

Revisión bibliográfica

APLICACIONES DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA Y LA SIMULACIÓN DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN CUBA

Review

Applications of mathematical modeling and agricultural crop simulation in Cuba

Osmel Rodríguez González¹✉, René Florido Bacallao²
y Mario Varela Nualles²

ABSTRACT. A bibliographic review was carried out on the applications of modeling and simulation in agricultural crops with the aim of publicizing the characteristics and importance of their use, as tools for the estimation of crop yields. A summary of some concepts related to the modeling of agricultural crops and the main types of models that can be used from the point of view of their use in agriculture.

RESUMEN. Se realizó una revisión bibliográfica sobre las aplicaciones de la modelación y simulación en cultivos agrícolas en Cuba con el objetivo de dar a conocer las características e importancia del uso de los mismos, como herramientas para la estimación de los rendimientos de los cultivos agrícolas. Se presenta un resumen de algunos conceptos relacionados con la modelación de cultivos y los tipos principales de modelos que se pueden utilizar desde el punto de vista de su uso en la agricultura.

Key words: estimation, simulation models, yield

Palabras clave: estimación, modelos de simulación, rendimiento

INTRODUCCIÓN

En las décadas del siglo XX y con fuerza en el actual, las técnicas y tecnologías llamadas Sistemas de Información (SI) han tenido un desarrollo vertiginoso, empleándose en la industria, la administración de negocios y en muchos aspectos de la vida cotidiana. Este desarrollo ha estado vinculado de forma muy directa al perfeccionamiento de las computadoras y a las posibilidades de obtener, ordenar y procesar efectivamente las bases de datos (1).

Con la creciente capacidad de las computadoras y la inmensa investigación en el campo de las ciencias de la computación, se otorgan nuevas herramientas para apoyar el proceso de la toma de decisiones en diversas disciplinas y áreas de diseño y manejo de la industria. La modelación y la simulación son unas de las herramientas más importantes e interdisciplinarias (2).

El uso de los modelos de simulación se viene extendiendo en la agricultura y constituye una herramienta para la investigación, así como para productores y asesores técnicos, que ahora pueden definir, en el universo virtual de una computadora, cuál es la mejor práctica de manejo para un cultivo en determinada campaña y sitio productivo (3). La estimación precisa de los rendimientos

agrícolas es de suma importancia teórica y práctica; pero es un tema no resuelto aún totalmente (4). Pues el rendimiento es el resultado final de un grupo de interacciones, donde intervienen el genotipo, el clima, el suelo y el manejo del cultivo. Dentro del contexto de la agricultura cubana, la modelación de cultivos es una disciplina nueva y la literatura sobre este tema es considerada escasa (5).

Es por ello que el objetivo de este trabajo es dar a conocer las características e importancia del uso de la modelación y simulación de cultivos, como herramienta principal en los procesos de toma de decisiones, para lograr aplicar estos en la estimación de la capacidad productiva en distintas condiciones climáticas y de manejo en Cuba.

¹ Departamento Informática. Universidad Agraria de la Habana

² Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). Gaveta postal No.1, San José de las Lajas. Mayabeque, Cuba. CP 32700

✉ osmelr@unah.edu.cu

DEFINICIÓN DE MODELO

Se puede decir que un modelo es la representación ideal de un sistema y la forma en que este opera, en los cuales se destacan características relevantes del objeto en estudio, cuyo objetivo es analizar o predecir el comportamiento futuro (6,7).

Es por excelencia la herramienta principal que utiliza la estadística para simbolizar problemas o situaciones de la vida. Un caso particular lo constituyen los modelos matemáticos.

TIPOS DE MODELOS

Existen diferentes clasificaciones de los modelos. Una de las más generales es la presentada por Torres (8); según la cual un modelo puede ser una réplica del objeto que representa. Cambiando la escala o el material con el que se construye se denomina isomórfico y cuando tiene algún grado de abstracción del objeto que representa, teniendo en cuenta solamente las variables más relevantes, se denomina homomórfico.

Es importante señalar que a mayor nivel de abstracción hay menor grado de similitud y uniformidad entre modelo y objeto representado y viceversa (9). De acuerdo con el nivel de abstracción, se pueden agrupar los modelos físicos y de escala como isomórficos y los análogos, matemáticos y de simulación como homomórficos.

Los modelos matemáticos son la representación de un sistema por medio de ecuaciones matemáticas o distribuciones estadísticas de valores aleatorios (10), permitiendo obtener conocimientos científicos cuya veracidad se comprueba en el curso de la práctica social (11). Los modelos matemáticos que más se utilizan en la agronomía se pueden categorizar en dos clases: los modelos solamente predictivos o empíricos y los modelos causales o mecanísticos (12).

Los primeros son descriptivos, se derivan de datos observados sin involucrar procesos fisiológicos y tienen escasa capacidad explicativa (13). Se expresan generalmente como ecuaciones de regresión (con uno o varios factores) y se utilizan para estimar la producción final. Ejemplos de tales modelos incluyen la respuesta de la producción a la aplicación de fertilizantes, la relación entre el área de la hoja y la cantidad de hojas de una planta dada, la relación entre la altura del tallo y el número de tallos, su diámetro y la producción final.

Por el contrario, los modelos mecanísticos poseen capacidad explicativa de la fisiología del cultivo, porque consideran aspectos como la temperatura, la radiación fotosintéticamente activa, el índice de área foliar, la fotosíntesis, la respiración y la eficiencia en el uso de la radiación (13). Estos modelos tienen la habilidad de imitar importantes procesos físicos, químicos o biológicos y describir cómo y por qué resulta una respuesta particular. El analista comienza usualmente con algún empirismo y en la medida que se gana en conocimiento se introducen variables y parámetros adicionales para explicar la producción de la cosecha. Así, el analista adopta un enfoque reduccionista. La mayoría de los modelos de crecimiento de cultivos caen dentro de esta categoría.

Los modelos matemáticos de crecimiento de cultivos han sido desarrollados para evaluar el impacto del cambio climático en la producción de alimentos y para desarrollar estrategias tales como la gestión de riesgos de la aplicación de pesticidas y fertilizantes en el marco agrícola (14); de forma que se logren racionalizar los recursos disponibles.

Para el procesamiento y análisis de la problemática, utilizando análisis de regresión, es necesario considerar (15):

- ◆ Ploteo de puntos para analizar tendencia de datos.
- ◆ Selección del tipo de modelo a ajustar.
- ◆ Ajuste del modelo, con el apoyo de un software apropiado.
- ◆ Descripción del proceso a partir del modelo obtenido.

En estos estudios se requiere de una labor eficiente en la organización y desarrollo de la investigación científica y el conocimiento que esta genera, lo que puede contribuir en gran medida la aplicación consecuente de estos modelos, con el apoyo de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación. Igualmente, con mucha frecuencia, no se valoran los supuestos teóricos de los modelos estadísticos y no se establecen conclusiones válidas a partir de la información analizada (16).

Para la selección del modelo que mejor ajuste los datos del experimento, fundamentalmente en los modelos explicativos y dinámicos, se deben tener en cuenta los siguientes criterios (16):

- ◆ Métodos de ajuste de los modelos.
- ◆ Error estándar de los estimadores de los parámetros (Test t de Student).
- ◆ Coeficiente de variación de los estimadores.
- ◆ Límites de confianza de los parámetros.
- ◆ Test de redundancia de los parámetros.
- ◆ Análisis de varianza relacionado con el modelo en cuestión.
- ◆ Coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado por los grados de libertad, para modelos con diferentes números de parámetros.
- ◆ Suma de cuadrados o Cuadrado Medio Residual.
- ◆ Error estándar de estimación.
- ◆ Test de falta de ajuste del modelo.
- ◆ Análisis del efecto del uso de transformaciones en el modelo.
- ◆ Diagnóstico y tratamiento de la multicolinealidad, en modelos de regresión lineal múltiple.

- ◆ Validación de las predicciones del modelo.
- ◆ Estadístico PRESS (Suma de Cuadrados del Error de Predicción).
- ◆ Estadístico CMEP (Cuadrado Medio del Error de Predicción).
- ◆ Estadístico Cp de Mallows.
- ◆ Coeficientes de correlación entre los resultados predichos y los reales.
- ◆ Análisis de la precisión de las estimaciones.
- ◆ Análisis de los residuos.
- ◆ Normalidad (Test de Shapiro-Wilks, Kolmogorov-Smirnov).
- ◆ Autocorrelación (Test de Rachas, Signos, Durbin-Watson, X^2 de independencia, Ljung y Box).
- ◆ Homocedasticidad (Gráficos de los residuos, Test de Cochran, Bartlett y Hartley).

Varios autores plantean que un modelo de cultivo es la simulación dinámica del crecimiento del cultivo por el uso de la integración numérica de los procesos constituyentes con ayuda de las computadoras (17,18). Pero aunque en muchos trabajos suele verse la modelación y la simulación como un único proceso, estos deben diferenciarse (9), pues la modelación puede realizarse sin necesidad de la simulación, no siendo así para este último, el cual no se puede efectuar sino existe el proceso de modelación.

MODELOS DE SIMULACIÓN DE CULTIVOS

La simulación puede ser definida como una técnica numérica para la realización de experimentos con determinados tipos de modelos matemáticos, los cuales describen el comportamiento de un sistema complejo dinámico, mediante el empleo de la computación (19). Es el proceso de poner a funcionar el modelo para ver si es correcto o no.

El concepto de simulación debe ser dinámico principalmente por dos razones: que es la mejor

comprensión de los procesos involucrados en la producción de cultivos así como la resolución de problemas. Los modelos que sirven como herramienta para resolver modelos suelen ser modelos multidisciplinarios (20).

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos y el análisis del sistema suelo-planta-atmósfera son herramientas importantes para la investigación agrícola moderna (21). Un modelo de cultivos representa de manera sencilla y sintética los procesos fisiológicos y ecológicos más importantes que gobiernan el crecimiento, utilizando ecuaciones matemáticas (20). La comprensión del funcionamiento y evolución de los principales factores responsables de estas condiciones es adquirida comparando resultados de la simulación con observaciones experimentales. Estas observaciones se pueden diseñar para validar el modelo, teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas, edáficas y de manejo del cultivo, según el lugar de implantación (22). Una vez realizada esta primera etapa de validación del modelo, este puede ser utilizado para ayudar a analizar e interpretar distintos escenarios futuros debido a modificaciones que deseen proponerse en el manejo del cultivo, cambios en las condiciones climáticas o para el pronóstico de rendimiento, entre otros indicadores.

Estos modelos pueden aumentar la comprensión y la gestión del sistema agrícola de una manera holística. Los modelos de simulación de cultivos han sido utilizados para investigar el comportamiento de diferentes cultivares en un rango de fechas de siembra en relación con diferentes escenarios suelo-clima.

Los modelos de simulación se presentan como una alternativa para ser empleados en los escenarios futuros (23). Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un

método de último recurso, los avances en las metodologías de simulación y la disponibilidad de *software* que actualmente existe en el mercado han hecho posible que la técnica de simulación sea una de las herramientas más usadas en el análisis de sistemas, porque presenta ventajas tales como (24):

- ◆ Permite estudiar sistemas reales que no se pueden evaluar analíticamente.
- ◆ Hace posible estimar el comportamiento de un sistema existente, si se modifican algunas de las condiciones de funcionamiento actuales.
- ◆ Se pueden comparar distintas alternativas de diseño (o de formas de operar de un sistema), antes de construirlo, para ver cuál se comporta mejor.
- ◆ Permite estudiar en poco tiempo la evolución de un sistema en un período largo de tiempo (se pueden evaluar años de experiencia en el sistema real en unos pocos minutos de simulación).

Numerosos modelos han sido desarrollados por diferentes grupos de trabajo y cada uno de ellos tiene fortalezas y debilidades para predecir las variables de respuesta (25). Por lo que es muy importante, antes de adoptar uno u otro modelo para aplicaciones agrícolas y medioambientales que se realice un trabajo de evaluación y validación exhaustivo de estos (26).

APLICACIONES DE MODELOS MATEMÁTICOS Y LA SIMULACIÓN DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN CUBA

Desde la década de los 80 se ha venido utilizando la modelación por algunos investigadores cubanos con el objetivo de describir el crecimiento de cultivares. En el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA) se realizaron comparaciones entre varias funciones matemáticas para describir el crecimiento de

algunos órganos en posturas de café crecidas en vivero (27). Se determinó, además, la influencia del uso o no de la sombra durante el período de aviveramiento, la altura sobre el nivel del mar y dos fechas de siembra, en la dinámica de crecimiento de plántulas de café (28).

También se han comparado modelos para medir la respuesta a dosis de nitrógeno en maíz y café. Lo cual demostró que un modelo discontinuo rectilíneo resulta más adecuado en el sistema de recomendación de dosis óptimas de fertilizantes nitrogenados para estos cultivos, en comparación al modelo curvilíneo, que brinda dosis óptimas superiores, que implican un menor factor parcial de productividad de la dosis recomendada (29).

Otros trabajos aplicaron herramientas de modelación para el análisis de las respuestas de las interacciones planta-ambiente-manejo en distintos escenarios de la producción de arroz, maíz, sorgo y trigo en Cuba (30); demostrando que estas permiten establecer estrategias para el desarrollo de los cultivos estudiados en escenarios futuros y en otras condiciones de cultivo. Por primera vez en el país, se cuenta con información para poder predecir el comportamiento y rendimiento de estos cereales. Demuestran además que el modelo DSSAT puede ser utilizado para las condiciones de Cuba en los indicadores de rendimiento y sus componentes.

Por los beneficios que aportan los modelos determinísticos, especialistas de la Universidad Agraria de La Habana y del Instituto Nacional de Riego y Drenaje, elaboran los primeros trabajos para utilizar, en las condiciones geográficas de Cuba, cinco de los modelos agrohidrológicos de alcance internacional. Por primera vez en Cuba se brindan los parámetros que describen las propiedades hidráulicas para los principales grupos de suelos

cubanos. Esta investigación le confiere validez al modelo SWACROP para ser utilizado en el cultivo de la papa en condiciones tropicales (31).

Algunos trabajos se han realizado, durante varios años, en la evaluación y validación de diferentes modelos de simulación de transferencias hídricas para las condiciones edafoclimáticas de la región sur de La Habana (actualmente Mayabeque y Artemisa). Estas investigaciones pretenden resumir y discutir las principales características de los modelos de simulación STIC y MACRO y sus posibilidades para la predicción del comportamiento de los cultivos agrícolas ante diferentes manejos de agua, fertilización y ambientes climáticos (32-35).

También se ha utilizado la modelación matemática con el fin de estudiar el crecimiento del diámetro medio, la altura media y el volumen por hectárea de *Pinus caribaea* morelet var. *Caribaea barret* y golfari en la Unidad Silvícola "Los Jazmines" de Viñales y en la Empresa Forestal Integral "La Palma" (36-38). Donde se determinaron los modelos que mejor describen el comportamiento de las variables estudiadas en cada uno de los escenarios.

La aplicación a la producción de pastos y forrajes, tuvo sus inicios en pasto estrella (*C. nlemfuensis*) (39-41), donde se encontraron relaciones polinómicas entre las variables; pero en estos modelos los parámetros no tienen interpretación biológica. Posteriormente se modeló y simuló el comportamiento productivo del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes frecuencias de corte, niveles de fertilización y condiciones climatológicas adversas para el desarrollo de este cultivo (42). El modelo Gompertz utilizado ajustó los datos con coeficientes de determinación que estuvieron alrededor del 99 % para los períodos lluvioso y poco lluvioso. Además pronostica que

un incremento de la temperatura media del planeta en 2 y 4 °C afectará el rendimiento de materia seca acumulada de este cultivo principalmente en el período poco lluvioso.

Otros autores estudiaron la dinámica de acumulación de biomasa del king grass (*P. purpureum*) o de algunos de sus clones con el empleo de modelos no lineales (43-47). Además, en cultivares de *Brachiaria*, *Panicum* y *Pennisetum* y en variedades de *Tithonia diversifolia*, se evaluaron diferentes modelos y encontraron ajustes lineales para las variables en estudio (48,49).

CONCLUSIONES

El avance de los sistemas de información en la agricultura, unido al desarrollo de la computación ha permitido un desarrollo acelerado de la modelación de cultivos agrícolas. Estos constituyen una herramienta útil para poder predecir el comportamiento de los cultivos en condiciones específicas; integrando conocimientos de fisiología, ciencias del suelo y datos meteorológicos. Además permiten el desarrollo de una agricultura eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gálvez G, López T. La Bioinformática y la agricultura. La situación de Cuba. ¿Dónde estamos? En Congreso Informática , La Habana , Cuba; 2007.
2. Meira S, Guevara E. Uso de modelos de simulación de cultivos como herramienta para la toma de decisiones en el cultivo de soja. Potash & Phosphate Institute, <http://www.ppi-ppic.org>. 2000;
3. FAUBA. Los simuladores (del agro) | Sobre La Tierra [Internet]. [citado 14 de febrero de 2018]. Disponible en: <http://sobrelatierra.agro.uba.ar/los-simuladores-del-agro/>

4. Wallach D. Evaluating crop models. En: Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications. Elsevier; 2006.
5. Soto O, Galv3ez G, Sigarroa A. Estudio y modelaci3n de algunas variables que influyen en el rendimiento agr3cola de la caña de az3car. Evento ATAC. 2004;
6. Jay O. Metodolog3a para la comparaci3n de tratamientos en modelos de regresi3n no lineal aplicados a procesos biol3gicos [Tesis de Doctorado]. Instituto de Ciencia Animal; 2012. 100 p.
7. Cuevas RJ. Matemáticas para la toma de decisiones [Internet]. 2014. Disponible en: <http://www.itescam.edu.mx/principal/syllabus/fpdb/recursos/r76474>
8. Torres V. Contribuci3n a la modelaci3n de un 3rea de pastoreo. En: Seminario Científico Internacional XXX Aniversario del Instituto de Ciencia Animal. La Habana, Cuba. Instituto de Ciencia Animal, La Habana Cuba.; 1995.
9. Torres V, Ortiz J. Aplicaciones de la modelaci3n y simulaci3n a la producci3n y alimentaci3n de animales de granjas. Revista Cubana de Ciencia Agr3cola [Internet]. 2005 [citado 14 de febrero de 2018];39. Disponible en: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=193017842002>
10. Kofman H. Modelos y simulaciones computacionales en la enseñanza de la F3sica. 2000;13-22.
11. Del Pozo PP, Fern3ndez L. El Papel de la modelaci3n y la simulaci3n en la investigaci3n de las ciencias agropecuarias. Revista de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas. 2001;101-20.
12. Castro I, H3tier J-M. Modelizaci3n y experimentaci3n agr3n3mica. En: Tierras Llaneras de Venezuela... tierras de buena esperanza. 1ra ed. Venezuela: Consejo de Publicaciones de la Universidad de Los Andes; 2015.
13. Villegas JR, Hern3ndez VA, Salazar, JA, Muñ3z ML, del Castillo FS, Enciso TO. Modelos emp3ricos del crecimiento y rendimiento de tomate podado a tres racimos. Revista Fitotecnia Mexicana. 2004;27(1):63-67.
14. Tatsumi K. Effects of automatic multi-objective optimization of crop models on corn yield reproducibility in the U.S.A. Ecological Modelling. 2016;322:124-37. doi:10.1016/j.ecolmodel.2015.11.006
15. Fern3ndez L, Walkiria C, Sab3n Y. Los biomodelos y su impacto en la educaci3n superior agropecuaria. Acta Latinoamericana de Matemática Educativa. 2003;16(1):184-90.
16. Guerra CW, Cabrera A, Fern3ndez L. Criterios para la selecci3n de modelos estadísticos en la investigaci3n científica. Revista Cubana de Ciencia Agr3cola. 2003;37(1):3-10.
17. G3lvez G, Sigarroa A, L3pez T, Fern3ndez J. Modelaci3n de cultivos agr3colas. Algunos ejemplos. Cultivos Tropicales [Internet]. 2010 [citado 15 de febrero de 2018];31(3). Disponible en: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=193217921012>
18. Sinclair TR, Seligman NG. Crop modeling: from infancy to maturity. Agronomy Journal. 1996;88(5):698-704. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050004x
19. C3rdenas VT, Rojas JO, Crespo G, Rodr3guez I, Medero R. Simulaci3n del balance anual en Sistemas de Pastoreo Bovino. Revista Ingenier3a Industrial. 2002;1(1).
20. Guevara E. La simulaci3n del desarrollo, crecimiento y rendimiento en ma3z [Internet]. Fertilizando.com. 2007. Disponible en: <http://agrolluvia.com/wp-content/uploads/2010/06/Simulacion-Desarrollo-Crecimiento-y-Rendimiento-En-Maiz>
21. Damour G, Simonneau T, Cochard H, Urban L. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. Plant, Cell & Environment. 2010;33(9):1419-38. doi:10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x
22. Toscano P, Ranieri R, Matese A, Vaccari FP, Gioli B, Zaldei A, et al. Durum wheat modeling: The Delphi system, 11 years of observations in Italy. European Journal of Agronomy. 2012;43:108-18. doi:10.1016/j.eja.2012.06.003
23. Forjan O. Modelos de simulaci3n de crecimiento y desarrollo de los cultivos. AgroBarrow Digital. 2002;(27):15-7.
24. Dorado C. Simulaci3n de sistemas [Internet]. Monografias.com. 2007. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos20/simulacion-sistemas/simulacion-sistemas>
25. Salvagiotti F, Castellarin J, Pedrol H. Análisis de la respuesta a la fertilizaci3n nitrogenada utilizando el modelo CERES Wheat en diferentes condiciones ambientales de la regi3n pampeana norte. Para mejorar la producci3n. Trigo Campaña 2002-2003. 2003;(26):56-9.
26. L3pez Seijas T, Herrera Puebla J, Gonz3lez Robaina F, Cid Lazo G, Chaterl3n Durruty Y. Eficiencia de un modelo de simulaci3n de cultivo para la predicc3n del rendimiento del ma3z en la regi3n del sur de la Habana. Revista Ciencias T3cnicas Agropecuarias [Internet]. 2009 [citado 15 de febrero de 2018];18(3). Disponible en: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=93215944001>
27. Soto F. Crecimiento de posturas de cafetos en viveros m3viles bajo sombra controlada. Ajuste a diferentes funciones matemáticas. Cultivos Tropicales. 1986;8(4):83-90.
28. Soto F, Morales D, Dell'Amico J, Jerez E. Dinámica del crecimiento de plántulas de cafeto bajo diferentes condiciones de aviveramiento. Cultivos Tropicales. 1991;12(1):77-85.
29. Alonso M, M G, P3rez D3az A, Rivera Espinosa R, Bustamante Gonz3lez C, Viñals N3ñez R, et al. Comparaci3n de dos modelos de respuesta a dosis de nitr3geno en ma3z y cafeto. Cultivos Tropicales. 2016;37(2):155-64.
30. Hern3ndez C3rdova N, Soto Carreño F, Florido Bacallao R, Plana Llerena R, Caballero N3ñez A, L3pez M, et al. Utilizaci3n de un modelo de simulaci3n para la predicc3n del comportamiento de algunos cereales en las condiciones de Cuba. Cultivos Tropicales. 2016;37(1):78-84.
31. Ruiz ME. Utilizaci3n del modelo SWACROP en la simulaci3n del uso del agua y el rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* Lcv Desiree) en suelos Ferral3ticos Rojos. Tesis doctoral, UNAH, Cuba; 1997.

32. Seijas TL, González F, Chaterlan Y, Cid G, Dueñas G, Casanova A. Posibilidades de los modelos de simulación como herramienta eficaz en los estudios del manejo óptimo del agua y la fertilización en diferentes sistemas de cultivos agrícolas. En 2006.
33. Rodríguez JA, López T. Validación y análisis de sensibilidad del modelo macro en un suelo orthic ferrasol del sur de la Habana. [Validation and sensitivity analysis of the MACRO model in a Orthic Ferrasol of the South of Habana]. Investigación agraria. Producción y protección vegetales-INIA (España). 2000;15(1-2):47-55.
34. López T, Dueña G, Sierra J, Ozier H, González F, Giralte E, et al. Simulación del manejo de riego y la fertilización nitrogenada del maíz sobre el suelo ferralítico del sur de la Habana. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2001;10(3):59-65.
35. González Robaina F, Herrera Puebla J, López Seijas T, Cid Lazo G. Funciones agua rendimiento para 14 cultivos agrícolas en condiciones del sur de La Habana. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 2013;22(3):5-11.
36. Suárez JT, Bravo JA, Montalvo JM, Valle M, Valdés R. Modelación matemática del diámetro medio y la altura media de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la Empresa Forestal Integral La Palma. Revista Forestal Baracoa. 2011;30(1):13-9.
37. Suárez JT, Bravo JA, Montalvo JM, Peña Y, Valle M, Valdés R. Modelación matemática del diámetro medio y la altura media de *Pinus caribaea* morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en la Unidad Silvícola Los Jazmines, Viñales. Revista Forestal Baracoa. 2012;31(2):41-8.
38. Suárez JT, Bravo JA, Peña Y, Montalvo JM, Valle M, Valdés R. Modelación matemática del volumen por hectárea de *Pinus Caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret y Golfari en la unidad silvícola "Los Jazmines", Viñales. Revista Cubana de Ciencias Forestales. 2013;1(2):166-72.
39. Pozo P d, Herrera RS. Análisis del crecimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo condiciones de corte y pastoreo. [Tesis de Doctorado]. Universidad Agraria de La Habana; 1998.
40. Del Pozo PP, Herrera RS. Modelado del crecimiento del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). 1. Modelo multiplicativo con control de la curva de crecimiento y los efectos ambientales. Pastos y Forrajes. 1995;18(2):171-7.
41. Torres V, Lazo J, Ruíz TE, Noda A. Empleo de la modelación matemática en el estudio del pasto *C. nlemfuensis*. Rev. Cubana de Cienc. Agríc. 1999;33(4):363-70.
42. López JL. Modelación y simulación del rendimiento del pasto estrella (*C. nlemfuensis*) bajo diferentes condiciones de manejo y escenarios climáticos [Tesis de Maestría]. [Mayabeque]. [Mayabeque]: Universidad Agraria de La Habana; 2016.
43. Díaz D. Evaluación agronómica de nuevas variedades *Pennisetum purpureum* en condiciones de sequía el Valle del Cauto [Tesis de Maestría]. Universidad de Matanzas; 2007.
44. Fortes D. Comportamiento morfofisiológico de *Pennisetum purpureum* cv. Cuba CT-115 empleado como banco de biomasa. PhD Thesis. Instituto de Ciencia Animal, Mayabeque, Cuba; 2012.
45. Martínez RO, Tuero R, Torres V, Herrera RS. Modelos de acumulación de biomasa y calidad en las variedades de hierba elefante, Cuba CT-169, OM-22 y king grass durante la estación lluviosa en el occidente de Cuba. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 2010;44(2):189-193.
46. Rodríguez L, Torres V, Martínez, Jay O, Noda AC, Herrera M. Modelos para estimar la dinámica de crecimiento de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-169. Revista cubana de ciencia agrícola. 2011;45(4):349-54.
47. Rodríguez L, Larduet R, Martínez RO, Torres V, Herrera M, Medina Y, et al. Modelación de la dinámica de acumulación de biomasa en *Pennisetum purpureum* vc. king grass en el occidente de Cuba. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 2013;47(2):119-24.
48. Ramírez, JL. Rendimiento y calidad de cinco gramíneas en el Valle del Cauto [Tesis de Doctorado]. [La Habana]: Instituto de Ciencia Animal; 2010. 121 p.
49. Ruíz TE, Torres V, Febles G, Díaz H, Sarduy L, González J. Utilización de la modelación para estudiar el crecimiento de *Tithonia diversifolia* colecta 10. Revista Cubana de Ciencia Agrícola [Internet]. 2012 [citado 15 de febrero de 2018];46(3). Disponible en: <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=193025294002>

Recibido: 3 de abril de 2017

Aceptado: 13 de diciembre de 2017