

Simulation of management strategies from the DSSAT model to increase the yields of a corn cultivar

Simulación de estrategias de manejo a partir del modelo DSSAT para incrementar los rendimientos de un cultivar de maíz

O. Rodríguez González¹, R. Florido Bacallao¹, Naivy Hernández Córdova¹, F. Soto Carreño¹, E.I. Jeréz Mompié¹, Deborah González Viera¹ and R.J. Vázquez Montenegro²

¹Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32 700

²Instituto de Meteorología, Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba. CP 11 700

Email: osmel@inca.edu.cu

O. Rodríguez González: <https://orcid.org/0000-0002-6480-9971>

R. Florido Bacallao: <https://orcid.org/0000-0003-4494-660X>

Naivy Hernández Córdova: <https://orcid.org/0000-0002-7159-7348>

F. Soto Carreño: <https://orcid.org/0000-0003-3285-6535>

E.I. Jeréz Mompié: <https://orcid.org/0000-0001-6509-8932>

Deborah González Viera: <https://orcid.org/0000-0002-4923-812X>

R.J. Vázquez Montenegro: <https://orcid.org/0000-0002-9324-4850>

Crop simulation models based on physiological processes are valuable tools for simulating crop production, estimating agronomic efficiency, and developing optimal management practices for sustainable agriculture. The objectives of this study were to calibrate the DSSAT model for the P-7928 corn cultivar and explore management strategies to improve crop production, which included sowing density, fertilization levels and edaphoclimatic conditions. The DSSAT model showed excellent performance. The simulated yields were related to those observed, and showed a Willmott index of 0.96. The square root of the mean square of the normalized error behaved with an acceptable value of 28 % and R^2 of 0.985, which shows the good fit of model and shows that it can be used to simulate the crop yield and its physiological components under Cuba conditions. The simulations performed show higher yield, when combining the sowing of 7 plants m^{-2} and a nitrogen fertilization of 150 $kg\ ha^{-1}$. The comparative study of the yields in different edaphoclimatic conditions shows the influence of the latter on the crop response.

Key words: *calibration, crop simulation models, yield, corn*

The crop simulation models based on physiological processes have been developed to assess the impact of climate change on food production and climate adaptation, as well as to develop strategies in the agricultural framework (Tatsumi 2016). These models represent, in a simple and synthetic way, the most important physiological and ecological processes that govern growth through the use of mathematical equations (Guevara 2007, Gouache *et al.* 2015, Dias *et al.* 2016 and Rodríguez *et al.* 2018).

Modeling makes it possible to research the consequences of possible future scenarios and allows preparing for changes before they occur. The influence of climate change on agriculture represents a challenge

Los modelos de simulación de cultivos basados en procesos fisiológicos son herramientas valiosas para simular la producción de cultivos, estimar la eficiencia agronómica y desarrollar prácticas de manejo óptimas para la agricultura sostenible. Los objetivos de este estudio fueron calibrar el modelo DSSAT para el cultivar de maíz P-7928 y explorar estrategias de manejo para mejorar la producción del cultivo, que incluyeron densidad de siembra, niveles de fertilización y condiciones edafoclimáticas. El modelo DSSAT mostró un desempeño excelente. Los rendimientos simulados tuvieron relación con los observados, y mostraron un índice de Willmott de 0.96. La raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado se comportó con un valor aceptable de 28 % y R^2 de 0.985, lo que evidencia el buen ajuste del modelo y demuestra que se puede utilizar para simular el rendimiento del cultivo y sus componentes fisiológicos en las condiciones de Cuba. Las simulaciones realizadas muestran mayor rendimiento, al combinar la siembra de 7 plantas m^{-2} y fertilización nitrogenada de 150 $kg\ ha^{-1}$. El estudio comparativo de los rendimientos en diferentes condiciones edafoclimáticas demuestra la influencia de estas últimas en la respuesta del cultivo.

Palabras clave: *calibración, modelos de simulación de cultivos, rendimiento, maíz*

Los modelos de simulación de cultivos basados en procesos fisiológicos se han desarrollado para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de alimentos y la adaptación al clima, así como para desarrollar estrategias en el marco de trabajo agrícola (Tatsumi 2016). Estos modelos representan, de manera sencilla y sintética, los procesos fisiológicos y ecológicos más importantes que gobiernan el crecimiento mediante la utilización de ecuaciones matemáticas (Guevara 2007, Gouache *et al.* 2015, Dias *et al.* 2016 y Rodríguez *et al.* 2018).

La modelación posibilita investigar las consecuencias de posibles escenarios futuros y permite prepararse para los cambios antes de que ocurran. La influencia del cambio climático en la agricultura representa un reto para

in deciding policies based on quantitative models, which consider agriculture in its specific context (Hernández *et al.* 2017 and Tian *et al.* 2020).

The Agrotechnology Transfer Decision Support System (DSSAT) is a platform that includes 42 models and has been applied to simulate the effects of different management conditions on yield: sowing dates (Tofa *et al.* 2020 and Shen *et al.* 2020), irrigation levels, nitrogen fertilization (Marek *et al.* 2017 and Abedinpour and Sarangi 2018) and sowing density (Ren *et al.* 2020).

DSSAT needs to be calibrated and validated in order to simulate the response of the crop to certain factors. In the calibration, the parameters in the model database are fitted: (i) through various simulation scenarios until an acceptable fit between simulated and observed values in field experiments is obtained, and also (ii) from experimental data of the literature for the region in which it will be validated. Validation is the procedure by which the performance of the model is evaluated, contrasting the simulated values of a certain variable with real data obtained in field experiments. The main objective when evaluating the performance of a crop simulation model is to assess its practical use as a research tool or support in making decisions about management and planning at the farm, regional or national level (Soto-Bravo and González-Lutz 2019).

Corn (*Zea mays* L.) is a cereal of great economic importance in the world for human and animal intake, with a global production of 500 million tons. This crop covers an area of more than 120 million hectares and is cultivated in more than 70 countries, although it mainly predominates in the American continent (Mendoza 2017 and Pérez-Madruga *et al.* 2019)

In Cuba, the corn covers an area between 77,000 and 100,000 hectares. The provinces from the central and eastern regions stand out in their production, with the largest extensions of sowing area. There are 47 commercial varieties in the country, four are traditional and the rest are cultivars from different national genetic improvement programs. Currently, the productivity of these cultivars does not exceed 1.44-2.35 t ha⁻¹ on average (ONEI 2017).

Based on these conditions, the objective of this study was to calibrate the DSSAT model for the P-7928 corn cultivar and explore management strategies to improve crop production, which included sowing density, fertilization levels, and edaphoclimatic conditions.

Materials and Methods

To obtain the values of the genetic coefficients of the corn variety P-7928, data were taken from experiments carried out at the Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (230 01 'north latitude and 820 08' west longitude at 138 m o.s.l.). Three sowing dates

decidir las políticas a partir de modelos cuantitativos, que consideran la agricultura en su contexto específico (Hernández *et al.* 2017 y Tian *et al.* 2020).

El Sistema de Apoyo para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (DSSAT) es una plataforma que incluye 42 modelos y se ha aplicado para simular los efectos que tienen en el rendimiento diferentes condiciones de manejo: fechas de siembra (Tofa *et al.* 2020 y Shen *et al.* 2020), niveles de riego, fertilización nitrogenada (Marek *et al.* 2017 y Abedinpour y Sarangi 2018) y densidad de siembra (Ren *et al.* 2020). En la literatura consultada al respecto se destaca el potencial de DSSAT para estimar el crecimiento y rendimiento de cultivos en diferentes condiciones ambientales y de manejo.

DSSAT necesita ser calibrado y validado para poder realizar simulaciones de la respuesta del cultivo a determinados factores. En la calibración, los parámetros en la base de datos del modelo se ajustan: (i) mediante varios escenarios de simulación hasta obtener un ajuste aceptable entre valores simulados y observados en experimentos de campo, y también (ii) a partir de datos experimentales de la literatura para la región en la que se validará. La validación es el procedimiento mediante el cual se evalúa el desempeño del modelo, contrastando los valores simulados de una determinada variable con datos reales obtenidos en experimentos de campo. El objetivo principal al evaluar el desempeño de un modelo de simulación de cultivos es valorar su utilidad práctica como herramienta de investigación o apoyo en la toma de decisiones acerca del manejo y planificación a nivel de finca, regional o nacional (Soto-Bravo y González-Lutz 2019).

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal de gran importancia económica en el mundo para el consumo humano y animal, con producción global de 500 millones de toneladas. Este cultivo cubre un área superior a los 120 millones de hectáreas y se cultiva en más de 70 países, aunque predomina fundamentalmente en el continente americano (Mendoza 2017 y Pérez-Madruga *et al.* 2019).

En Cuba, el maíz abarca una superficie entre 77 000 y 100 000 hectáreas. Se destacan en su producción las provincias de las regiones centrales y orientales, con las mayores extensiones de superficie de siembra. En el país existen 47 variedades comerciales, cuatro son tradicionales y las restantes son cultivares procedentes de diferentes programas nacionales de mejoramiento genético. En la actualidad, la productividad de estos cultivares no supera las 1.44-2.35 t ha⁻¹ como promedio (ONEI 2017).

A partir de estas condiciones, el objetivo de este trabajo fue calibrar el modelo DSSAT para el cultivar de maíz P-7928 y explorar estrategias de manejo para mejorar la producción del cultivo, que incluyó densidad de siembra, niveles de fertilización y condiciones edafoclimáticas.

Materiales y Métodos

Para obtener los valores de los coeficientes genéticos de la variedad de maíz P-7928 se tomaron datos de experimentos desarrollados en el Instituto Nacional

were used, corresponding to November 2008 and June and July 2009.

A random block design with three replications was used. The sowing was carried out manually, with a sowing frame of 0.90 m x 0.30 m and a sowing density of 5 plants m⁻².

The agricultural labor was carried out as recommended in the Technical Instructions for Maize Cultivation (IIG 2012). The water availability was ensured throughout the crop cycle. The control of pests and weeds was effectively carried out and fertilization was carried out by applying K₂O and P₂O₅ as basal dressing, at a rate of 60 kg ha⁻¹ of both, and 120 kg ha⁻¹ of nitrogen, divided during the crop cycle (sowing, 30 and 60 d after planting). The complete formula (9-13-17) and urea (46 % N) were used as carriers, so that the plants developed without limitations.

Data collection. The duration in days of the phenological phases of the crop (dates of emergence, anthesis and physiological maturity) was evaluated in each experimental plot. Each phase was identified when more than 50 % of the experimental plot showed the characteristics of these stages and the crop cycle was established by adding the duration of each one of them.

In each experimental plot, the agricultural yield and its components were determined: weight (g), length (cm) and diameter (cm) of the ears, number of rows and number of grains per ear and weight of 100 grains (g). An area of 1 m² was taken, with two repetitions in each replication and the values were expressed in t ha⁻¹, at 14 % grain moisture.

Preparation of input files. Six input files were created to run the CERES-Maize model inserted in DSSAT v4.6: file X, file A, file T, soil file, climate file and genetic coefficients file (Alderman 2020).

In files A and T the values of the physiological variables observed in the experiments were stored. Subsequently, they were compared with the values simulated by the model for calibration.

Data on field conditions, experimental treatments and simulation options were stored in file X. Crop production management data, separated into several sections, make up the majority of this file.

The soil in the area where the experiments were carried out is typical ferralitic, according to the Cuban soil classification (Hernández *et al.* 2015) (table 1).

de Ciencias Agrícolas (230 01' latitud norte y 820 08' longitud oeste a 138 m s.n.m). Se utilizaron tres fechas de siembra, correspondientes a noviembre de 2008 y junio y julio de 2009.

Se utilizó un diseño de bloques al azar, con tres réplicas. La siembra se realizó de forma manual, con marco de siembra de 0.90 m x 0.30 m y densidad de siembra de 5 plantas m⁻².

Las labores fitotécnicas se realizaron según lo recomendado en el Instructivo Técnico del Cultivo del Maíz (IIG 2012). Se aseguró la disponibilidad de agua durante todo el ciclo del cultivo. El control de plagas y arvenses se realizó de manera efectiva y la fertilización se efectuó mediante la aplicación de K₂O y P₂O₅ de fondo, a razón de 60 kg ha⁻¹ de ambos, y 120 kg ha⁻¹ de nitrógeno, fraccionados durante el ciclo del cultivo (siembra, 30 y 60 d después de plantado). Se utilizaron como portadores la fórmula completa (9-13-17) y la urea (46 % de N), de forma tal que las plantas se desarrollaran sin limitaciones.

Recolección de los datos. La duración en días de las fases fenológicas del cultivo (fechas de emergencia, anthesis y madurez fisiológica) se evaluó en cada parcela experimental. Cada fase se identificó cuando más del 50 % de la parcela experimental mostró las características de estas etapas y se estableció el ciclo del cultivo mediante la sumatoria de la duración de cada una de ellas.

En cada parcela experimental se determinó el rendimiento agrícola y sus componentes: peso (g), longitud (cm) y diámetro (cm) de las mazorcas, cantidad de hileras y número de granos por mazorca y peso de 100 granos (g). Se tomó un área de 1 m², con dos repeticiones en cada réplica y los valores se expresaron en t ha⁻¹, al 14 % de humedad del grano.

Preparación de los ficheros de entrada. Se crearon seis ficheros de entrada para correr el modelo CERES-Maize insertado en DSSAT v4.6: fichero X, fichero A, fichero T, fichero de suelo, fichero de clima y fichero de coeficientes genéticos (Alderman 2020).

En los ficheros A y T se almacenaron los valores de las variables fisiológicas observadas en los experimentos. Posteriormente, se compararon con los valores simulados por el modelo para la calibración.

En el fichero X se almacenaron datos de las condiciones de campo, tratamientos experimentales y opciones de simulación. Los datos de manejo de la producción de cultivos, separados en varias secciones, constituyen la mayor parte de este fichero.

Table 1. Chemical properties of the soil from the experimental area

Depth, cm	pH	OM, %	P, p.p.m.	Ca, cmol kg ⁻¹	Mg, cmol kg ⁻¹	K, cmol kg ⁻¹	Na, cmol kg ⁻¹
0-15	7.36	3.79	122.6	16.84	2.66	1.15	0.21

For the preparation of the climate file, the values of the meteorological variables (maximum and minimum temperatures, daily rainfalls and global radiation),

El suelo del área donde se desarrollaron los experimentos es ferralítico típico, según la clasificación de los suelos de Cuba (Hernández *et al.* 2015) (tabla 1).

corresponding to the months in which the experiments were carried out, were used. These data were obtained from Tapaste meteorological station, a few meters from the experimental area (table 2).

Para la confección del fichero de clima se utilizaron los valores de las variables meteorológicas (temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones diarias y radiación global), correspondientes a los meses en que se

Table 2. Average monthly performance of the climatic variables in the years in which the experiments were carried out at INCA

Months	2008				2009			
	Temp. maximum, °C	Temp. minimum, °C	Precip., mm	Global radiation, J/m ²	Temp. maximum, °C	Temp. minimum, °C	Precip., mm	Global radiation, J/m ²
J	27.1	14.9	38.3	16.74	25.8	14.0	50.8	16.48
F	29	17.4	27.1	18.96	25.6	12.8	29.9	19.93
M	29.2	17.6	115.3	22.12	28.0	15.5	21.9	22.73
A	29.2	16.9	145.6	25.29	30.3	18.4	17.1	24.67
M	32.1	20.4	139.2	25.93	31.7	20.4	238.5	25.36
J	31.6	21.7	222.2	24.14	31.3	20.8	225.5	24.71
J	32.2	21.3	177.5	24.95	33.0	22.3	80.4	24.68
A	32.3	21.5	248.2	23.79	32.6	22.5	197.7	23.10
S	31.1	21.8	346.0	20.11	32.3	21.9	189.4	21.44
O	29.5	20.0	110.0	17.65	31.5	21.3	102.7	18.43
N	26.0	15.5	116.4	15.78	28.0	17.7	51.2	15.75
D	26.6	16.1	18.1	14.87	28.0	17.8	60.1	14.52

Crop simulation model calibration. To calibrate the CERES-Maize model for DSSAT, six genetic coefficients were obtained (P1, P2, P5, PHINT, G2 and G3). The P coefficients are considered phenological aspects of the crop, such as flowering and ripening. The G is related to the potential yield of a specific variety (Ahmed *et al.* 2016) (table 3).

desarrollaron los experimentos. Estos datos se obtuvieron de la estación meteorológica de Tapaste, a pocos metros del área experimental (tabla 2).

Calibración del modelo de simulación de cultivos. Para calibrar el modelo CERES-Maize para DSSAT se obtuvieron seis coeficientes genéticos (P1, P2, P5, PHINT, G2 y G3). Los coeficientes P se consideran aspectos

Table 3. Definition of the genetic coefficients of the corn crop

P1	Thermal time from emergence to the end of young phase
P2	Thermal time from the end of the young phase to the spike initiation
P5	Thermal time from the beginning of grain filling to physiological maturity
PHINT	Phylochron interval: thermal time interval between successive appearances of the leaf tip, days degrees
G2	Scale for the partition of assimilates towards the panicle
G3	Grain fill rate during linear grain fill stage and under optimal conditions, mg/day

The genetic coefficients were calculated for each cultivar using the DSSAT GLUE (generalized probability uncertainty estimate) method. For the calibration of the crop simulation model, the data from the experiments of November 2008 and July 2009 were used. GLUE is a Bayesian estimation method to determine the probability distribution between the observed data and those estimated by the crop simulation model. The coefficients, whose values show

fenológicos del cultivo, como la floración y la maduración. Los G se relacionan con el rendimiento potencial de una variedad específica (Ahmed *et al.* 2016) (tabla 3).

Los coeficientes genéticos se calcularon para cada cultivar mediante el método DSSAT GLUE (estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada). Para la calibración del modelo de simulación de cultivos se utilizaron los datos de los experimentos de noviembre de 2008 y julio de 2009. GLUE es un método de

the best fit, were copied into the DSSAT CUL file to apply them in the program routines and evaluate the model. This was validated with the data from the June 2009 experiment.

In addition, the square root of the mean square of the normalized error (RMSEn) and the d index (Willmott 1982) were calculated, according to equations 1 and 2:

$$RMSEn = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Si - Oi)^2}{n}}}{\bar{Ob}} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - \bar{Ob}| + |Oi - \bar{Ob}|)^2} \quad (2)$$

Where:

Si y *Oi*: simulated and observed values

n: number of observations

(\bar{Ob}): mean of *Oi* mean values

The RMSEn was used to provide a percentage measure of the relative difference between simulated and observed values for total plant weight. A simulation is considered excellent if the RMSEn is less than 10 %, good if it is between 10 and 20 %, reasonable if it is between 20 and 30 %, and bad if it is higher than 30 % (Raes *et al.* 2018). Willmott (1982) states that the value corresponding to *d* must be close to 1.

Simulations. For the simulations, the file of the experiment carried out in June 2009 was taken and insert in the seasonal analysis tool, included in DSSAT. The sensitivity analysis of grain yield was evaluated in three different scenarios

1. By varying the fertilizer doses from 30 to 210 kg ha⁻¹ of nitrogen, with an interval of 30 kg ha⁻¹ of nitrogen and sowing density of 5 plants m⁻²

2. When evaluating the densities 5 plants m⁻², 7 plants m⁻², 8 plants m⁻², 10 plants m⁻², 15 plants m⁻² and 20 plants m⁻², three applications of nitrogen fertilization were made, each of 40 kg ha⁻¹ of nitrogen. One application was made at the time of sowing, and the rest was made monthly until adding 120 kg ha⁻¹ of nitrogen.

3. Record of the edaphoclimatic conditions of the localities Los Palacios in Pinar del Río and Tapaste in Mayabeque, and the soil and climate conditions for Los Palacios (tables 4 and 5, respectively).

estimación bayesiano para determinar la distribución de probabilidad entre los datos observados y los estimados por el modelo de simulación de cultivos. Los coeficientes, cuyos valores exhiben el mejor ajuste, se copiaron en el archivo DSSAT CUL para aplicarlos en las rutinas del programa y evaluar el modelo. Este se validó con los datos del experimento de junio de 2009.

Se calcularon además, la raíz cuadrada del cuadrado medio del error normalizado (RMSEn) y el índice *d* (Willmott 1982), de acuerdo con las ecuaciones 1 y 2:

$$RMSEn = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Si - Oi)^2}{n}}}{\bar{Ob}} \quad (1)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - \bar{Ob}| + |Oi - \bar{Ob}|)^2} \quad (2)$$

Donde:

Si y *Oi*: valores simulados y observados

n: número de observaciones

(\bar{Ob}): media de los valores de *Oi*

La RMSEn se usó para ofrecer una medida porcentual de la diferencia relativa entre los valores simulados y observados para el peso total de la planta. Una simulación se considera excelente si el RMSEn es menor que 10 %, buena si se encuentra entre 10 y 20 %, razonable si está entre 20 y 30 %, y mala si es mayor que 30 % (Raes *et al.* 2018). Willmott (1982) plantea que el valor correspondiente a *d* debe estar próximo a 1.

Simulaciones. Para las simulaciones se tomó el fichero del experimento realizado en junio de 2009 y se introdujo en la herramienta de análisis estacional, incluida en DSSAT. El análisis de sensibilidad del rendimiento del grano se evaluó en tres escenarios diferentes:

1. Al variar las dosis del fertilizante de 30 a 210 kg ha⁻¹ de nitrógeno, con intervalo de 30 kg ha⁻¹ de nitrógeno y densidad de siembra de 5 plantas m⁻²

2. Al evaluar las densidades 5 plantas m⁻², 7 plantas m⁻², 8 plantas m⁻², 10 plantas m⁻², 15 plantas m⁻² y 20 plantas m⁻², se hicieron tres aplicaciones de fertilización nitrogenada, cada una de 40 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Una aplicación se hizo en el momento de la siembra, y el resto se realizó mensualmente hasta sumar 120 kg ha⁻¹ de nitrógeno.

3. Registro de las condiciones edafoclimáticas de las localidades Los Palacios en Pinar del Río y Tapaste en Mayabeque, y las condiciones de suelo y clima para Los Palacios (tablas 4 y 5, respectivamente.)

Table 4. Chemical properties of Los Palacios soil used in the simulation

Depth, cm	pH	OM, %	P, ppm	Ca, cmol kg ⁻¹	Mg, cmol kg ⁻¹	K, cmol kg ⁻¹	Na, cmol kg ⁻¹
0-15	5.16	2.34	27.94	6.68	3.04	0.12	0.19

Table 5. Average monthly performance of the climatic variables of Los Palacios used in the simulation

Months	2009		
	T. max, °C	T min, °C	Precipitations, mm
J	16.63	26.57	5.54
F	15.02	26.43	1.26
M	17.62	27.87	0.95
A	19.98	30.48	0.34
M	21.65	31.50	5.15
J	22.79	31.57	4.94
J	23.99	32.93	2.65
A	23.86	33.10	4.60
S	23.83	32.85	5.08
O	22.92	31.78	2.04
N	19.67	28.77	2.28
D	19.46	28.23	1.30

Results and Discussion

To calibrate the crop simulation model, the experiments planted in November 2008 and July 2009 were used. The GLUE Select Wizard option, version 4.6.1.0 was used and 10,000 iterations were performed. Genetic coefficients were obtained for cultivar P7928 (table 6).

Resultados y Discusión

Para calibrar el modelo de simulación de cultivos se utilizaron los experimentos sembrados en noviembre 2008 y julio 2009. Se usó la opción de GLUE Select Wizard, versión 4.6.1.0. y se realizaron 10 000 iteraciones. Se obtuvieron los coeficientes genéticos para el cultivar P7928 (tabla 6).

Table 6. Genetic coefficients for the corn P-7928 variety

Genotype	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
P-7928	219.1	0.694	594.3	821.1	16.11	55.00

Table 7 shows the comparison of the observed and simulated values, in terms of days to anthesis, days to maturation and yield. The simulated yields were related to those observed, showing a $d = 0.96$. The RMSEn behaved with an acceptable value of 28 % and R^2 of 0.985. This shows the good fit of the crop simulation model (figure 1) (Tovihoudji *et al.* 2019 and Tofa *et al.* 2020).

It is of great importance to simulate corn crop production and develop optimal management strategies to achieve a sustainable agriculture (Jiang *et al.* 2019). From the previous results (Figure 2) it is evident that

En la tabla 7 se muestra la comparación de los valores observados y simulados, en cuanto a días a la antesis, días a la maduración y rendimiento. Los rendimientos simulados se relacionaron con los observados, al mostrar $d = 0,96$. El RMSEn se comportó con valor aceptable de 28 % y R^2 de 0.985. Esto evidencia el buen ajuste del modelo de simulación de cultivos (figura 1) (Tovihoudji *et al.* 2019 y Tofa *et al.* 2020).

Es de gran importancia simular la producción del cultivo del maíz y desarrollar estrategias de manejo óptimas para lograr una agricultura sostenible (Jiang *et al.* 2019). De los resultados (figura 2) anteriores se evidencia que con

Table 7. Comparación de los valores observados y simulados

Variables	Observed	Simulated
Days to anthesis, ddp	53.00	56.00
Days to physiological maturation, ddp	82.00	87.00
Yield, kg ha ⁻¹	7257.00	7620.00
Number of grains per m ²	2452.00	3237.00
Weight of a grain, g	0.296.00	0.2354.00
Number of grains per ear	490.00	647.50
Total biomass at maturation, kg ha ⁻¹	18026.00	14215.00
Harvest index	0.40	0.536

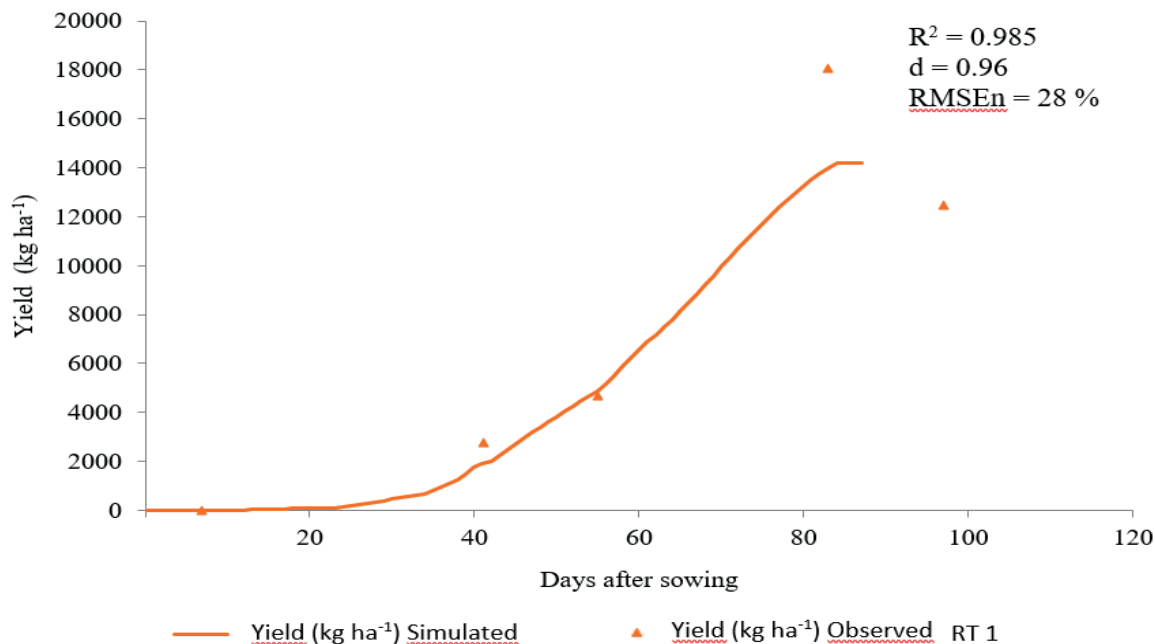


Figure 1. Result of the calibration of the crop simulation model for the yield variable

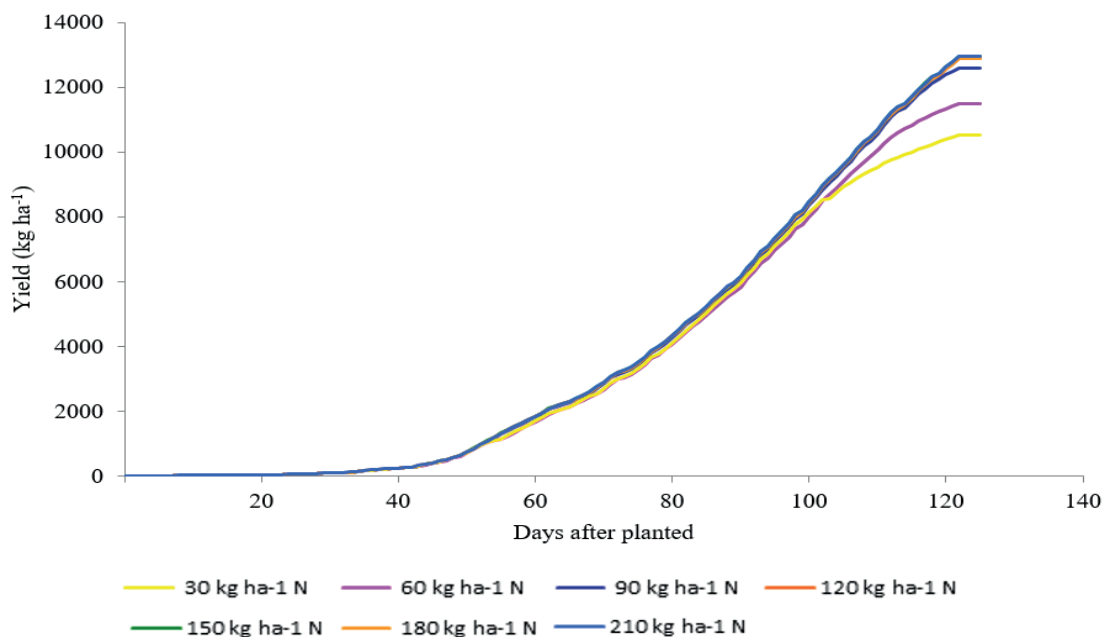


Figure 2. Simulations with different doses of nitrogen fertilization

with 30 kg ha⁻¹ and 60 kg ha⁻¹ of nitrogen fertilization, the yields are low. However, from 90 kg ha⁻¹ they are similar, and exceed 7 t ha⁻¹, which coincides with the crop technical instructions (IIG 2012). These results agree with what was reported in researches by Martín *et al.* (2009), who obtained a stable maximum yield from 69.07 kg ha⁻¹ of nitrogen.

Regarding the study of plantation densities, the results show that with a density of 7 plants m⁻² the highest yields can be obtained (figure 3). Although these results differ from those showed in the crop technical instructions, which recommends 5 plants m⁻² (IIG 2012), they coincide with other researchers that propose a density of 7.5 plants m⁻² (Xu *et al.* 2017 and Yan *et al.* 2017).

30 kg ha⁻¹ y 60 kg ha⁻¹ de fertilización nitrogenada los rendimientos son bajos. Sin embargo, a partir de 90 kg ha⁻¹ son similares, y superan las 7 t ha⁻¹, lo que coincide con el instructivo técnico del cultivo (IIG 2012). Estos resultados concuerdan con lo informado en investigaciones de Martín *et al.* (2009), quienes obtuvieron un rendimiento máximo estable a partir de los 69.07 kg ha⁻¹ de nitrógeno.

En relación con el estudio de las densidades de plantación, los resultados evidencian que con una densidad de 7 plantas m⁻² se pueden obtener los rendimientos mayores (figura 3). Aunque estos resultados difieren de los expuestos en el instructivo técnico del cultivo, que recomienda 5 plantas m⁻² (IIG 2012), coinciden con otras investigaciones que proponen densidad de 7.5 plantas m⁻² (Xu *et al.* 2017 y Yan *et al.* 2017).

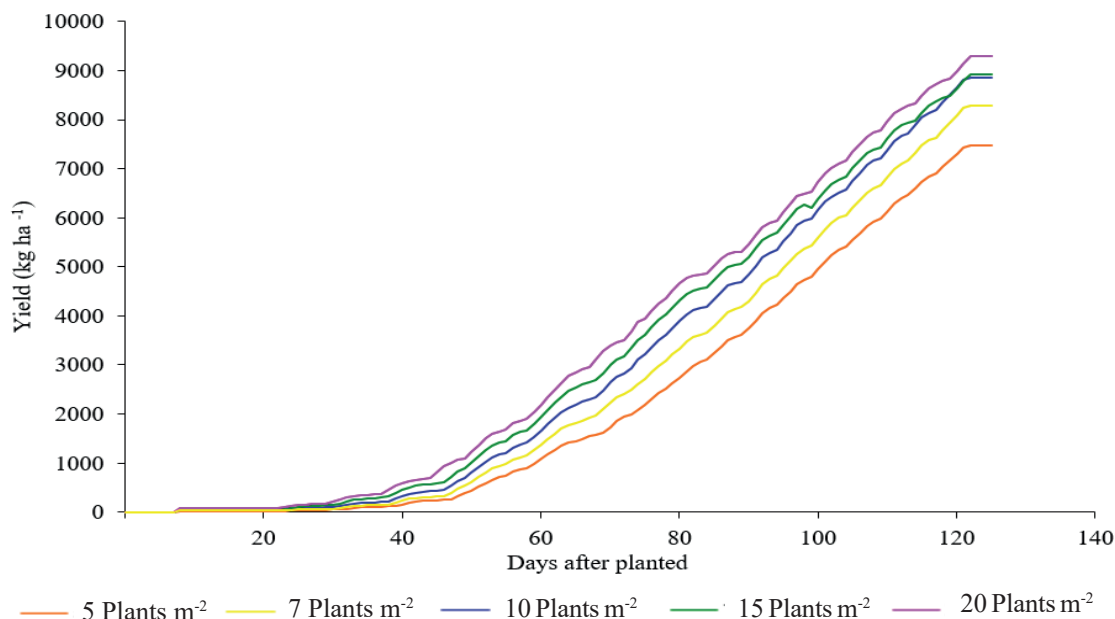


Figure 3. Simulations with different planting densities

Regarding the study of the yield performance in different edaphoclimatic conditions, in the localities Los Palacios, in Pinar del Río, and Tapaste, in Mayabeque, the simulated yields were 4694 kg ha⁻¹ and 7945 kg ha⁻¹, respectively. Higher yields were evidenced in Tapaste locality, which must be conditioned by the performance of edaphoclimatic conditions (figure 4).

En relación con el estudio del comportamiento de los rendimientos en diferentes condiciones edafoclimáticas, en las localidades de Los Palacios, en Pinar del Río, y Tapaste, en Mayabeque, los rendimientos simulados fueron de 4694 kg ha⁻¹ y 7945 kg ha⁻¹, respectivamente. Se evidenciaron rendimientos superiores en la localidad de Tapaste, lo que debe estar condicionado por el comportamiento de las condiciones edafoclimáticas (figura 4).

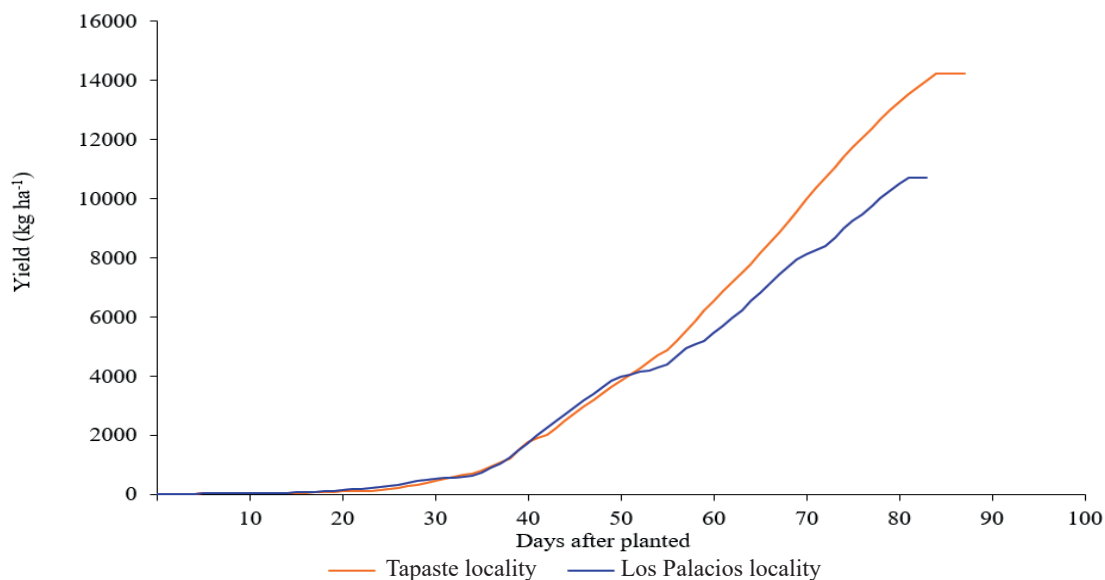


Figure 4. Simulations in Tapaste and Los Palacios localities

Los Palacios locality has a ferruginous nodular gley soil, characterized by poor internal drainage. The conditions of accumulation of water affect the corn yield because the roots cannot breathe well. On the other hand, Tapaste has a red ferralitic soil, which has good internal drainage and excellent physical properties for the development of crop.

Through simulations it was shown that the optimal

La localidad de Los Palacios tiene un suelo gley nodular ferruginoso, que se caracteriza por un mal drenaje interno. Las condiciones de acumulación de agua afectan el rendimiento del cultivo del maíz porque las raíces no pueden respirar bien. Por el contrario, Tapaste posee un suelo ferralítico rojo, que tiene buen drenaje interno y excelentes propiedades físicas para el desarrollo del cultivo.

Mediante las simulaciones se demostró que la opción

option for this variety is to use a planting density of 7 plants m⁻² and carry out nitrogen fertilization with 120 kg ha⁻¹ in hydrated red ferralitic soils.

Conclusions

Obtaining the genetic coefficients of corn P7928 variety allowed establishing that the DSSAT model can be used to model the crop yield and its physiological components under Cuban conditions.

The simulation showed that from 90 kg ha⁻¹ of nitrogen fertilization, the yields exceed 7 t ha⁻¹. The highest yield is the one corresponding to the 150 kg ha⁻¹ dose.

Through the simulation it was shown that with a density of 7 plants m⁻² the highest yields can be obtained.

The study of the performance of yields in different edaphoclimatic conditions shows their influence on the crop response.

Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interests among them

Author's contribution

O. Rodríguez González: Original idea, analysis of the information writing the manuscript

R. Florido Bacallao: Analysis of the information, writing the manuscript

Naivy Hernández Córdova: Design and conducting the experiment, analysis of the information

F. Soto Carreño: Analysis of the information

E. I. Jeréz Mompié: Analysis of the information

Deborah González Viera: Analysis of the information

R. J. Vázquez Montenegro: Analysis of the information

óptima para esta variedad es utilizar una densidad de plantación de 7 plantas m⁻² y realizar una fertilización nitrogenada con 120 kg ha⁻¹ en suelos ferralíticos rojos hidratados.

Conclusiones

La obtención de los coeficientes genéticos de la variedad de maíz P7928 permitió establecer que el modelo DSSAT se puede usar para modelar el rendimiento del cultivo y sus componentes fisiológicos en las condiciones de Cuba.

La simulación demostró que a partir de 90 kg ha⁻¹ de fertilización nitrogenada los rendimientos superan las 7 t ha⁻¹. El mayor rendimiento es el que corresponde a la dosis de 150 kg ha⁻¹.

Mediante la simulación se evidenció que con una densidad de 7 plantas m⁻² se pueden obtener los rendimientos mayores.

El estudio del comportamiento de los rendimientos en diferentes condiciones edafoclimáticas demuestra la influencia de estas en la respuesta del cultivo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

O. Rodríguez González: Idea original, análisis de la información, redacción del manuscrito

R. Florido Bacallao: Análisis de la información, redacción del manuscrito,

Naivy Hernández Córdova: Diseño y conducción del experimento, análisis de la información

F. Soto Carreño: Análisis de la información

E. I. Jeréz Mompié: Análisis de la información

Deborah González Viera: Análisis de la información

R. J. Vázquez Montenegro: Análisis de información

References

- Abedinpour, M. & Sarangi, A. 2018. "Evaluation of DSSAT- Ceres Model for Maize under Different Water and Nitrogen Levels". *Pertanika Journal of Science & Technology*, 26(4): 1605 - 1618, ISSN: 2231-8526.
- Ahmed, M., Akram, M.N., Asim, M., Aslam, M., Hassan, F., Higgins, S., Stöckle, C.O. & Hoogenboom, G. 2016. "Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application". *Computers and Electronics in Agriculture*, 123: 384-401, ISSN: 0168-1699, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.015>.
- Alderman, P.D. 2020. "A comprehensive R interface for the DSSAT Cropping Systems Model". *Computers and Electronics in Agriculture*, 172: 105325, ISSN: 0168-1699, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105325>.
- Dias, M.P.N.M., Navaratne, C.M., Weerasinghe, K.D.N. & Hettiarachchi, R.H.A.N. 2016. "Application of DSSAT Crop Simulation Model to Identify the Changes of Rice Growth and Yield in Nilwala River Basin for Mid-centuries under Changing Climatic Conditions". *Procedia Food Science* 6: 159-163, ISSN: 2211-601X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2016.02.039>.
- Gouache, D., Bouchon, A.S., Jouanneau, E. & Le Bris, X. 2015. "Agrometeorological analysis and prediction of wheat yield at the departmental level in France". *Agricultural and Forest Meteorology*, 209–210: 1–10, ISSN: 0168-1923, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.04.027>.
- Guevara, E. 2007. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. Available: <http://www.fertilizando.com/articulos/simulaciondesarrollocrecimientoyrendimientoenmaiz.asp>.
- Hernández, A., Pérez, J.M., Bosh, D. & Castro, N. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. 1st Ed. Ed. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, González, O. (ed.), San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, p. 93.
- Hernández, N., Soto, F. & Florido, R. 2017. "Influencia de tres fechas de siembra sobre la productividad biológica del cultivo del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)". *Cultivos Tropicales*, 38(3): 64-71, ISSN: 1819-4087.
- IIG. 2012. Guía Técnica para el cultivo del Maíz.

- Jiang, R., He, W., Zhou, W., Hou, Y., Yang, J.Y. & He, P. 2019. "Exploring management strategies to improve maize yield and nitrogen use efficiency in northeast China using the DNDC and DSSAT models". *Computers and Electronics in Agriculture*, 166: 104988, ISSN: 0168-1699, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104988>.
- Marek, G.W., Marek, T.H., Xue, Q., Gowda, P.H., Evett, S.R. & Brauer, D.K. 2017. "Simulating Evapotranspiration and Yield Response of Selected Corn Varieties under Full and Limited Irrigation in the Texas High Plains Using DSSAT-CERES-Maize. Trans". *Transactions of the ASABE*, 60(3): 837-846, ISSN: 2151-0040, DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.12048>.
- Martín, G.M., Rivera, R., Arias, L. & Rentería, M. 2009. "Efecto de la *Canavalia ensiformis* y micorrizas arbusculares en el cultivo del maíz". *Cuban Journal of Agricultural Science*, 43(2): 191-199, ISSN: 2079-3480.
- Mendoza, P.J.G. 2017. "El cultivo del maíz en el mundo y en Perú". *Revista De Investigaciones De La Universidad Le Cordon Bleu* 4(2): 73-79, ISSN: 2409-1537, DOI: <https://doi.org/10.36955/RIULCB.2017v4n2.005>.
- ONEI. 2017. Capítulo 9: Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Pesca. In: *Anuario Estadístico de Cuba 2016*. Oficina Nacional de Estadística e Información. La Habana, Cuba, p. 449, ISBN: 978-959-7119-62-3.
- Pérez-Madruga, Y., Rosales-Jenquis, P.R., Costales-Menéndez, D. & Falcón-Rodríguez, A. 2019. "Aplicación combinada de quitosano y HMA en el rendimiento de maíz". *Cultivos Tropicales*, 40(4): e06, ISSN: 1819-4087.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. & Fereres, E., 2018. Chapter 2: Users Guide. In: *AquaCrop Reference Manual*. Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Ren, H., Li, Z., Cheng, Y., Zhang, J., Liu, P., Li, R., Yang, Q., Dong, S., Zhang, J. & Zhao, B. 2020. "Narrowing Yield Gaps and Enhancing Nitrogen Utilization for Summer Maize (*Zea mays* L) by Combining the Effects of Varying Nitrogen Fertilizer Input and Planting Density in DSSAT Simulations". *Frontiers in Plant Science*, 11: 560466, ISSN: 1664-462X, DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.560466>.
- Rodríguez, O., Florido, R. & Varela, M. 2018. "Aplicaciones de la modelación matemática y la simulación de cultivos agrícolas en Cuba". *Cultivos Tropicales*, 39(1): 121-126, ISSN: 1819-4087.
- Shen, H., Xu, F., Zhao, R., Xing, X. & Ma, X. 2020. "Optimization of Sowing Date, Irrigation, and Nitrogen Management of Summer Maize Using the DSSAT-CERES-Maize Model in the Guanzhong Plain, China". *Transactions of the ASABE*, 63(4): 789-797, ISSN: 2151-0040, DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.13654>.
- Soto-Bravo, F. & González-Lutz, M.I., 2019. "Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas". *Agronomía Mesoamericana*, 30(2): 517-534, ISSN: 2215-3608, DOI: <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.33839>.
- Tatsumi, K. 2016. "Effects of automatic multi-objective optimization of crop models on corn yield reproducibility in the U.S.A". *Ecological Modelling*, 322: 124-137, ISSN: 0304-3800, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.11.006>.
- Tian, Z., Xu, H., Sun, L., Fan, D., Fischer, G., Zhong, H., Zhang, P., Pope, E., Kent, C. & Wu, W. 2020. "Using a cross-scale simulation tool to assess future maize production under multiple climate change scenarios: An application to the Northeast Farming Region of China". *Climate Services*, 18: 100150, ISSN: 2405-8807, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100150>.
- Tofa, A.I., Chiezey, U.F., Babaji, B.A., Kamara, A.Y., Adnan, A.A., Beah, A. & Adam, A.M. 2020. "Modeling Planting-Date Effects on Intermediate-Maturing Maize in Contrasting Environments in the Nigerian Savanna: An Application of DSSAT Model". *Agronomy*, 10(6): 871, ISSN: 2073-4395, DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10060871>.
- Tovihoudji, P.G., Akponikpè, P.B.I., Agbossou, E.K. & Bièlders, C.L. 2019. "Using the DSSAT Model to Support Decision Making Regarding Fertilizer Microdosing for Maize Production in the Sub-humid Region of Benin". *Frontiers in Environmental Science*, 7: 13, ISSN: 2296-665X, DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00013>.
- Willmott, C.J. 1982. "Some Comments on the Evaluation of Model Performance". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11): 1309-1313, ISSN: 520-0477, DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063%3C1309:SCOTEO%3E2.0.CO;2).
- Xu, W., Liu, C., Wang, K., Xie, R., Ming, B., Wang, Y., Zhang, G., Liu, G., Zhao, R., Fan, P., Li, S. & Hou, P. 2017. "Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China". *Field Crops Research*, 212: 126-134, ISSN: 0378-4290, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.006>.
- Yan, P., Pan, J., Zhang, W., Shi, J., Chen, X. & Cui, Z. 2017. "A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen". *Plos One*, 12(2): e0172717, ISSN: 1932-6203, DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172717>.

Received: November 24,2020

Accepted: April 15, 2021