



<https://cu-id.com/2284/v12n4e06>

Determinación de parámetros para la calibración del modelo DSSAT en el cultivo del maíz

Determination of Parameters for the Calibration of the DSSAT Model in the Corn Crop

Dr.C. Deborah González-Viera¹, MSc. Osmel Rodríguez-González¹, Dr.C. René Florido-Bacallao¹, MSc. Ransés Vázquez-Montenegro^{II}, Dr.C. Miguel Ángel Socorro-Quesada^{III}

I Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

II Instituto de Meteorología, Departamento Agrometeorología, Casablanca, Regla, La Habana. Cuba.

III Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Agronomía, San José de las Lajas, Mayabeque. Cuba.

RESUMEN. Las observaciones experimentales de variables de crecimiento y desarrollo de un cultivo constituyen la información básica para la calibración de los modelos de cultivos. Considerando lo anterior, se desarrolló este trabajo en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas durante el período poco lluvioso 2016-2017, con el objetivo de determinar las variables fisiológicas y agronómicas de un cultivar de maíz. Se utilizó una densidad de siembra de 47619 plantas ha⁻¹ con un diseño cuasi experimental sobre un Suelo Ferralítico Rojo Lixiviado A partir de los 15 días después de la emergencia (DDE), se ejecutaron muestreos destructivos. Se determinaron el Índice de Área Foliar (IAF), la masa seca total de la parte aérea y el crecimiento del grano. Se realizaron observaciones fenológicas durante el ciclo del cultivo. Los datos se ajustaron a diferentes funciones matemáticas con el programa estadístico Statgraphics Plus 5.0. A continuación, se calcularon la Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC) de la materia seca y la Tasa de Llenado del Grano (TLIG). Se evaluó el rendimiento agrícola en grano seco y sus componentes así como el Índice de Cosecha (IC). En conclusión, se obtuvieron los datos primarios de 16 variables para la calibración del modelo Sistema de Apoyo de Decisiones para la Transferencia de la Agrotecnología (DSSAT).

Palabras clave: biomasa, simulación, rendimiento de cultivos, superficie foliar.

ABSTRACT. Experimental observations of growth and development variables of a crop constitute the basic information for the calibration of crop models. Considering the above, this work was developed at the National Institute of Agricultural Sciences during the dry season 2016-2017, with the objective of determining the physiological and agronomic variables of a maize cultivar. A planting density of 47,619 plants ha⁻¹ was used with a quasi-experimental design on a Leached Red Ferralitic Soil. From 15 days after emergence (DDE), destructive sampling was carried out. The Leaf Area Index (LAI), the total dry mass of the aerial part and the grain growth were determined. Phenological observations were made during the crop cycle. The data was adjusted to different mathematical functions with the statistical program Statgraphics Plus 5.0. Next, the Absolute Growth Rate (AGR) of the dry matter and the Grain Filling Rate (TLIG) were calculated. Agricultural yield in dry grain and its components as well as the Harvest Index (CI) were evaluated. In conclusion, the primary data of 16 variables were obtained for the calibration of the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) model.

Keywords: Biomass, Simulation, Crop Yield, Leaf Area.

INTRODUCCIÓN

Los cereales constituyen la base de la alimentación humana y animal por su importante aporte energético, en forma de azúcares, y como fuente de vitaminas y fibra dietética. Entre ellos,

el maíz se ubica entre las especies con mayor impacto social; por lo tanto, en Cuba se cultivan más de 125 mil hectáreas (ONEI, 2021). Por tal motivo, resulta necesario manejar debidamente el

¹ Autora para correspondencia: Deborah González-Viera, e-mail: deborah@inca.edu.cu ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4923-812X>

Recibido: 24/02/2022.
Aprobado: 09/09/2022.

cultivo, a partir del conocimiento de los procesos fisiológicos que poseen una marcada incidencia en su productividad, en dependencia del genotipo y las condiciones edafoclimáticas.

En este sentido, las observaciones experimentales de diferentes variables que describen el crecimiento y desarrollo de un cultivo en el tiempo, constituyen la información básica para la calibración y validación de los modelos de cultivos. A su vez, la aplicación de dichos modelos, como una herramienta informática en la agricultura cubana, contribuye a la obtención de métodos de estimación de los rendimientos agrícolas y establecer estrategias para el manejo de los cultivos ante escenarios futuros (Rodríguez-González *et al.*, 2018, 2020, 2021).

Considerando los aspectos anteriores, se lleva a cabo esta investigación con el objetivo determinar los parámetros principales de un cultivar de maíz (*Zea mays* L.), con vistas a la calibración del modelo Sistema de Apoyo de Decisiones para la Transferencia de la Agrotecnología (DSSAT), en las condiciones del trópico húmedo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló durante el período poco lluvioso Octubre/2016-Diciembre/2017 (INSMET, 2017) en las áreas experimentales de la finca "Las Papas" perteneciente al Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (23°00' Latitud Norte, 82°12' Longitud Oeste, Elevación: 138 msnm) situado en el km 3 ½ de la carretera San José a Tapaste, municipio San José de las Lajas en la provincia Mayabeque.

El experimento se realizó en un suelo Ferralítico Rojo Liviviado (A. Hernández *et al.*, 2015). El clima se catalogó, según la clasificación climática de Köppen-Geiger (Cruz *et al.*, 2007) como tropical de monzón, con una temperatura media de 24,0 °C y la precipitación anual es de 1526 mm (Climate-Data.org, 2020).

Se ejecutó la preparación de suelo y la siembra en 0,13 ha según lo recomendado en la Guía Técnica para la producción de maíz (IIGranos, 2017) estableciéndose el cultivar VST-6 (Tabla 1) en un diseño cuasiexperimental, con marco de plantación de 0,70 m x 0,30 m para una densidad de 47619 plantas ha⁻¹.

TABLA 1.- Principales características del material genético utilizado en la investigación

Datos fenológicos y agronómicos	Rango de valores
Ciclo biológico hasta la cosecha maíz tierno (días)	80
Ciclo biológico hasta la cosecha maíz seco (días)	140
Peso de la mazorca de maíz tierno (gramos)	300 - 400
Tipo de grano	Semicristalino
Potencial productivo Mínimo (t ha ⁻¹)	3,5 - 4,0
Potencial productivo Máximo (t ha ⁻¹)	4,5 - 6,0

Recopilación de los datos experimentales de los parámetros y metodología de cálculo

La determinación de los parámetros se sustentó en los criterios aportados en la literatura (Alderman, 2020) executing simulations, and processing and analyzing outputs for DSSAT-CSM. This application note demonstrates the use of this new package for building reproducible crop modeling workflows using the DSSAT-CSM system. Example workflows are provided for modifying values in input data files (soil, weather, and experimental details, acerca de la preparación de los ficheros de entrada para la corrida del modelo CERES-MAIZE del DSSAT versión 4.6. Por lo tanto, se recopilieron los datos de diferentes variables fisiológicas, la fenología, la suma térmica y las variables agronómicas. Estos datos aportaron la información referente a los parámetros de los ficheros A, T y coeficientes genéticos, que se requieren para la calibración del modelo de cultivo.

Variables fisiológicas: A partir de los 15 días después de la emergencia (DDE), se realizaron muestreos destructivos a cinco plantas con una frecuencia semanal, para la recolección de datos de cinco variables:

Área Foliar: El procedimiento seguido para la estimación del Área Foliar consistió en extraer de una hoja colectada; 5 discos foliares de superficie conocida que se secaron en estufa a 80 °C, hasta que alcanzaron un peso constante. Posteriormente, se determinó la materia seca de los discos foliares, con una balanza analítica de 120 g con 0.1 mg de precisión. La superficie foliar real fue estimada a partir del peso seco de los discos (Watson & Watson, 1953).

Masa Seca Total de la parte aérea (MST): Se empleó el método tradicional de secado de muestras por órganos (hojas, tallo, espiga y mazorca sin sus brácteas) con el uso de estufas de circulación forzada a 80 °C, hasta lograr un peso constante. La masa seca total se obtuvo como resultado de la sumatoria de la masa seca de cada órgano (Aguilar-Carpio *et al.*, 2017).

Los datos de estas variables fisiológicas se ajustaron, mediante un análisis de regresión con el programa estadístico Statgraphics Plus 5.0, a una función exponencial polinómica de segundo grado (ecuación 1) donde «x» es la variable independiente, que representó los días después de la emergencia (DDE) y «y» la variable dependiente en cuestión.

$$y = e^{(b_0 + b_1x + b_2x^2)} \quad (1)$$

A partir de la primera derivada de las ecuaciones obtenidas, se estimó la Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC) de la Masa Seca Total de la parte aérea y el Índice de Área Foliar (ecuación 2), según las fórmulas descritas en la literatura (Torres, 1984).

$$TAC = \frac{dP}{dt} \cdot \frac{dA}{dt} \quad (2)$$

donde: A es el Índice de Área Foliar (IAF), P es la Masa Seca Total de la parte aérea (MST) y t es el tiempo transcurrido desde la germinación, en días.

Crecimiento del grano: La cinética del peso de grano se registró periódicamente (cada 3 a 5 días) y el período de muestreo se inició 18 días después de la floración, con registro del día en que inició la fase R3 hasta la cosecha (fase R6). El muestreo de grano consistió en cosechar 5 mazorcas de plantas seleccionadas al azar y en el laboratorio, se tomó una muestra de 20 granos de la parte media de la mazorca (entre la espiguilla 10 y 15 de la parte basal a la apical) de acuerdo con la literatura (Gambín et al., 2007). Se registró el peso fresco de los granos muestreados y su peso seco después de secar la muestra de granos en una estufa con aire forzado a 80 °C por 72 h, para calcular el porcentaje de masa seca (% MS).

En este caso, se asumió la función logarítmica con una fase lineal (Stewart et al., 1998). Por lo tanto, los datos se ajustaron mediante un análisis de regresión con el programa estadístico Statgraphics Plus 5.0, al modelo matemático enunciado con anterioridad (ecuación 3) donde «y» es el porcentaje de masa seca en el momento de muestreo «x» y «b» la pendiente bajo la curva.

$$y = \ln x + b \quad (3)$$

Duración del Llenado Efectivo del Grano (DLIEG): Esta ecuación permitió la predicción del inicio y final de la fase

lineal, cuando el grano de maíz alcanzó el 13 % y 64 % de masa seca; respectivamente (Borrás et al., 2009). Por lo tanto, a partir de la ecuación anterior, se cuantificaron los días desde el inicio de la fase lineal hasta la madurez fisiológica y este período se consideró como el valor de la variable, de acuerdo con los estudios sobre este tema (Gasura et al., 2013).

Tasa de Llenado del Grano (TLIG): Se calculó durante la etapa de crecimiento lineal en condiciones óptimas, según lo planteado en la literatura (Gasura et al., 2013) mediante la expresión matemática que se describe a continuación (ecuación 4) donde TLIG es la Tasa de Llenado del Grano (expresada en g día⁻¹ y que corresponde al coeficiente genético G3), RGP es el rendimiento agrícola (expresado en gramos planta⁻¹) y la DLIEG es la Duración del Llenado Efectivo del Grano en la fase lineal.

$$TLLG = \frac{RGP}{DLIEG} \quad (4)$$

Fenología: Se utilizó la metodología del CIMMYT (Lafitte, 1993) para la identificación de las etapas fenológicas, donde se tomó la fecha de ocurrencia y se cuantificaron los días después de la emergencia (DDE). Se asumió que el cultivo alcanzó cada etapa, cuando el 50 % de las plantas presentaron las características expresadas en la Tabla 2.

TABLA 2.- Descripción de las etapas fenológicas en el cultivo del maíz, estudiadas en la investigación

Fase	Código	Nombre de la etapa fenológica	Identificación del inicio de la etapa
Vegetativa	VE	Emergencia	El coleoptilo emerge de la superficie del suelo
Reproductiva	R0	Antesis o floración masculina	El polen se comienza a arrojar.
	R1	Floración femenina	Son visibles los estigmas.
Maduración	R6	Madurez fisiológica	Una capa negra es visible en la base del grano.

Grados Días de Calor Acumulados (GDCA): Para ello, se consultó el registro de temperaturas de la base de datos climáticos diarios de la Estación Meteorológica número 78 374, en la localidad de Tapaste (Municipio San José de las Lajas, provincia Mayabeque) durante el período de la investigación.

A partir de las de fechas de ocurrencia de las etapas fenológicas y los datos del registro de temperaturas, se calcularon los GDCA (expresados en °C) desde la emergencia hasta la emisión de la espiga (Coeficiente P1) y desde el comienzo del llenado del grano hasta la madurez fisiológica (Coeficiente P5). Se utilizó la expresión matemática correspondiente (ecuación 5), de acuerdo a estudios recientes en Cuba (Maqueira-López et al., 2021) donde $T_{máxima}$ es la temperatura máxima diaria del aire, $T_{mínima}$ es la temperatura mínima diaria del aire y T_{base} corresponde a la temperatura en que el proceso de interés no progresa..

$$GDC = \sum \frac{T_{máxima} + T_{mínima}}{2} - T_{base} \quad (5)$$

En este caso, se tomó el valor establecido ($T_{base} = 10$ °C) según los estudios internacionales sobre este tema (Sáez-Cigarruista et al., 2019) Los Santos. Se utilizó la variedad IDIAP-MV-1102 y el híbrido P-4226. La unidad experimental consistió de 15 hileras de 10 m de largo separadas a 0,75 m entre ellas y 0,20 m entre plantas. Se establecieron dos fechas de siembra agosto y octubre. Se evaluó el desarrollo de la etapa vegetativa y reproductiva de 15 plantas de cada cultivar por fecha de siembra. Se definió el tiempo termal exacto en que ocurre cada una de las etapas fenológicas. La determinación del periodo juvenil se realizó a través de muestreo destructivo a partir de la tercera hoja. La edad cronológica del cultivo al final del ciclo productivo fue de 118 días después de siembra (dds)

Variables agronómicas: Se evaluaron los datos de rendimiento, ya que son necesarios en la calibración y validación del modelo de cultivos (García-Montesinos et al., 2020; Rodríguez-González et al., 2021). A continuación, se describen las variables agronómicas evaluadas en la investigación.

Rendimiento agrícola en grano seco (RAGS) y sus componentes: Se utilizaron los criterios internacionales que están establecidos para el cultivo del maíz (Lafitte, 1993) con el empleo de la siguiente fórmula (ecuación 6) donde RAGS es el Rendimiento Agrícola en Grano Seco (expresado en t ha⁻¹), NM es el número de mazorcas en un metro cuadrado, NMG es el número de granos por mazorca y PIG es la masa de un grano (expresada en gramos)

$$RAGS = \frac{NM \cdot NGM \cdot P1G}{100} \quad (6)$$

Índice de cosecha (IC): Se calculó en el momento de la cosecha. Se empleó la metodología definida en la literatura (Escalante & Kohashi, 1993), que se detallan en las siguientes expresiones matemáticas (ecuaciones 7 y 8) donde *IC* es el Índice de Cosecha (expresado en %), *RAGS* es el Rendimiento Agrícola en Grano Seco (expresado en Kg ha⁻¹), *RB* es el Rendimiento Biológico (expresado en Kg de la Masa Seca Total de la parte aérea ha⁻¹), *MST* es la Masa Seca Total de la parte aérea en el momento de la cosecha (expresada en gramos planta⁻¹) y *NPM* es el número de plantas en un metro cuadrado.

$$IC = \left(\frac{RAGS}{RB} \right) * 100 \% \quad (7)$$

$$RB = MST * NPM * 10 \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general, los resultados mostraron la variación de los indicadores de crecimiento en el cultivar VST-6 (Figuras 1 a la 4), en función de los días después de la emergencia y después de la floración.

En la fase vegetativa, el rápido crecimiento del tallo y el área foliar, resultan cruciales para establecer la capacidad fotosintética del cultivo y competir contra los organismos nocivos (Walne & Reddy, 2022). En la Figura 1 se aprecia que la cobertura foliar se produjo antes de los 80 DDE. Además, se produjo el incremento de esta variable hasta los 78 DDE, con valor máximo de IAF = 2,55. También, se evidenció que la mayor acumulación de masa seca total ocurre en la etapa reproductiva, específicamente a los 95 DDE (Figura 2).

En esta investigación, el Índice del Área Foliar estuvo por debajo del valor óptimo (IAF < 5). Al respecto, de acuerdo con la literatura, con valores óptimos del IAF, la planta de maíz alcanza la mayor producción de biomasa (Rahayu *et al.*, 2021).

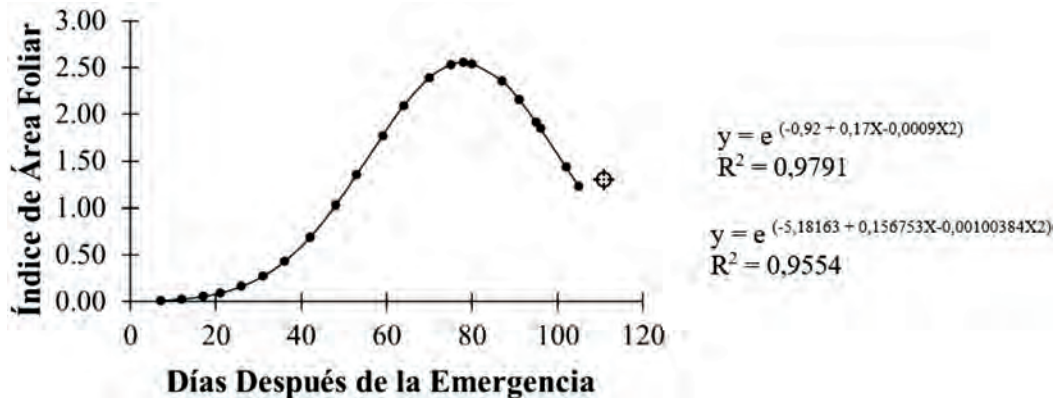


FIGURA 1.- Dinámica del IAF del cultivar VST-6, en función de los días después de la emergencia.

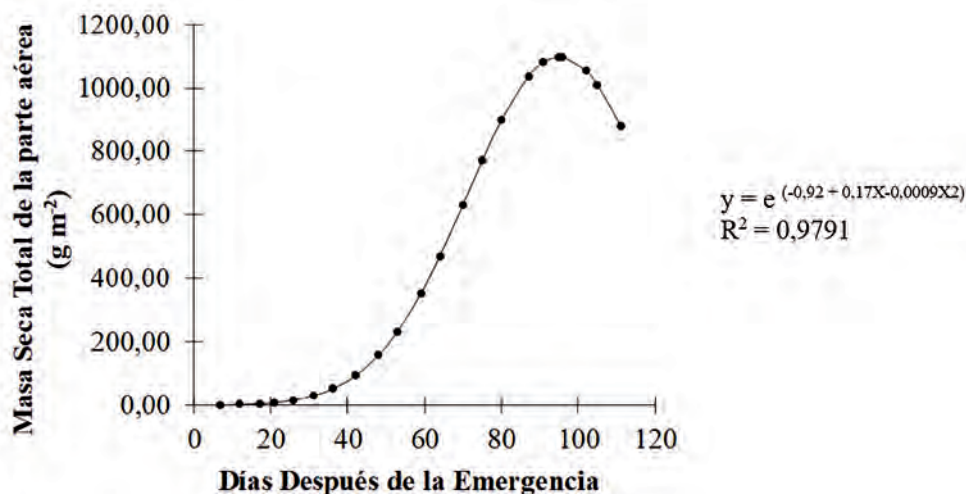


FIGURA 2.- Dinámica de la MST en el cultivar VST-6, en función de los días después de la emergencia.

Por otra parte, estos resultados coinciden con investigaciones cubanas (N. Hernández & Soto, 2012, 2013) acerca del efecto de las fechas de siembras en la fisiología del maíz. Estos autores confirman que, en el período poco lluvioso, este cultivo estuvo expuesto a temperaturas entre 19,0 °C y 25,0 °C. El efecto fisiológico por esta causa se evidenció en menores valores de IAF, acumulación de biomasa y menor rendimiento. También, investigaciones recientes demuestran que las altas temperaturas (por encima de 30,0 °C) inciden positivamente en la acumulación de biomasa en los tallos, las hojas y la expansión foliar en el cultivo del maíz (Walne & Reddy, 2022).

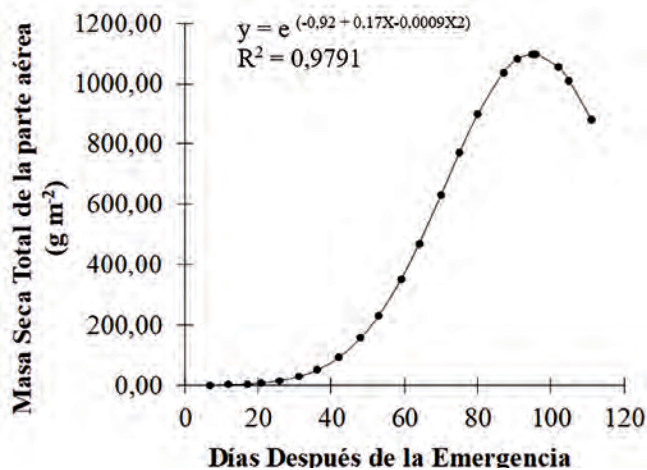


FIGURA 3.- Dinámica de la TAC del cultivar VST-6, en función de los días después de la emergencia.

Los valores máximos de la TAC se produjeron a los 70 DDE (Figura 3), que coincidió con el período inicial de la formación del grano. En cuanto a las cifras obtenidas, estudios similares demuestran que, en las condiciones del trópico húmedo, los cultivares e híbridos de maíz pueden alcanzar tasas por encima de 50 g día⁻¹. Sin embargo, estos valores no determinan que el Índice de Cosecha supere el 50 % (Sáez-Cigarrieta et al., 2019) Los Santos. Se utilizó la variedad IDIAP-MV-1102 y el híbrido P-4226. La unidad experimental consistió de 15 hileras de 10 m de largo separadas a 0,75 m entre ellas y 0,20 m entre plantas. Se establecieron dos fechas de siembra agosto y octubre. Se evaluó el desarrollo de la etapa vegetativa y reproductiva de 15 plantas de cada cultivar por fecha de siembra. Se definió el tiempo termal exacto en que ocurre cada una de las etapas fenológicas. La determinación del periodo juvenil se realizó a través de muestreo destructivo a partir

de la tercera hoja. La edad cronológica del cultivo al final del ciclo productivo fue de 118 días después de siembra (dds).

En la Figura 4, se demostró que el mayor valor de Peso Seco de Grano ocurrió después de los 40 días de la floración, así como los valores máximos de la Tasa de Llenado del Grano (Tabla 2)

Estos resultados coinciden con estudios realizados con híbridos de maíz, que presentaron las mayores tasas de acumulación de masa seca hasta los 50 días después de la floración. Por otra parte, la literatura refiere que la combinación de prácticas agronómicas como la fertilización nitrogenada con dosis superiores a 200 kg ha⁻¹ y la densidad de población de 90 000 plantas ha⁻¹, podrían incidir negativamente en la acumulación de masa seca en el grano de maíz, y por lo tanto, ocasionar la disminución del rendimiento en este cultivo (Liu et al., 2021; Yu et al., 2020).

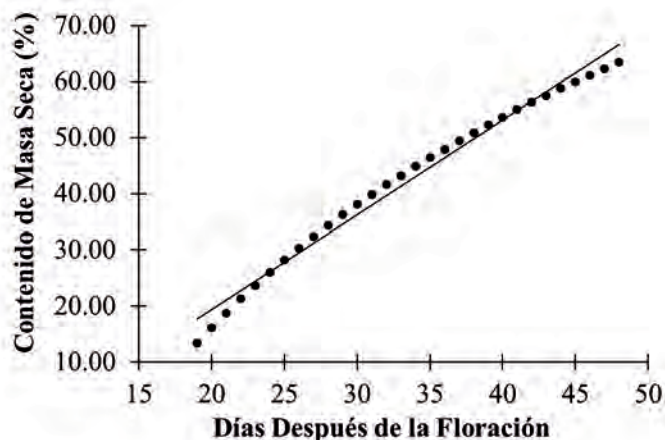


FIGURA 4.- Dinámica del contenido de Masa Seca en el crecimiento del grano del cultivar VST-6, en función de los días después de la floración.

La Tabla 2 muestra los parámetros principales del cultivar de maíz VST-6, para la calibración del modelo DSSAT.

TABLA 2.- Parámetros del cultivar VST-6

Variables	Denominación	Datos experimentales
Fisiológicas	Número definitivo de hojas	12
	Biomasa en antesis o floración masculina (g planta ⁻¹)	78,4
	Biomasa en la madurez fisiológica (g planta ⁻¹)	225,74
	IAF Máxima	2,55
	G ₃ Máxima (g día ⁻¹)	2,88
Fenológicas	Fecha de emergencia	28/10/2016
	Fecha de antesis o floración masculina	26/12/2016 (59 DDE)
	Fecha de floración femenina	31/12/2016 (64 DDE)
	Fecha de madurez fisiológica	10/02/2017 (105 DDE)
GDCA	Coficiente P ₁	809,1 °C
	Coficiente P ₅	201,3 °C
	Número de granos por m ²	1610,2
Agronómicas	Número de granos por mazorca	322,04
	Peso unitario del grano en masa seca (g)	0,2592
	Índice de Cosecha	0,57
	Rendimiento Agrícola en Grano Seco (kg ha ⁻¹)	4173,6

DDE: Días Después de Emergencia

En cuanto al ciclo biológico (Tabla 2), los resultados demostraron que el cultivar VST-6 es intermedio, dado por la estimación de los días a la floración masculina y femenina. No obstante, estos hallazgos son inferiores a los datos reportados por el cultivar sintético VS536, en las condiciones climáticas del trópico húmedo mexicano. Dicho cultivar registra 66 días y 71 días, a la floración masculina y femenina, respectivamente (Angel-Sánchez et al., 2019; Sánchez Hernández et al., 2019).

Desde el punto de vista agronómico, el rendimiento agrícola alcanzado por el cultivar VST-6 fue superior a valores expuestos en las normas técnicas (II Granos, 2017). Además, el valor obtenido en el índice de cosecha reveló la eficiencia del cultivo, ya que fue superior a 0.50 y coincide con las investigaciones realizadas en híbridos de maíz en China. Estos autores demuestran que el manejo de la fertilización nitrogenada incide en la formación del rendimiento del maíz, tanto en el período del grano como en la tasa de llenado (Li *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2019) we compared two modern hybrids (SG hybrid DY508 and NSG hybrid NH101.

CONCLUSIONES

- Las observaciones experimentales permitieron la obtención de los datos primarios de 16 variables para la calibración del modelo DSSAT, en el cultivar VST-6

- Estos resultados se consideran son preliminares, por lo tanto, se recomienda la ejecución de investigaciones adicionales para determinar el efecto de diferentes aspectos de carácter agronómico (fechas de siembra, densidad de plantación, sistema de cultivo) en las variables del crecimiento del grano, en variedades cubanas de maíz.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto "Utilización de la modelación como herramienta para predecir el comportamiento de los cultivos de maíz y sorgo ante los cambios climáticos y trazar estrategias para la adaptación" ejecutado por el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Muchas gracias por el valioso apoyo a la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Carpio, C., Escalante-Estrada, J. A. S., Aguilar-Mariscal, I., Pérez-Ramírez, A., Aguilar-Carpio, C., Escalante-Estrada, J. A. S., Aguilar-Mariscal, I., & Pérez-Ramírez, A. (2017). Crecimiento, rendimiento y rentabilidad del maíz VS-535 en función del biofertilizante y nitrógeno. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(12), 475-483. <https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1000>
- Alderman, P. D. (2020). A comprehensive R interface for the DSSAT Cropping Systems Model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105325>
- Angel-Sánchez, M., Jiménez-Maya, J. B., Morales-Terán, G., Acevedo-Gómez, R., Antonio-Estrada, C., & Villanueva-Verduzco, C. (2019). Grain yield of maize adapted to the basin Papaloapan Region conditions. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 22(2), Article 2. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2608>
- Borrás, L., Zinselmeier, C., Lynn Senior, M., Westgate, M., & Muszynski, M. G. (2009). Characterization of grain-filling patterns in diverse maize germplasm. *Crop Science*, 49, 999-1009. <https://doi.org/doi:10.2135/cropsci2008.08.0475>
- Climate-Data.org. (2020). *Clima Tapaste: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Tapaste* [Repositorio de documentos]. <https://es.climate-data.org/americas-del-norte/cuba/mayabeque/tapaste-45422/>
- Cruz, D. M., Gómez, R. A., & Cordovés, C. (2007). *Clasificación climática de Köppen. Orientaciones para su estudio*. [Repositorio de documentos]. Ilustrados. <http://www.ilustrados.com/tema/10346/Clasificacion-climatica-Koppen-Orientaciones-para-estudio.html>
- Escalante, J. A., & Kohashi, J. (1993). *El rendimiento y crecimiento de frijol. Manual para la toma de datos*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Gambín, B. L., Borrás, L., & Otegui, M. E. (2007). Source-sink and kernel weight differences in maize temperate hybrids. *Field Crops Research*, 95, 316-326.
- García-Montesinos, L. E., Fernández-Reynoso, D. S., Rubio-Granados, E., Martínez-Menez, M. R., Tijerina-Chávez, L., García-Montesinos, L. E., Fernández-Reynoso, D. S., Rubio-Granados, E., Martínez-Menez, M. R., & Tijerina-Chávez, L. (2020). Rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en la mixteca, calculado con DSSAT. *Terra Latinoamericana*, 38(4), 859-870. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.751>
- Gasura, E., Setimela, P., Edema, R., Gibson, P. T., Okori, P., & Tarekegne, A. (2013). Exploiting Grain-Filling Rate and Effective Grain-Filling Duration to Improve Grain Yield of Early-Maturing Maize. *Crop Science*, 53(6), 2295-2303. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.01.0032>
- Hernández, A., Pérez, J., Bosch, D., & Castro, N. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba*. Ediciones INCA, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.
- Hernández, N., & Soto, F. (2012). Influencia de tres fechas de siembra sobre el crecimiento y rendimiento de especies de cereales cultivadas en condiciones tropicales. Parte I. Cultivo del maíz (*Zea mays* L.). *Cultivos Tropicales*, 33(2), 44-49.
- Hernández, N., & Soto, F. (2013). Determinación de índices de eficiencia en los cultivos de maíz y sorgo establecidos en diferentes fechas de siembra y su influencia sobre el rendimiento. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 24-29.
- II Granos. (2017). *Guía técnica de la producción de maíz*. Instituto de Investigaciones de Granos, Ministerio de la Agricultura.
- INSMET. (2017). *AGROMET- Boletín Agrometeorológico Nacional*. Dpto de Meteorología Agrícola. <http://www.insmet.cu/AgroBoletin/agro.htm>, La Habana, Cuba.
- Lafitte, H. R. (1993). *Identificación de problemas en la producción de maíz tropical. Guía de campo*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), México.
- Li, Q., Du, L., Feng, D., Ren, Y., Li, Z., Kong, F., & Yuan, J. (2020). Grain-filling characteristics and yield differences of maize cultivars with contrasting nitrogen efficiencies. *The Crop Journal*, 8(6), 990-1001. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.04.001>
- Liu, X., Gu, W., Li, C., Li, J., & Wei, S. (2021). Effects of nitrogen fertilizer and chemical regulation on spring maize lodging characteristics, grain filling and yield formation under high planting density in Heilongjiang Province, China. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 511-526. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63403-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63403-7)
- Maqueira-López, L. A., Roján-Herrera, O., Solano-Flores, J., Santana-Ges, I. M., & Fernández-Márquez, D. (2021). Productividad del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Parte I. Rendimiento en función de variables meteorológicas. *Cultivos Tropicales*, 42(3). <http://scielo.sld.cu/scielo>

php?script=sci_abstract&pid=S0258-59362021000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- ONEI. (2021). *Anuario Estadístico de Cuba 2020. Capítulo 9: Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca*. Oficina Nacional de Estadística e Información. <http://www.onei.gob.cu/node/16275>, La Habana, Cuba.
- Rahayu, M., Yudono, P., Indradewa, D., & Hanudin, E. (2021). Growth analysis of some maize cultivars on weedy condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 653(1), 012075. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012075>
- Rodríguez-González, O., Florido-Bacallao, R., Hernández Córdova, N., Soto Carreño, F., Jeréz Mompié, E. I., González Viera, D., & Vázquez Montenegro, R. J. (2021). Simulation of management strategies from the DSSAT model to increase the yields of a corn cultivar. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 55(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2079-34802021000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Rodríguez-González, O., Florido-Bacallao, R., & Varela-Nualles, M. (2018). Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba. *Cultivos Tropicales*, 39(1), 121-126.
- Rodríguez-González, O., Florido-Bacallao, R., Varela-Nualles, M., González-Viera, D., Vázquez-Montenegro, R., Maqueira-López, L. A., & Morejón-Rivera, R. (2020). Aplicación de la herramienta de modelación DSSAT para estimar la dosis óptima de fertilizante nitrogenado para la variedad de arroz J-104. *Cultivos Tropicales*, 41(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0258-59362020000200001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Sáez-Cigarruista, A., Gordon M, R., Núñez-Cano, J., Jaén, J., Franco-Barrera, J., Ramos-Manzané, F., & Ávila-Guevara, A. (2019). *Coefficientes genéticos de dos cultivares de maíz, Azuero-Panamá*. 29, 80-99.
- Sánchez Hernández, M. Á., Cruz Vázquez, M., Sánchez Hernández, C., Morales Terán, G., Rivas Jacobo, M. A., Villanueva Verduzco, C., Sánchez Hernández, M. Á., Cruz Vázquez, M., Sánchez Hernández, C., Morales Terán, G., Rivas Jacobo, M. A., & Villanueva Verduzco, C. (2019). Rendimiento forrajero de maíces adaptados al trópico húmedo de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(3), 699-712. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1546>
- Stewart, D. W., Dwyer, L. M., & Carrigan, L. L. (1998). Phenological temperature response of maize. *Agronomy Journal*, 90, 72-79. <https://doi.org/doi:10.2134/agronj1998.0002196200900010014x>
- Torres, W. (1984). *Análisis del crecimiento de las plantas*.
- Walne, C. H., & Reddy, K. R. (2022). Temperature Effects on the Shoot and Root Growth, Development, and Biomass Accumulation of Corn (*Zea mays* L.). *Agriculture*, 12(4), 443. <https://doi.org/10.3390/agriculture12040443>
- Watson, D., & Watson, M. (1953). Comparative physiological studies on the growth of field crops. III. The effect of infections with beet yellow and beet mosaic viruses on the growth and yields of sugar beet root crop. *Annals of Applied Biology*, 40, 1-37.
- Yu, N., Zhang, J., Liu, P., Zhao, B., & Ren, B. (2020). Integrated agronomic practices management improved grain formation and regulated endogenous hormone balance in summer maize (*Zea mays* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 19(7), 1768-1776. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62757-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62757-7)
- Zhang, L., Zhou, X., Fan, Y., Fu, J., Hou, P., Yang, H., & Qi, H. (2019). Post-silking nitrogen accumulation and remobilization are associated with green leaf persistence and plant density in maize. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(8), 1882-1892. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62087-8](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62087-8)

Deborah González-Viera, Inv. Auxiliar, Departamento Manejo de Agroecosistemas Sostenibles, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Carretera a Tapaste km 3.5 Gaveta Postal 1, CP 32 700. San José de las Lajas, Mayabeque. Cuba. Tel: (53) 47 86 1273. e-mail: deborah@inca.edu.cu ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4923-812X>

Osmel Rodríguez-González, Investigador, Departamento Informática y Comunicaciones. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Carretera a Tapaste km 3.5 Gaveta Postal 1, CP 32 700. San José de las Lajas, Mayabeque. Cuba. Tel. / Fax: (53) 86 3867. e-mail: osmel@inca.edu.cu ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6480-9971>

René Florido-Bacallao, Investigador, Dirección Desarrollo, Proyectos y Colaboración. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Carretera a Tapaste km 3.5 Gaveta Postal 1, CP 32 700. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Tel. / Fax: (53) 86 3867. e-mail: florido@inca.edu.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4494-660X>

Ransés Vázquez-Montenegro, Investigador, Departamento Agrometeorología. Instituto de Meteorología. Loma de Casablanca. Casablanca, La Habana. Cuba. Tel. (537) 868 6685/867 0711, e-mail: ranses.vazquez@insmet.cu ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-4850>

Miguel Ángel Socorro-Quesada, Profesor Titular, Departamento Manejo de Agroecosistemas Sostenibles, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Carretera a Tapaste km 3.5 Gaveta Postal 1, CP 32 700. San José de las Lajas, Mayabeque. Cuba. Tel: (53) 47 86 1273. e-mail: deborah@inca.edu.cu ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4923-812X>

CONTRIBUCIONES DE AUTOR:

Conceptualización: D. González, O. Rodríguez, R. Florido. Curación de datos: D. González, O. Rodríguez, R. Florido, R. Vázquez. Análisis formal: D. González, Captación de fondos: D. González, O. Rodríguez, R. Florido. Investigación: D. González, O. Rodríguez, R. Florido, R. Vázquez, M. Socorro. Metodología: D. González, M. Socorro. Administración de proyectos: D. González. Recursos: D. González, O. Rodríguez, R. Florido. Software: D. González, O. Rodríguez. Supervisión: D. González. Validación: D. González, O. Rodríguez, M. Socorro. Visualización: Redacción–borrador original: D. González, R. Florido. Redacción–revisión y edición: D. González, M. Socorro, O. Rodríguez.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.