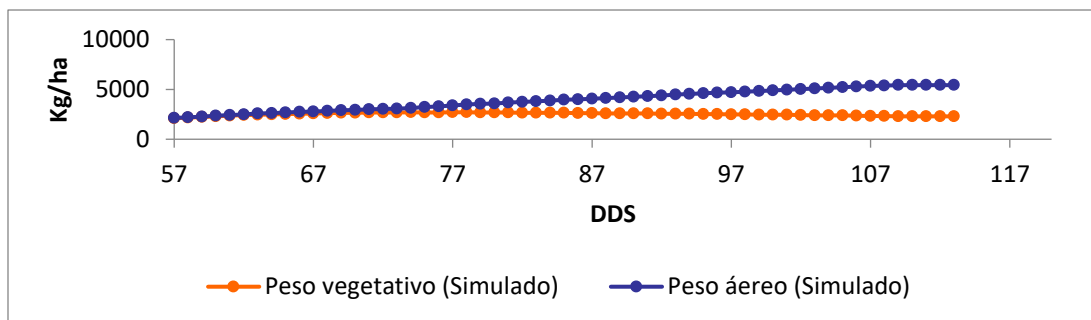
Escenario 1: peso vegetativo y peso aéreo

En la figura 8 se observa que el peso vegetativo y el peso aéreo aumentaron con los días después de siembra (DDS), pero en diferentes tendencias. El peso aéreo sigue en ascenso y supera los 5000 kg·ha⁻¹ al final del ciclo, lo que demuestra la gran acumulación de biomasa en estructuras reproductivas y de sostén. Por el contrario, el peso vegetativo es máximo próximo a la floración (2700 kg·ha⁻¹), para luego descender, como es característico, al movilizar la planta sus reservas hacia el grano. Esto concuerda con lo reportado por (García & Hernández, 2023),

que indica que en la etapa reproductiva el maíz favorece la movilización de carbohidratos hacia la mazorca, disminuyendo el crecimiento foliar.

Esta relación indica una eficiencia fisiológica apropiada bajo la densidad de siembra estudiada en el escenario 1, en que la competencia no restringe el desarrollo del cultivo. El aumento constante de peso aéreo indica que el modelo DSSAT simula adecuadamente el cambio de fase vegetativa a reproductiva, la cual es determinante para calcular la producción final. Según (Sáez et al. 2024), la pendiente positiva del peso aéreo se relaciona con el aumento en la tasa de llenado de grano y la estabilidad de la fotosíntesis en la fase crítica del cultivo; el comportamiento muestra un buen desarrollo reproductivo con una acumulación continua de biomasa aérea y redistribución eficiente de fotoasimilados.

Figura 7. Escenario 1: peso vegetativo y peso aéreo



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

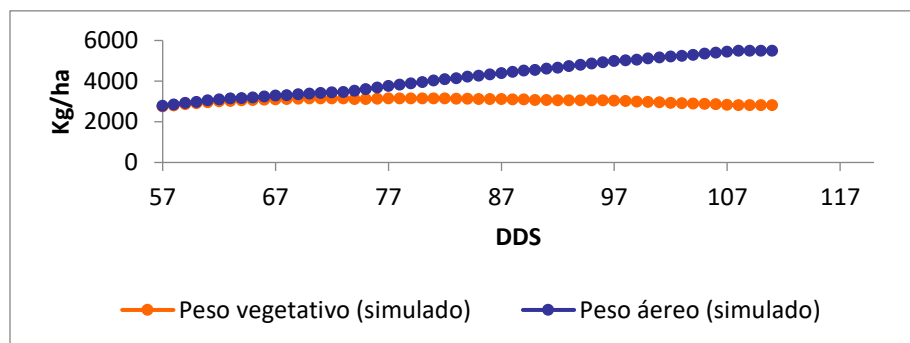
Escenario 2: peso vegetativo y peso aéreo

En la figura 9 se presenta el escenario 2, donde la curva de peso aéreo sigue una pendiente positiva y continua, superando los 5400 kg·ha⁻¹ al final del ciclo, similar al Escenario 1 pero con un incremento más suave. Esto muestra que la estructura reproductiva del cultivo pudo acumular biomasa más eficientemente, lo que implica menos competencia interna bajo esa densidad de siembra. El peso vegetativo, en cambio, llega a su máximo alrededor de 3150 kg·ha⁻¹ a los 75–80 DDS, para luego disminuir levemente, en concordancia con la reorganización

metabólica característica de la etapa de llenado de grano. Según (López, 2009), esta disminución es esperable, ya que la planta trasloca carbohidratos desde las partes vegetativas hacia la mazorca. El patrón sugiere una correcta transición fisiológica hacia la fase reproductiva.

Además, la disparidad cada vez mayor entre el peso aéreo y el peso vegetativo a partir de los 80 DDS demuestra que el cultivo tiene mayor capacidad para dirigir fotoasimilados hacia la producción, lo cual concuerda con (Remache, et al. 2017), en simulaciones DSSAT para maíz en áreas tropicales. Esto indica que la densidad utilizada aquí promovió un mejor balance entre crecimiento y competencia por recursos, lo que permitió la acumulación continua de biomasa aérea sin afectar el desarrollo foliar. En conjunto, el incremento en el peso aéreo y la estabilización del peso vegetativo indican un buen desarrollo reproductivo, en relación con un ambiente eficiente en la producción de grano.

Figura 8. Escenario 2: peso vegetativo y peso aéreo



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

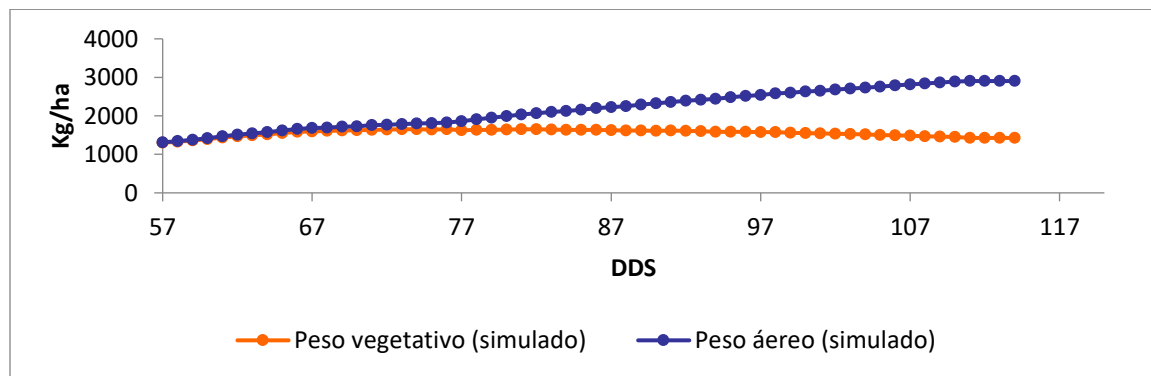
Escenario 3: peso vegetativo y peso aéreo

En la figura 10, el Escenario 3, el peso aéreo muestra un incremento continuo desde los primeros días después de siembra, alcanzando aproximadamente 2900 kg·ha⁻¹ hacia el final del ciclo. Esta trayectoria ascendente indica que, a pesar de una densidad más ajustada, el cultivo logra acumular biomasa aérea de manera sostenida, lo que refleja un proceso reproductivo

activo. En contraste, el peso vegetativo alcanza un máximo cercano a 1650 kg·ha⁻¹ alrededor de los 70-80 DDS, para luego iniciar un descenso gradual acorde con la movilización de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos.

Este comportamiento coincide con lo descrito por (Guamán, et al. 2020.), quien señala que en densidades más altas la planta prioriza el llenado de grano frente al crecimiento foliar. La diferencia marcada entre ambas curvas evidencia un desarrollo reproductivo concentrado y eficiente. Además, la menor magnitud de ambas curvas en comparación con los escenarios previos sugiere que la densidad empleada en este caso generó mayor competencia entre plantas por luz, agua y nutrientes, lo cual reduce la acumulación total de biomasa. No obstante, la estabilidad del ascenso en el peso aéreo confirma que el modelo DSSAT reproduce adecuadamente la partición de carbohidratos hacia las estructuras reproductivas, incluso en condiciones de recursos limitados. Así lo manifiesta esta respuesta es típica en cultivos bajo densidades elevadas, donde se observa un equilibrio más ajustado entre crecimiento vegetativo y productivo.

Figura 9. Escenario 3: peso vegetativo y peso aéreo



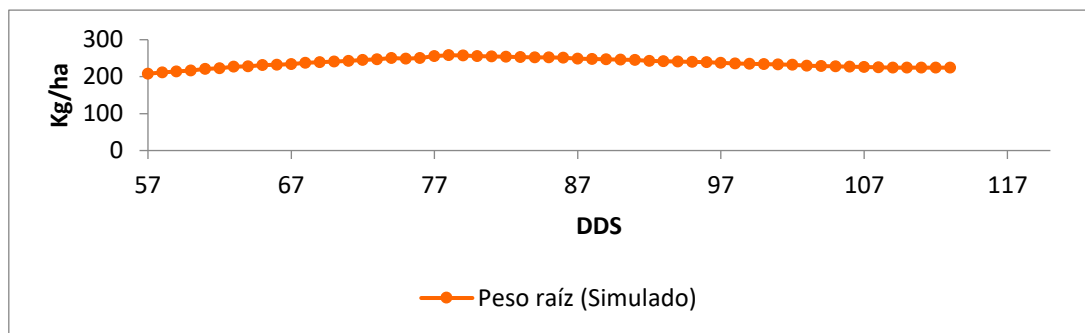
Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Dinámica del peso de raíz del cultivo de maíz (simulado en DSSAT) durante la etapa reproductiva

Escenario 1 – Peso de raíz (Simulado)

En la Figura 11, el Escenario 1, el peso de raíz va aumentando desde unos 205 kg·ha⁻¹ hasta un máximo próximo a 260 kg·ha⁻¹ en torno a los 75-80 DDS. Este comportamiento indica una etapa de expansión radicular que coincide con la entrada del cultivo en sus primeras etapas reproductivas, en las cuales se incrementa la demanda hídrica y de nutrientes. Luego, el peso de raíz comienza a disminuir, lo que refleja la translocación de fotoasimilados hacia estructuras aéreas y reproductivas. De acuerdo con esta reducción es común en cultivos de maíz cuando la planta favorece el llenado de grano sobre el crecimiento subterráneo. En general, la curva apoya un desarrollo radicular funcional en relación con un ciclo reproductivo activo. La caída posterior al punto máximo indica que la densidad aquí empleada permitió un adecuado desarrollo radicular sin competencia entre plantas. A pesar de la pérdida de peso, la estabilidad de la curva sugiere que la raíz conservó su capacidad de soporte fisiológico durante el resto del ciclo, determinante para la absorción de agua y nutrimentos en la fase de llenado de mazorca. Señalan (Hasang, et al. 2021) que en condiciones tropicales DSSAT simula adecuadamente esta dinámica al reflejar la disminución natural de biomasa radicular en etapas avanzada.

Figura 1 Escenario 1 – Peso de raíz (Simulado)



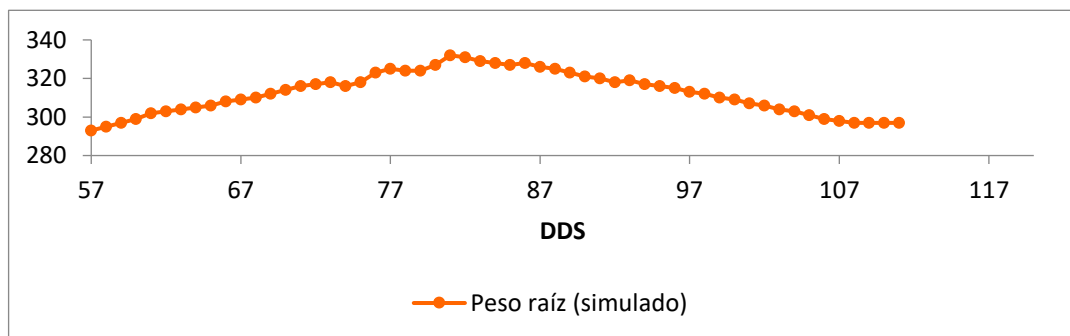
Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Escenario 2 – Peso de raíz (Simulado)

En la figura 12 el Escenario 2, muestra que el peso de raíz parte de alrededor de 292 kg·ha⁻¹ y aumenta linealmente hasta un máximo de alrededor de 333 kg·ha⁻¹ a los 80 DDS. Este aumento drástico indica una etapa de intensa expansión radicular, posiblemente en respuesta a la competencia por recursos y para estabilizar la planta en condiciones de mayor densidad de siembra. Las oscilaciones previas al pico sugieren adaptaciones fisiológicas en anticipación a la disponibilidad hídrica de la temporada lluviosa. Como se ha explicado en estudios previos, (Pérez, 2014), ambientes más competitivos la planta tiende a destinar más a raíces al principio para garantizar absorción antes que al llenado de grano.

Luego, el peso radicular disminuye continuamente hasta estabilizarse en 297 kg·ha⁻¹, lo que demuestra una translocación de fotoasimilados hacia los órganos reproductivos en las etapas de llenado de grano. Esta tendencia concuerda con lo que se espera en plantas sometidas a mayor estrés por densidad, en las que la raíz deja de ser prioritaria tras asegurar el soporte fisiológico. Cartagena indica que DSSAT lo modela, ya que simula este comportamiento al irse reduciendo la biomasa radicular a medida que avanza la fase reproductiva (Cartagena, 2021).

Figura 2 Escenario 2 – Peso de raíz (Simulado)



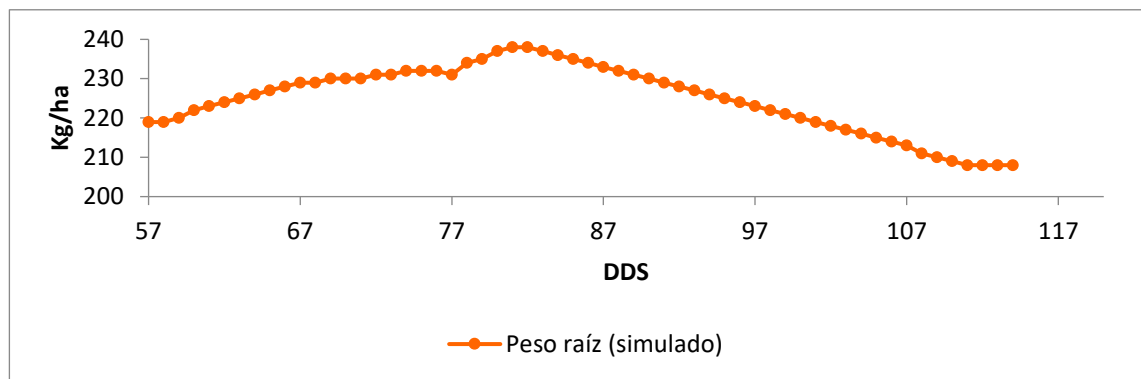
Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Escenario 3 – Peso de raíz (Simulado)

La figura 13 del Escenario 3 se puede notar que el peso de raíz comienza alrededor de 219 kg·ha⁻¹ y va en aumento hasta llegar a 238 kg·ha⁻¹ aproximadamente entre los 75 y 80

DDS. Este incremento gradual sugiere que el sistema radicular continuó desarrollándose, aunque en menor medida que en los casos anteriores, lo que podría atribuirse a la competencia entre plantas por una densidad de siembra mayor. La estabilización y pequeñas oscilaciones previas al máximo sugieren adaptaciones fisiológicas comunes en situaciones de limitación de recursos en el cultivo. Según la evidencia disponible (Vera, et al. 2020), en altas densidades las raíces crecen más compactas y menos ramificadas en respuesta al espacio. Después del punto máximo, la curva desciende abruptamente y se mantiene en alrededor de 207 kg·ha⁻¹ al final del ciclo, lo que indica una redistribución de fotoasimilados hacia las estructuras reproductivas durante el llenado de grano. Este comportamiento se ajusta a lo reportado por (Kephe, et al. 2021), ya que DSSAT simula adecuadamente la disminución de biomasa radical en fases reproductivas tardías, al priorizarse el rendimiento. La velocidad de caída en este caso indica que la competencia por nutrientes puede haber provocado una movilización más rápida de reservas desde la raíz hacia la parte aérea.

Figura 3 Escenario 3 – Peso de raíz (Simulado)



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Datos simulados vs. observados

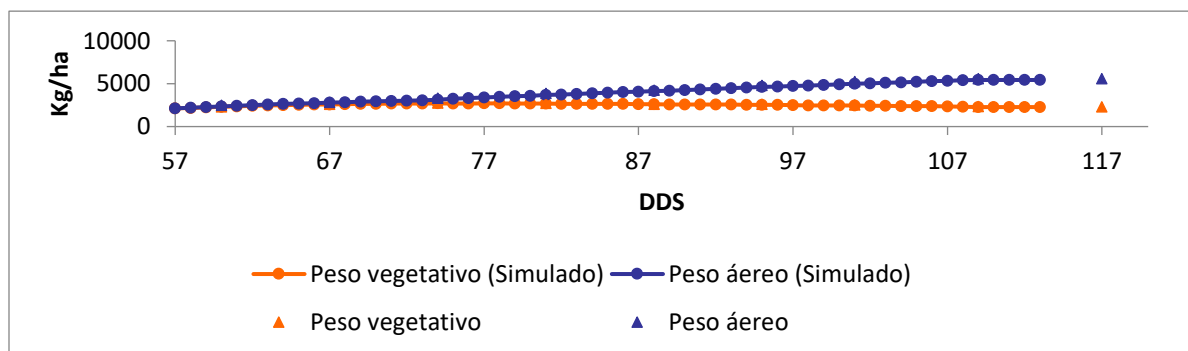
Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 1

En la Figura 14 y la Tabla 13 se explican detalles del escenario 1, donde se encontró que la simulación con DSSAT replica fielmente el comportamiento reproductivo del maíz sembrado en altas densidades. Esto se evidencia en los indicadores estadísticos, donde los valores de ajuste presentan ratios próximas a 1, coeficientes de determinación elevados ($R^2 = 0.981$ y 0.996) y una concordancia superior ($d\text{-Stat} > 0.97$). La similitud entre datos simulados y reales coincide con lo que informaron (19,47), ya que los modelos mecanísticos como DSSAT mejoran su precisión cuando hay buena disponibilidad hídrica, como ocurre en la temporada lluviosa.

Fisiológicamente, el peso vegetativo estable y el aumento gradual del peso aéreo indican una partición efectiva de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas, como en cultivos densos donde el sombreado favorece la partición hacia el llenado de grano. Además, la poca dispersión de los datos reflejada en un error cuadrático medio (RMSE) pequeño concuerda con lo reportado por (López, 2009) quienes encontraron patrones reproductivos predecibles en maíz cuando no hay estrés hídrico. Los resultados que arrojó la simulación, al reproducir de manera realista

la acumulación de biomasa aérea en condiciones tropicales húmedas, concuerdan con lo reportado por (Alarcón, 2015). Desde el punto de vista agronómico, (Vargas & García, 2022) destacan que la sanidad del cultivo promueve una partición más eficiente de biomasa en etapas tardías, lo que se manifiesta en la regularidad productiva encontrada en este estudio.

Figura 4. *Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 1*



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Tabla 1. Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 1

	Variable	Peso vegetativo kg/ha	Peso de la parte aérea kg/ha
Media	Observada	2555	4050
	Simulada	2515	3887
	Ratio	0.98	0.95
Desv. Est	Observada	153.37	1050.65
	Simulada	149.25	1018.46
	R ²	0.981	0.996
	Dif. media	-40	-164
	Dif. media abs.	40	164
	RMSE	44.75	175.52
	d-Stat.	0.97	0.99
	Obs. usadas	8	8
	N° total obs	9	9

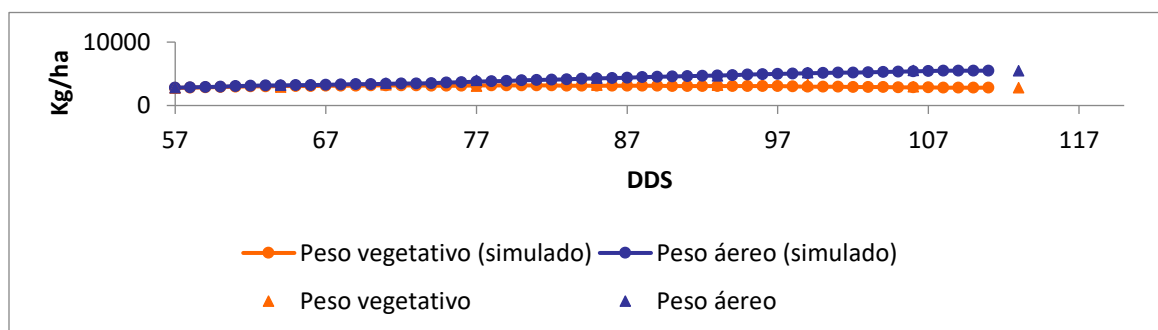
Nota: Abreviaturas: Media = promedio; Desv. Est. = desviación estándar; R² = coeficiente de determinación; Dif. media = diferencia media; Dif. media abs. = diferencia media absoluta; RMSE = raíz del error cuadrático medio; d-Stat. = índice de concordancia de Willmott (1981); Obs. usadas = número de observaciones utilizadas en el análisis; N° total obs = número total de observaciones consideradas.

Peso Vegetativo y Peso Aéreo Escenario 2

La figura 15 y tabla 14 del escenario 2, los datos simulados por DSSAT nuevamente se ajustan bien a los datos de campo, con ratios de 0.99 y 0.97 y coeficientes de determinación mayores a 0.94. Este grado de adaptación concuerda con lo reportado por (18), donde la exactitud del modelo mejora en condiciones de competencia moderada entre plantas, las cuales se dan en densidades intermedias La estabilidad en la simulación del peso vegetativo coincide con lo reportado por (Can et al. 2021), que señalan que en condiciones húmedas la transición de la fase vegetativa a la reproductiva implica una disminución gradual en la acumulación foliar, pero la biomasa aérea sigue aumentando. Además, la suavidad de la pendiente en la biomasa simulada concuerda con lo encontrado por (Eitzinger, et al. 2017), quienes encontraron que DSSAT tiende a subestimar ligeramente el peso aéreo en el período de llenado de grano, lo que justifica las diferencias medias negativas encontradas. Las desviaciones más bajas en RMSE y la concordancia casi perfecta (d-Stat > 0.97) concuerdan con los resultados de (Abayechaw ,

2023), encontraron que, en condiciones tropicales húmedas, la variabilidad climática influye poco en la precisión del modelo. Desde la mirada agronómica, la estabilidad en el comportamiento reproductivo se alinea a lo que reportan en que una buena sanidad del cultivo promueve la eficiencia en la redistribución de fotoasimilados. El modelo describe bien la reproducción del maíz en densidad intermedia, con consistencia fisiológica y buena estadística en condiciones lluviosas.

Figura 5 *Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 2*



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Tabla 2. *Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 2*

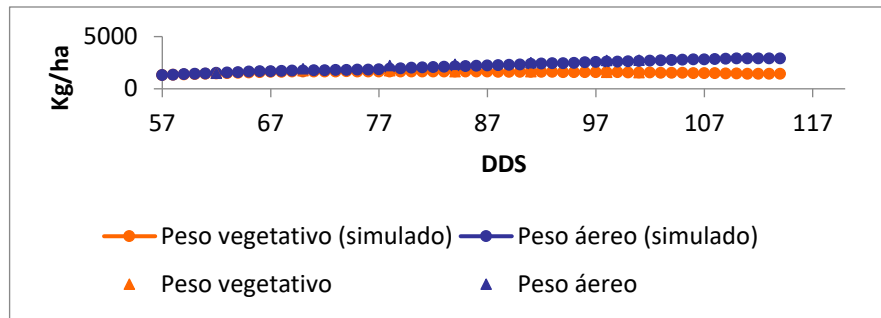
	Variable	Peso vegetativo kg/ha	Peso de la parte aérea kg/ha
Media	Observada	3048	4165
	Simulada	3017	4078
	Ratio	0.99	0.97
Desv. Est	Observada	126.04	890.42
	Simulada	132.27	880.02
	R ²	0.944	0.991
	Dif. media	-31	-88
	Dif. media abs.	31	106
	RMSE	44.31	120.48
	d-Stat.	0.97	0.99
	Obs. usadas	8	8
	N° total obs	9	9

Nota: Abreviaturas: Media = promedio; Desv. Est. = desviación estándar; R² = coeficiente de determinación; Dif. media = diferencia media; Dif. media abs. = diferencia media absoluta; RMSE = raíz del error cuadrático medio; d-Stat. = índice de concordancia de Willmott (1981); Obs. usadas = número de observaciones utilizadas en el análisis; N° total obs = número total de observaciones consideradas.

Peso Vegetativo y Peso Aéreo Escenario 3

La figura 16 y tabla 15 del escenario 3, el modelo DSSAT mostró nuevamente una alta capacidad para reproducir el comportamiento reproductivo del cultivo de maíz bajo la densidad baja, evidenciada por la estrecha relación entre los valores observados y simulados tanto para el peso vegetativo como para el peso aéreo, con ratios cercanos a 1 (0.98 y 0.94, respectivamente).

Los coeficientes de determinación ($R^2 = 0.933$ y 0.963) confirman una concordancia sólida entre ambas series, mientras que los valores elevados del índice de concordancia de Willmott (d-Stat = 0.96 y 0.97) indican que la trayectoria temporal del crecimiento fue representada con alta precisión por el modelo. Las diferencias medias moderadas y los valores aceptables de RMSE (51.33 y 163.56) sugieren que DSSAT reprodujo adecuadamente la dinámica fisiológica esperada: un incremento inicial del peso vegetativo hasta alcanzar un pico y su posterior estabilización o ligera disminución, junto con un incremento progresivo del peso aéreo asociado a la priorización de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas. Este comportamiento coincide con lo reportado recientemente por quienes señalan que, en densidades bajas, la mayor disponibilidad de luz y menor competencia intraespecífica favorecen una transición fisiológica más gradual entre fases vegetativas y reproductivas. Asimismo, estudios como los de (Remache, et al. 2027) destacan que el maíz en ambientes lluviosos mantiene tasas fotosintéticas más estables, incluso bajo densidades reducidas, lo que explica la precisión obtenida en la simulación del peso aéreo. Desde el enfoque agronómico, la estabilidad en la acumulación de biomasa concuerda con lo señalado por quienes afirman que un cultivo con menor presión biótica y menor competencia por recursos tiende a mantener un desarrollo reproductivo más equilibrado. Los resultados demuestran que DSSAT representa con alta exactitud la acumulación de biomasa reproductiva en condiciones de densidad baja, validando su utilidad para modelar escenarios de manejo en época lluviosa.

Figura 6. Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 3


Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Tabla 3. Peso Vegetativo y Peso Aéreo- Escenario 3

Variable		Peso vegetativo kg/ha	Peso de la parte aérea kg/ha
Media	Observada	1576	2149
	Simulada	1544	2017
	Ratio	0.98	0.94
Desv. Est	Observada	140.57	496.02
	Simulada	119.40	469.41
	R2	0.933	0.963
Dif. media		-32	-132
Dif. media abs.		32	136
RMSE		51.33	163.56
d-Stat.		0.96	0.97
Obs. usadas		8	8
N° total obs		8	8

Nota: Abreviaturas: Media = promedio; Desv. Est. = desviación estándar; R² = coeficiente de determinación; Dif. media = diferencia media; Dif. media abs. = diferencia media absoluta; RMSE = raíz del error cuadrático medio; d-Stat. = índice de concordancia de Willmott (1981); Obs. usadas = número de observaciones utilizadas en el análisis; N° total obs = número total de observaciones consideradas.

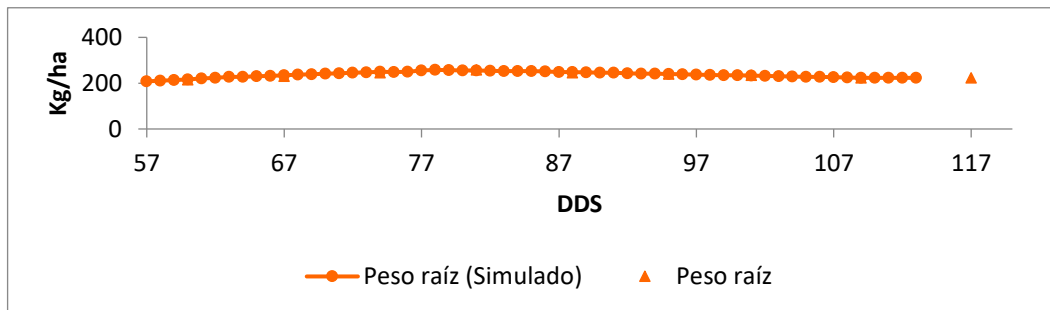
Peso Raíz Simulado- Escenario 1

La figura 17 y tabla 16, muestran los resultados del escenario 1 muestran una correspondencia casi perfecta entre los valores observados y simulados del peso de raíz, lo que

evidencia una excelente capacidad del modelo DSSAT para reproducir la dinámica subterránea del cultivo durante la etapa reproductiva. La ratio cercana a 1 (1.005) confirma que el promedio simulado coincide prácticamente con el observado, mientras que el alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.955$) indica una fuerte asociación lineal entre ambas series de datos. La reducida diferencia media (1 kg-ha⁻¹) y el muy bajo RMSE (2.89 kg/ha) señalan discrepancias mínimas, y el índice de concordancia d-Stat de 0.98 refuerza el alto grado de ajuste, sugiriendo que el modelo reproduce adecuadamente la trayectoria temporal del peso radical.

Este comportamiento es fisiológicamente coherente, ya que en densidades altas el sistema radical tiende a estabilizarse tras alcanzar su máximo, debido a la competencia intraespecífica por recursos y a la redistribución de fotoasimilados hacia estructuras reproductivas, una dinámica ampliamente documentada en estudios recientes sobre arquitectura y eficiencia funcional del sistema radical del maíz (4,39). A nivel agronómico, la estabilidad observada coincide con lo descrito por quienes destacan que un manejo sanitario adecuado permite mantener una fisiología subterránea eficiente aún en etapas avanzadas del ciclo. Los indicadores estadísticos y la coherencia biológica respaldan que el DSSAT representa con alta precisión el comportamiento del peso de raíz del maíz bajo condiciones de alta densidad en época lluviosa.

Figura 7. *Peso Raíz Simulado- Escenario 1*



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Tabla 4. Peso Raíz Simulado- Escenario 1

	Variable	Peso raíz
Media	Observada	236
	Simulada	238
	Ratio	1.005
Desv. Est	Observada	12.65
	Simulada	12.31
	R ²	0.955
	Dif. media	1
	Dif. media abs.	2
	RMSE	2.89
	d-Stat.	0.98
	Obs. usadas	8
	N° total obs	9

Nota: Abreviaturas: Media = promedio; Desv. Est. = desviación estándar; R² = coeficiente de determinación; Dif. media = diferencia media; Dif. media abs. = diferencia media absoluta; RMSE = raíz del error cuadrático medio; d-Stat. = índice de concordancia de Willmott (1981); Obs. usadas = número de observaciones utilizadas en el análisis; N° total obs = número total de observaciones consideradas.

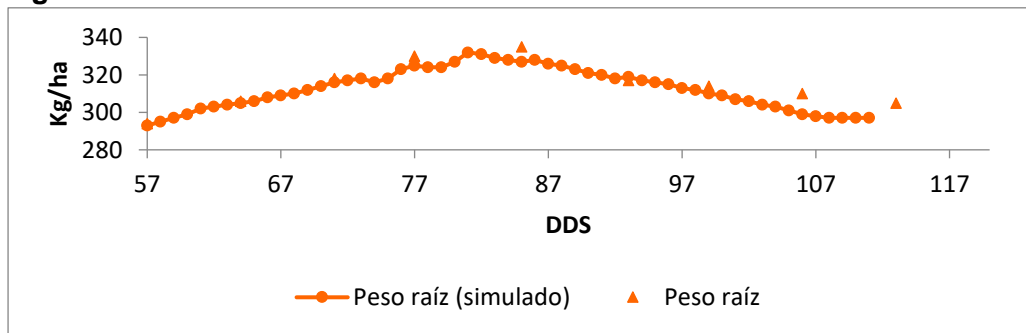
Peso Raíz Simulado- Escenario 2

En la Figura 18 y Tabla 17, el comportamiento del peso de raíz bajo densidad intermedia mostró una fuerte coincidencia entre los valores observados y simulados, lo cual se refleja en la ratio cercana a 1 (0.98), un coeficiente de determinación aceptable (R² = 0.896) y un índice de concordancia elevado (d-Stat = 0.94). Estos indicadores confirman que el modelo DSSAT logró representar adecuadamente la dinámica subterránea del cultivo durante la fase reproductiva. La pequeña diferencia media (-4g m⁻²) y el bajo RMSE indican que la desviación entre ambas series fue mínima, lo que sugiere que el modelo capturó el comportamiento fisiológico típico del sistema radical en maíz, cuyo crecimiento alcanza un máximo antes del llenado de grano y luego disminuye por senescencia funcional.

Este patrón coincide con estudios recientes, (Hasang, et al. 2021) quienes reportan que, en ambientes húmedos, el sistema radical incrementa su biomasa hasta la antesis y luego reduce

su actividad conforme avanza la reasignación de carbohidratos hacia los órganos reproductivos. Asimismo, investigaciones como las confirman que la estabilidad hídrica característica de la época lluviosa modera las fluctuaciones del crecimiento radical, favoreciendo curvas de descenso suave como las obtenidas en este escenario. Desde el ámbito agronómico, este comportamiento es coherente con lo expuesto por quienes destacan que cultivos con buen estado sanitario y disponibilidad constante de agua mantienen una mayor eficiencia fisiológica, permitiendo que las raíces sostengan su funcionalidad hasta etapas avanzadas. Los resultados muestran que, bajo densidad intermedia, el modelo DSSAT representa con solidez la dinámica del peso de raíz, exhibiendo alta coherencia fisiológica, precisión estadística y consistencia con la literatura reciente.

Figura 8. Peso Raíz Simulado- Escenario 2



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Tabla 5. Peso Raíz Simulado- Escenario 2

	Variable	Peso raíz
Media	Observada	316
	Simulada	312
	Ratio	0.98
Desv. Est	Observada	12.16
	Simulada	11.40
	R2	0.896
	Dif. media	-4
	Dif. media abs.	4
	RMSE	5.43
	d-Stat.	0.94
	Obs. usadas	8
	N° total obs	9

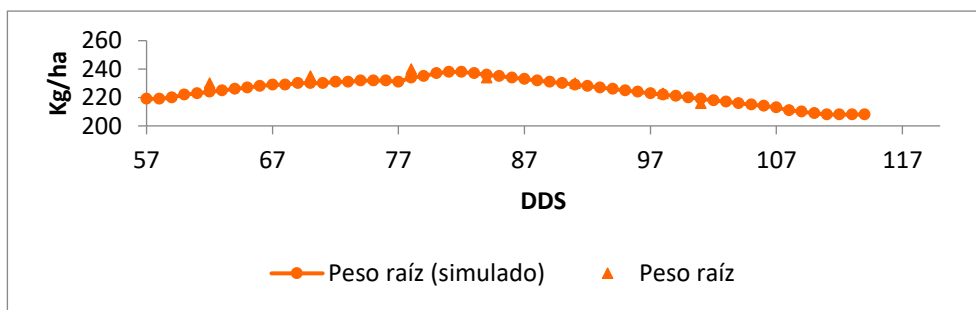
Nota: Abreviaturas: Media = promedio; Desv. Est. = desviación estándar; R² = coeficiente de determinación; Dif. media = diferencia media; Dif. media abs. = diferencia media absoluta; RMSE = raíz del error cuadrático medio; d-Stat. = índice de concordancia de Willmott (1981); Obs. usadas = número de observaciones utilizadas en el análisis; N° total obs = número total de observaciones consideradas.

Peso Raíz Simulado- Escenario 3

En la figura 19 y tabla 18 se observa la comparación entre los valores observados y simulados del peso de raíz muestra una alta coherencia, evidenciada por una ratio cercana a la unidad (0.98), una desviación estándar similar entre ambos conjuntos y un coeficiente de determinación elevado (R² = 0.954), lo que indica que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica subterránea del cultivo en densidad baja. El RMSE reducido (4.97) y el d-Stat de 0.91 confirman que la trayectoria simulada mantiene una concordancia robusta con los patrones reales, especialmente el ascenso inicial hasta el máximo y la posterior reducción asociada al reasignamiento de fotoasimilados durante el llenado de grano. Esta respuesta concuerda con reportes que señalan que, en sistemas de maíz bajo baja competencia intraespecífica, la biomasa radical tiende a estabilizarse y luego disminuir ligeramente conforme avanza el desarrollo reproductivo (Velásquez, 2021)

De igual forma, investigaciones recientes destacan que la reducción progresiva del peso radical se asocia al aumento de la demanda de carbono por estructuras reproductivas, un comportamiento descrito para ambientes húmedos y suelos con buena disponibilidad hídrica (6,7). Estos patrones fisiológicos también son coherentes con observaciones experimentales sobre la dinámica del sistema radical en maíz moderno, donde la raíz prioriza funciones de absorción y soporte antes que la acumulación continua de biomasa. Los indicadores estadísticos y la evidencia fisiológica reciente confirman que el modelo DSSAT representa con precisión el comportamiento del peso de raíz en este escenario, capturando tanto su estabilidad como su declive natural en etapas avanzadas del ciclo.

Figura 9. *Peso Raíz Simulado- Escenario 3*



Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Tabla 6. *Peso Raíz Simulado- Escenario 3*

	Variable	Peso raíz
Media	Observada	229
	Simulada	226
	Ratio	0.98
Desv. Est	Observada	10.09
	Simulada	6.32
	R2	0.954
	Dif. media	-3
	Dif. media abs.	4
	RMSE	4.97
	d-Stat.	0.91
	Obs. usadas	8
	N° total obs	8

Nota: Abreviaturas: Media = promedio; Desv. Est. = desviación estándar; R^2 = coeficiente de determinación; Dif. media = diferencia media; Dif. media abs. = diferencia media absoluta; RMSE = raíz del error cuadrático medio; d-Stat. = índice de concordancia de Willmott (1981); Obs. usadas = número de observaciones utilizadas en el análisis; N° total obs = número total de observaciones consideradas.

Escenario 1 Estado simulado del cultivo y suelo en las principales etapas de desarrollo

La Tabla 19 evidencia un comportamiento heterogéneo en la capacidad predictiva de DSSAT, con buenos ajustes en algunas variables fenológicas y estructurales, pero discrepancias relevantes en indicadores reproductivos y de rendimiento. El modelo reprodujo adecuadamente la madurez fisiológica (113 DDS simulados frente a 110 medidos), lo que coincide con su reconocida capacidad para estimar eventos fenológicos mayores en sistemas tropicales; sin embargo, la antesis fue sobreestimada (64 frente a 46 DDS), indicando una prolongación del periodo vegetativo, comportamiento reportado en ambientes húmedos donde la disponibilidad hídrica favorece el crecimiento foliar. Estas diferencias sugieren limitaciones en la representación de la transición vegetativo–reproductiva bajo las condiciones específicas del experimento.

Las mayores inconsistencias se observaron en los componentes del rendimiento y en variables fisiológicas. DSSAT estimó producción de grano y biomasa reproductiva cuando en campo no se registró rendimiento cosechado, además de subestimar el número de granos por unidad y sobreestimar su número por área, lo que apunta a deficiencias en la calibración genética del cultivar o en la simulación del estrés ambiental, tal como advierten estudios previos (Jaime, 2021). No obstante, el peso unitario del grano mostró una aproximación aceptable, coherente con investigaciones que señalan que el modelo predice mejor la masa del grano que la formación del número (18). La simulación de biomasa aérea y del subproducto presentó un desempeño satisfactorio, en concordancia con lo reportado para condiciones de adecuada disponibilidad hídrica (Sáez, et al. 2024.). En contraste, la representación del nitrógeno fue inconsistente, al

generar valores distintos de cero frente a mediciones reales nulas, lo que confirma limitaciones del módulo nutricional del modelo en sistemas tropicales sin fertilización cuantificada (Alarcón, 2017). Estas divergencias, junto con la subestimación del índice de área foliar y las diferencias en el índice de cosecha y variables morfológicas, refuerzan la necesidad de un proceso de calibración más riguroso para mejorar la coherencia entre las etapas críticas del desarrollo del cultivo (41).

Tabla 7. Escenario 1 Estado simulado del cultivo y suelo en las principales etapas de desarrollo

Variable	Simulado	Medido
Día de antesis (DDS)	64	46
Día de madurez fisiológica (DDS)	113	110
Rendimiento en cosecha a madurez (kg [ms]/ha)	2633	0
Número a madurez (no/m ²)	912	720
Peso unitario a madurez (g [ms]/unidad)	0,2887	0,3537
Número a madurez (no/unidad)	93,6	477
Peso de la parte aérea a madurez (kg [ms]/ha)	5429	5590
Subproducto producido (tallo) a madurez (kg [ms]/ha)	2834	2331
Índice de área foliar, máximo	1,02	90
Índice de cosecha a madurez	0,485	0,36
Nitrógeno en grano a madurez (kg/ha)	33	0
Nitrógeno en la parte aérea a madurez (kg/ha)	53	0
Nitrógeno en tallo a madurez (kg/ha)	19	0
Nitrógeno en grano a madurez (%)	1,3	0
Peso de la parte aérea en antesis (kg [ms]/ha)	2583	0
Nitrógeno en la parte aérea en antesis (kg/ha)	28	0
Número de hojas por tallo a madurez	23,15	0
Día de emergencia (DDS)	6	4

Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Escenario 2 Estado simulado del cultivo y suelo en las principales etapas de desarrollo

En la tabla 20, el escenario de baja densidad, el modelo DSSAT mostró comportamientos marcadamente contrastantes al compararse con los datos obtenidos en campo. Aunque la simulación reprodujo con buena aproximación la madurez fisiológica (114 vs. 105 días) y

mantuvo correspondencia aceptable en variables estructurales como el peso de la parte aérea (2904 vs. 2738 kg·ha⁻¹) y el subproducto del tallo (1769 vs. 1550 kg·ha⁻¹), presentó discrepancias sustanciales en las variables directamente asociadas al rendimiento y al desarrollo reproductivo.

El rendimiento simulado (1162 kg·ha⁻¹) fue muy superior al valor medido en campo (0 kg·ha⁻¹), evidenciando que el modelo no logró capturar las condiciones de estrés extremo que afectaron al cultivo. Este patrón se repitió en los componentes del rendimiento: el número de granos por metro cuadrado fue sobreestimado (398 vs. 730), al igual que el número de granos por unidad (55,6 vs. 492), lo cual sugiere que el modelo mantuvo un potencial genético teórico no expresado en la realidad debido a limitaciones ambientales no representadas, tales como estrés hídrico, deficiencias nutricionales o afectaciones fisiológicas características de sistemas de baja densidad.

El peso unitario del grano también fue ligeramente sobrestimado (0,2917 vs. 0,2647 g), en concordancia con la tendencia del modelo a sobrerrepresentar el llenado de grano cuando no incorpora adecuadamente procesos de aborto reproductivo o pérdidas post-fecundación, tal como señalan (13) y (45) para DSSAT y APSIM en escenarios de estrés. El índice de área foliar presentó diferencias moderadas (0,62 vs. 0,44), mostrando que el desarrollo vegetativo simulado no reflejó plenamente el crecimiento real, coincidiendo con lo descrito por (8), quienes indican que DSSAT subestima el IAF en condiciones de crecimiento limitado. Las variables de nitrógeno presentaron diferencias absolutas, ya que los datos medidos reportaron valores iguales a cero, lo cual impide validar el desempeño del modelo en los módulos de absorción, redistribución y partición de nitrógeno. Asimismo, variables como el peso aéreo en antesis (1621 kg·ha⁻¹), el nitrógeno aéreo en antesis y el número de hojas por tallo (23,3) no pueden ser contrastadas por ausencia de registros reales, aunque los valores simulados se mantienen dentro de rangos fisiológicamente plausibles.

Tabla 8. Escenario 2 Estado simulado del cultivo y suelo en las principales etapas de desarrollo

Variable	Simulado	Medido
Día de antesis (DDS)	63	73
Día de madurez fisiológica (DDS)	111	110
Rendimiento en cosecha a madurez (kg [ms]/ha)	2154	0
Número a madurez (no/m ²)	741	720
Peso unitario a madurez (g [ms]/unidad)	0,2906	0,2575
Número a madurez (no/unidad)	64,8	480
Peso de la parte aérea a madurez (kg [ms]/ha)	5491	5470
Subproducto producido (tallo) a madurez (kg [ms]/ha)	3388	2830
Índice de área foliar, máximo	1,43	1,2
Índice de cosecha a madurez	0,392	0,47
Nitrógeno en grano a madurez (kg/ha)	25	0
Nitrógeno en la parte aérea a madurez (kg/ha)	52	0
Nitrógeno en tallo a madurez (kg/ha)	24	0
Nitrógeno en grano a madurez (%)	1,2	0
Peso de la parte aérea en antesis (kg [ms]/ha)	3108	0
Nitrógeno en la parte aérea en antesis (kg/ha)	28	0
Número de hojas por tallo a madurez	22,89	0
Día de emergencia (DDS)	6	4

Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Escenario 3 Estado simulado del cultivo y suelo en las principales etapas de desarrollo

En la Tabla 21 se evidencian diferencias marcadas entre los valores simulados por DSSAT y los datos medidos en campo para el Escenario 3, particularmente en las etapas fenológicas y los componentes del rendimiento. El modelo subestimó la antesis (66 días simulados frente a 84 días observados) y presentó un desfase en la madurez fisiológica (114 días simulados frente a 105 días reales), lo que confirma limitaciones asociadas a la falta de calibración genética del híbrido empleado (36) y coincide con reportes que señalan desajustes fenológicos cuando la modelación no está ajustada a condiciones locales (Gaviria & Márquez, 2020). Estas diferencias se acentuaron en los componentes del rendimiento, donde el número de plantas a madurez, las mazorcas y, especialmente, el número de granos por mazorca fueron

ampliamente subestimados por el modelo, reflejando una limitada capacidad para representar la formación de estructuras reproductivas bajo este sistema de manejo (Rodríguez, et al. 2024).

Por el contrario, la simulación de la biomasa mostró una mayor concordancia con los datos observados, tanto en la biomasa aérea como en el tallo, lo que respalda estudios que destacan la mayor precisión de DSSAT para reproducir el crecimiento vegetativo y la acumulación de materia seca frente a la estimación del rendimiento en grano. Aunque el índice de área foliar fue sobreestimado, esta tendencia es común en escenarios de baja densidad, debido a la forma en que el modelo representa la competencia por luz. El mayor desacuerdo se presentó en la simulación del nitrógeno, ya que DSSAT estimó valores inexistentes en campo, situación atribuida a la ausencia de información edafológica detallada, limitación previamente documentada en investigaciones similares (38). En consecuencia, la simulación nutricional en este escenario requiere una calibración más precisa para mejorar su confiabilidad.

Tabla 9. *Escenario 3 Estado simulado del cultivo y suelo en las principales etapas de desarrollo*

Variable	Simulado	Medido
Día de antesis (DDS)	66	84
Día de madurez fisiológica (DDS)	114	105
Rendimiento en cosecha a madurez (kg [ms]/ha)	1162	0
Número a madurez (no/m ²)	398	730
Peso unitario a madurez (g [ms]/unidad)	0,2917	0,2647
Número a madurez (no/unidad)	55,6	492
Peso de la parte aérea a madurez (kg [ms]/ha)	2904	2738
Subproducto producido (tallo) a madurez (kg [ms]/ha)	1769	1550
Índice de área foliar, máximo	0,62	0,44
Índice de cosecha a madurez	0,4	0,3
Nitrógeno en grano a madurez (kg/ha)	14	0
Nitrógeno en la parte aérea a madurez (kg/ha)	29	0
Nitrógeno en tallo a madurez (kg/ha)	13	0
Nitrógeno en grano a madurez (%)	1,2	0
Peso de la parte aérea en antesis (kg [ms]/ha)	1621	0
Nitrógeno en la parte aérea en antesis (kg/ha)	14	0
Número de hojas por tallo a madurez	23,3	0
Día de emergencia (DDS)	6	4

Fuente: Elaboración propia del autor 2025

Conclusiones

El análisis de las condiciones agroclimatológicas durante la época lluviosa evidencia un entorno altamente propicio para el desarrollo fenológico del cultivo de maíz. Las temperaturas mínimas se mantuvieron estables y las máximas se ubicaron dentro de rangos compatibles con una adecuada acumulación térmica. La precipitación diaria osciló entre 0 y 122,6 mm y se acompañó de variaciones en la nubosidad (0,26–0,67), generando fluctuaciones en la disponibilidad de radiación y agua. No obstante, el balance hídrico confirma la presencia de suelos con elevada infiltración, escorrentía reducida y drenaje profundo, situación que favoreció la estabilidad de la humedad útil en los tres escenarios evaluados.

La evaluación del comportamiento reproductivo bajo distintas densidades de siembra demuestra que el Escenario 1 constituye la condición más eficiente para la expresión fisiológica del cultivo. Este escenario registró los valores más elevados de acumulación de biomasa aérea (3887 kg·ha⁻¹) y vegetativa (2515 kg·ha⁻¹), junto con los indicadores estadísticos de mayor precisión (ratios de 0,95 y 0,98; $R^2 = 0,996$ y $0,981$), lo que evidencia una representación robusta del comportamiento reproductivo. El Escenario 2 presentó una respuesta aceptable, aunque con menor consistencia estadística; mientras que el Escenario 3 reflejó una acumulación de biomasa limitada, atribuible a un incremento en la competencia por recursos derivados de la densidad utilizada.

La comparación entre las simulaciones del modelo DSSAT y los datos observados en campo revela un desempeño altamente consistente en la estimación de biomasa, especialmente en el Escenario 1, donde el peso de raíz observada (236 kg·ha⁻¹) y la estimada (238 kg·ha⁻¹) muestran un ajuste excelente (ratio 1.005; $R^2 = 0,955$; RMSE = 2,89 kg·ha⁻¹). Los escenarios 2 y 3 también evidenciaron concordancia aceptable, aunque con menor precisión estadística. Sin

embargo, la validación del rendimiento y de los componentes asociados al nitrógeno presentó discrepancias significativas, particularmente bajo condiciones de estrés o cuando el rendimiento real fue mínimo o nulo.

Referencias bibliográficas

- Abayechaw, D. (2021). Review on decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) model. *International Journal of Intelligent Information Systems*.
- Aguilar, C., Escalante, J., Aguilar, I., & Pérez, A. (2017). Crecimiento, rendimiento y rentabilidad del maíz VS-535 en función del biofertilizante y nitrógeno. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*.
- Alarcón, C. (2015). Optimización de parámetros de extracción de antocianinas del maíz morado (*Zea mays* L.) por el método de superficie respuesta y verificación experimental (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Martín.
- Alderman, P. (2020). A comprehensive R interface for the DSSAT cropping systems model. *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Cartagena, Y. (2021). Eficiencia del uso de abonos verdes y urea en el cultivo de maíz de valles altos. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*.
- Caviedes, M., Carvajal, F., & Zambrano, J. (2022). Generación de tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en el Ecuador. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*.
- Deras, F. (2020). Guía técnica: El cultivo de maíz. Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Díaz, G., Aguillón, Y., & Betancourt, L. (2020). Parámetros de rendimiento en gallinas ponedoras y pollos de engorde que recibieron dietas que contenían maíz colombiano y maíz importado de los Estados Unidos. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*.
- Eitzinger, A., Läderach, P., Rodríguez, B., Fisher, M., Beebe, S., Sonder, K., et al. (2017). Assessing high-impact spots of climate change: Spatial yield simulations with decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*.
- Espinoza, G. (2020). Evaluación de tres bioinsecticidas para el control del gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*) (Tesis de grado). Universidad Técnica Estatal de Quevedo.
- García, D., & Hernández, R. (2023). Estudio de altas densidades de siembra en la producción de maíz (*Zea mays*) híbrido. *Revista Tecnología en Marcha*.
- García, L., Fernández, D., Rubio, E., Martínez, M., & Tijerina, L. (2020). Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la Mixteca, calculado con DSSAT. *Revista Terra Latinoamericana*.
- Gaviria, C., & Márquez, C. (2020). *Estadística descriptiva y probabilidad*. Editorial académica.
- Guamán, R., Desiderio, T., Villavicencio, Á., Ulloa, S., & Romero, E. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*.
- Hasang, E., García, S., Carrillo, M., Durango, W., & Cobos, F. (2021). Sustentabilidad del sistema de producción del maíz en la provincia de Los Ríos (Ecuador), bajo la
-

metodología multicriterio de Sarandón. *Journal of the Selva Andina Biosphere*.

Herrera-Jácome, D., Robinson J., H.-F., Alba M., Q.-S., & Carrión-Salazar, B. E. (2023). Uso de trampas con feromonas sintéticas sexuales y uso de insecticida orgánico para el control del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Código Científico Revista De Investigación*, 4(E2), 1185–1202. <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v4/nE2/217>

Jácome, DFH, Masapanta, CAM, Freile, MFM y Torres, ROV (2025). Modelos multivariados para analizar la adopción de maquinaria agrícola y agricultura de precisión en la producción bananera en la zona subtropical de Ecuador. *Revista Brasileña de Investigación Animal y Ambiental*, 8 (3), e82173. <https://doi.org/10.34188/bjaerv8n3-091>

Jaime, E. (2021). Fertilización como estrategia de mitigación y adaptación del cultivo de maíz para futuros cambios climáticos.

Kephe, P., Ayisi, K., & Petja, B. (2021). Challenges and opportunities in crop simulation modelling under seasonal and projected climate change scenarios for crop production in South Africa. *Agriculture and Food Security*, 10.

López, T., Herrera, J., González, F., Cid, G., & Chaterlán, Y. (2009). Eficiencia de un modelo de simulación de cultivo para la predicción del rendimiento del maíz en la región del sur de La Habana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*.

Pérez, R., González, T., & Muñoz, J. (2014). Antagonismo microbiano asociado a cepas bacterianas provenientes de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) y maíz (*Zea mays*). *Revista Iberoamericana de Ciencias*.

Remache, M., Carrillo, M., Mora, R., Durango, W., & Morales, F. (2017). Absorción de macronutrientes y eficiencia del nitrógeno en híbrido promisorio de maíz, Patricia Pilar, Ecuador. *Agronomía Costarricense*.

Rodríguez, J., Ferreras, M., & Núñez, A. (2024). Inferencia estadística, niveles de precisión y diseño muestral. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*.

Rodríguez, M. (2019). *Estadística inferencial aplicada*. Editorial académica.

Sáez, A., Morales, D., Gordón, R., Jaén, J., & Ramos, F. (2024). Sensibilidad del cultivo de maíz (*Zea mays*) a diferentes períodos de déficit hídrico controlado. *Agronomía Mesoamericana*.

Valencia, J., Londoño, D., & Zapata, S. (2023). Determinación del tiempo térmico para el cultivo de banano en la zona bananera de Urabá, Colombia.

Vargas, J., & García, F. (2022). Determinación de la potencia estadística de experimentos de rendimiento en maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.

Varshney, R., Poornesha, B., Raghavendra, A., Lalitha, Y., Apoorva, V., Ramanujam, B., et al. (2021). Biocontrol-based management of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) on Indian maize. *Journal of Plant Diseases and Protection*.

Velásquez, J. (2021). Compostaje del residuo papelerero aplicado al cultivo de maíz. Revista Alfa.

Vera, F., Castro, C., & Mora, X. (2020). Alternativas agroecológicas para el control y manejo de arvenses en competencia específica con el cultivo de maíz. Revista Caribeña de Ciencias Sociales.