

EL MODELAMIENTO EN LA FLORICULTURA^a

FLORICULTURE MODELING

ANGIE ARREDONDO HOYOS^{b*}, DARÍO CASTAÑEDA SÁNCHEZ^b

Recibido 29-04-2020, aceptado 29-06-2020, versión final 30-06-2020.

Artículo Revisión

RESUMEN: El modelamiento en la agricultura, con el desarrollo de las computadoras, cada vez cobra mayor importancia, no solamente para el monitoreo de las variables de estado del sistema, sino también en los procesos de toma de decisiones y gestión de éste. El objetivo de este trabajo fue el de efectuar una revisión en torno a la evolución del modelamiento en la agricultura. Se partió de las propuestas de modelos de crecimiento y desarrollo clásicos, las cuales sentaron las bases para las estrategias de los modelos funcionales y estos dos a su vez para las modernas metodologías implementadas en el modelamiento dinámico. Se finaliza con un resumen de las estrategias y variables de estado para las cuales se reportan propuestas de modelos en el cultivo del crisantemo. En las regiones templadas el modelamiento propició una mejor comprensión de los procesos biológicos que ocurren al interior del sistema agrícola, permitiendo a productores e investigadores tomar decisiones de manejo informadas. En el caso colombiano es necesario probar su utilidad o en su defecto ajustarlo a las condiciones tropicales propias. Sin duda alguna estas herramientas contribuirán a los floricultores en la sincronización entre la oferta del producto y la demanda del mismo, así como en la protección del ambiente.

PALABRAS CLAVE: Crecimiento; crisantemo; plantas ornamentales; cultivos protegidos.

ABSTRACT: Modeling in agriculture, with the development of computers, becomes increasingly important, not only for monitoring the variable state of the system but also in the decision-making and management processes of the system. The objective of this work was to review the evolution of modeling in agriculture. It started with the proposals of classic growth and development models, which laid the foundation for functional model strategies, and these two, in turn, for the modern methodologies implemented in dynamic modeling. It concludes with a summary of the approaches and state variables for which model proposals in chrysanthemum cultivation are reported. In the temperate region, the modeling provided a better comprehension of the biological processes occurring in the agricultural system. It lets farmers and researchers make informed management decisions. Test its usefulness is necessary in the Colombian case or failing that, adjust it to its tropical conditions. These tools will undoubtedly contribute to flower growers in the synchronization between product supply and demand, as well as in protecting the environment.

KEYWORDS: Growth; chrysanthemum; ornamental plants; protected crops.

^a Arredondo-Hoyos, A. & Castañeda-Sánchez, D. (2020). El modelamiento en la floricultura. *Rev. Fac. Cienc.*, 9 (2), 80–92.
DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v9n2.86791>

^bUniversidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia. Grupo Fitotecnia Tropical.

* Autor para correspondencia: akarredondoh@unal.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

En el trópico, la agricultura establecida bajo entornos protegidos, como en el caso de la floricultura colombiana, presenta ambientes micro-climáticos, más favorables a lo largo del año, respecto a la agricultura a campo abierto. A pesar de esto, los repentinos y extremos estados que los factores climáticos están presentando durante ciertas épocas del año, frecuentemente están afectando la producción y calidad de las flores, aun bajo condiciones de invernadero. Por otro lado, los productores evidencian los impactos catastróficos causados por heladas, enfermedades, plagas, en la pérdida del cultivo; los impactos menos drásticos o graduales ocasionados por déficit de radiación solar, o humedad ambiental, deficiencias nutricionales, que se evidencian de manera acumulada al final del ciclo del cultivo, por la disminución en la producción de biomasa, altura de las plantas, tallos exportables, entre otras características. Los productores no disponen de herramientas, ni trabajos, que les permitan discriminar y cuantificar el impacto ocasionado por los diferentes factores ambientales, ni mucho menos anticiparse con medidas de manejo implementadas previo al período de crisis ambiental, o determinar el impacto gradual motivado por estos. Esto se debe a la inherente complejidad y variabilidad existente en los sistemas agrícolas, que surge de los complejos procesos presentados, consecuencia del alto número de interacciones, que se presentan entre los componentes del sistema agrícola en el continuo suelo-planta-atmósfera y que además son cambiantes en el espacio y en el tiempo (Keating & Thorburn, 2018). Estas interacciones trascienden los límites disciplinarios tradicionales, aunque sigue habiendo un fuerte énfasis en las ciencias disciplinarias que conducen a una mayor comprensión de los componentes y procesos individuales, también hay un énfasis creciente en las ciencias estadísticas, de la computación, los sistemas y de la información (Jones *et al.*, 2017).

El modelamiento en la agricultura, se ha constituido en una herramienta que permite representar de manera simplificada uno o todos los componentes de un sistema agrícola, permitiendo probar hipótesis, describir y entender sistemas complejos, así como comparar diferentes situaciones. En última instancia son un gran soporte para la toma de decisiones de manejo y planeación de la producción.

En ese sentido el objetivo de este trabajo fue el de realizar una revisión acerca de las estrategias usadas en el modelamiento agrícola y fundamentalmente bajo entornos protegidos.

2. MODELAMIENTO

La noción de modelo surgió temprano en el ámbito científico, buscando una representación abstracta que podría ser física, de algún objeto o sistema del mundo real; o virtual – conceptual, describiendo cualitativamente o cuantitativamente su funcionalidad (Keating & Thorburn, 2018). El dominio de construcción de un modelo está definido por el tipo de investigación y de acuerdo con Oquist (1978), identifica cuatro categorías investigativas: Las dos primeras descriptiva y nemotécnica enfocadas a entender cómo trabaja el mundo y las dos siguientes, política y acción, enfocadas a cómo cambiarlo. En el contexto de

los sistemas agrícolas las cuatro categorías investigativas que definen el dominio del modelamiento son: 1. Descripción cuantitativa de los componentes del sistema. 2. Modelamiento de los procesos que ocurren independientemente en los componentes del sistema agrícola. 3. Modelos explicativos de la eficiencia del sistema en función de factores como por ejemplo la oferta ambiental, componentes del suelo. 4. Modelamiento de las interacciones entre los componentes del sistema (Keating & Thorburn, 2018).

Se entiende por sistema agrícola el arreglo físico espacial, delimitable, conformado por componentes (suelo, biológico, climático, el hombre con todos sus aspectos sociales, culturales y económicos), que interactúan entre sí determinando el comportamiento del sistema (Jones *et al.*, 2017). La comprensión del funcionamiento de sistemas tan complejos como el agrícola requiere de la construcción de modelos que claramente se enmarcan en los dominios 3 y 4 del modelamiento propuesto por Keating & Thorburn (2018), para sistemas agrícolas. Estos modelos son necesarios para poder comprender la salud y el estado general del sistema, así como predecir su productividad para fines específicos.

3. ANÁLISIS CLÁSICO Y FUNCIONAL DEL CRECIMIENTO

El análisis del crecimiento de las plantas, consiste en una aproximación explicativa, holística e integral de la forma y funcionamiento del vegetal, requiriendo únicamente dos tipos de mediciones. (i) El peso de la planta, generalmente seco (kg), pero también puede ser la materia orgánica o el contenido de energía. (ii) El tamaño del sistema de asimilación de la planta, generalmente el área foliar (m^2), pero también puede ser el contenido de proteína o clorofila foliar (Pearcy *et al.*, 1989). El enfoque clásico se caracteriza por el análisis del crecimiento por intervalos de muestreo o períodos de tiempo entre dos muestreos sucesivos. En ese sentido, este enfoque describe muy bien los cambios o tasas de los procesos de crecimiento para un periodo de tiempo que puede ser diario o semanal. En contraste al enfoque funcional o dinámico que implica el uso de muchos muestreos o cosechas a lo largo del ciclo de crecimiento de la planta, permitiendo de forma paramétrica o libre el ajuste de curvas de crecimiento para el ciclo del cultivo o etapa fenológica. También es posible lograr una aproximación combinada de curvas ajustadas a valores obtenidos clásicamente (Hunt *et al.*, 2002).

3.1. Análisis clásico del crecimiento

El análisis clásico del crecimiento de plantas se remonta a principios de 1900, con el reconocimiento hecho por Blackman (1919), de que el crecimiento de las plantas progresó logarítmicamente pudiéndose describir mediante la tasa de crecimiento relativo (TCR) y es usado como un índice del progreso del crecimiento, ver ecuación (1).

$$TCR : \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{d}{dt} \ln(P) \quad (1)$$

donde, P es el peso seco. Pearcy *et al.* (1989) argumentan que este hecho fue la base del desarrollo de las técnicas del análisis del crecimiento de plantas. Es así como surge la propuesta de la tasa de aumento en peso seco (P) por unidad de sistema de asimilación o de área foliar (A) y de tiempo (t), conocida como

tasa de asimilación neta (*TAN*), indicadora de la eficiencia fotosintética, ver ecuación (2), y la relación del tamaño del sistema de asimilación de la planta en relación a la biomasa por unidad de tiempo conocida como relación de área foliar (*RAF*), ver ecuación (3).

$$TAN = \frac{1}{A} \frac{dP}{dt} \quad (2)$$

$$RAF = \frac{A}{P} \quad (3)$$

Keating & Thorburn (2018), argumentan de que se completa el marco del análisis de crecimiento clásico, mediante el refinamiento matemático, cuando se logra expresar la *TCR* en función del producto de la tasa de asimilación neta y la relación de área foliar, ver ecuación 4.

$$TCR = TAN \times RAF = \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dP}{dt} \frac{A}{P} \quad (4)$$

La relación de área foliar puede ser redefinida mediante la expresión [5]

$$RAF = \frac{P_1}{P} \frac{A}{P_1} \quad (5)$$

donde, P_1 es el peso seco de las hojas. Las relaciones resultantes P_1/P y A/P_1 , son denominadas relación del peso foliar (*RPF*) y área foliar específica, (*AFE*), respectivamente. La *RPF* evalúa la frondosidad de la planta en relación al peso seco total, así como la distribución del peso seco foliar, determinando la capacidad de la planta para mantener su peso seco, así como de aumentarlo a través de la fotosíntesis. El *AFE*, por el contrario, evalúa la frondosidad de una planta en relación a su peso seco foliar (Rajput *et al.*, 2017).

Cuando se quiere evaluar la productividad de un cultivo o ecosistema natural, se recomienda expresar su eficiencia en términos de unidad de superficie cultivada. Por lo tanto, la *RAF* resulta inadecuada, como estrategia alternativa se sugiere usar el índice de área foliar (*IAF*) definida como el área foliar por unidad de área plantada o sembrada de suelo, ecuación (6) (Hunt, 1990).

$$IAF = \frac{A}{AS} \quad (6)$$

donde, A área foliar del dosel de la planta y AS suelo, ocupada por la proyección del dosel sobre éste. Como tanto A y AS están expresadas en m^2 , *IAF* es adimensional.

El *IAF* puede usarse para estimar la tasa de crecimiento de un cultivo (*TCC*), el cual sirve como una medida de la productividad agrícola, ver ecuación (7) (Rajput *et al.*, 2017)

$$TCC = TAN \times IAF = \frac{1}{AS} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{A} \frac{dP}{dt} \frac{A}{AS} \quad (7)$$

La *TCC* es expresada en términos de peso por unidad de área y tiempo. Adicionalmente, Peltonen-Sainio *et al.* (1997) sostienen que los cambios estacionales en el *IAF* así como la duración del área foliar (*DAF*) también tienen un efecto marcado en la productividad del cultivo. La medición de la duración de la superficie de asimilación, es estimada por la relación entre el *IAF* y el tiempo. Una aproximación en la determinación

de *DAF* consiste en la determinación del área bajo la curva de *IAF*, para el período de interés, según la expresión (8):

$$DAF = \frac{(IAF_1 + IAF_2)(t_1 - t_2)}{2} \quad (8)$$

La estimación de la producción total del cultivo (Y, kgm^{-2}), se puede realizar a través del producto entre la duración media del área foliar por la tasa media de asimilación neta (TAN), ecuación (9).

$$Y = DAF \times TAN \quad (9)$$

Un concepto análogo, al de duración del área foliar es el de duración de la biomasa de la hoja (*DBH*), definido como el área bajo la curva de progreso del peso, ecuación (10) (Peltonen-Sainio *et al.*, 1997).

$$DBH = \frac{(P - P_1)(t_2 - t_1)}{\ln(P_2) - \ln(P_1)} \quad (10)$$

3.2. Análisis Funcional

Con el advenimiento de las computadoras y el desarrollo de métodos estadísticos robustos, hubo un mayor interés por desarrollar expresiones funcionales del crecimiento de los vegetales. Las descripciones cuantitativas usadas para definir el crecimiento son las mismas que las usadas en el análisis clásico, pero en este caso se ajustan funciones a los datos. Durante el crecimiento de la planta, todos los órganos son considerados como vertederos especializados en la acumulación de biomasa. Se asume que la tasa de expansión depende del tipo de planta u órgano en el tiempo y se representa mediante la siguiente función, ver ecuación (11)

$$P = P_o \times f(t) \quad (11)$$

Las expresiones más simples provienen de los modelos lineales de orden n , por ejemplo, la expresión (12), hace referencia a un modelo lineal de segundo orden, frecuentemente ajustado a datos de crecimiento (Keating & Thorburn, 2018).

$$\ln(P) = a + b_1 t - b_2 t^2 \quad (12)$$

donde a , b_1 y b_2 , son los coeficientes en el modelo.

Dentro del ciclo de vida de una planta, cultivo e incluso un órgano, la duración total del crecimiento de estos se puede dividir en tres fases, una fase de aceleración temprana o exponencial, una fase lineal y una fase de saturación para la maduración y senescencia. Por lo tanto, el patrón de crecimiento típicamente sigue una curva sigmoidea, no representado a través de un modelo lineal polinómico (Paine *et al.*, 2012). Por el contrario, la tasa de crecimiento sigue una curva en forma de campana, mejor descrito a través de un modelo parabólico (Yin *et al.*, 2003). Adicionalmente, Paine *et al.* (2012) sostienen que los modelos completamente lineales asumen constante la tasa de crecimiento absoluta, mientras que los log-lineales como los de la ecuación (12), asumen constante la tasa de crecimiento relativo. Estos supuestos limitan su utilidad, puesto que las tasas de crecimiento relativo y absoluta, varían en función de las condiciones

ambientales y a lo largo de la ontogenia el individuo u órgano. Una estrategia propuesta es usar expresiones que permitan una transición gradual de una fase a la otra, en ese sentido se popularizaron modelos no lineales como el logístico, log-logístico, Gompertz entre otros (Ver Tabla 1.). Los modelos usados en el análisis de

Tabla 1: Modelos usados en análisis funcional del crecimiento de plantas, donde d : asíntota superior de máximo crecimiento, k : punto de inflexión de la curva sigmoidea, b : tasa de crecimiento de la curva, t : tiempo.

Modelo	Función	
Logístico	$f(t) = \frac{d}{1+e^{b(t-k)}}$	(13)
Log-Logístico	$f(t) = \frac{d}{1+e^{b(\log(t)-k)}}$	(14)
Exponencial	$f(t) = d e^{-t/k}$	(15)
Gompertz	$f(t) = d e^{-e^{b(t-k)}}$	(16)
	Si $b < 0$, la función media es creciente	
	$b > 0$, la función media es decreciente	
Weibull	$f(t) = d e^{-e^{b(\log(t)-k)}}$	(17)

crecimiento, continuaron su evolución, hasta la obtención de las más recientes funciones como la Beta, propuesta por (Yin *et al.*, 2003):

$$f(t) = d \left(1 + \frac{te^{-t}}{te^{-k}} \right) \left(\frac{t}{te^{-k}} \right)^{\frac{te^{-k}}{te^{-k}}}, \text{ con } 0 \leq k < t_e \quad (18)$$

donde, d es la asíntota superior de máximo crecimiento, k punto de inflexión de la curva sigmoidea, t_e es el tiempo en el que se alcanza el máximo crecimiento y t el tiempo.

Las aplicaciones prácticas de estas estrategias del modelamiento clásico y funcional se efectuaron principalmente en la caracterización de progenies en mejoramiento, fisiología y ecología de plantas, buscando herramientas para evaluar la eficiencia del dosel de las plantas en los procesos de captura de luz, fotosíntesis y de crecimiento; además sentó las bases para el modelado de cultivos. Por ejemplo, el *IAF*, permitió representar la distribución y captura de la luz a través del dosel de las plantas, fuerza motora del crecimiento y desarrollo de éstas, ecuación (19) (Keating & Thorburn, 2018; Ajkman & Benjamin, 1994).

$$I = I_0 e^{-k \times IAF} \quad (19)$$

donde, I_0 radiación en la parte superior del dosel, I radiación debajo del dosel, k coeficiente de extinción, IAF índice de área foliar.

4. MODELOS DINÁMICOS Y SIMULACIÓN

Los modelos dinámicos de los sistemas agrícolas, según Muttsaers & Wang (1999), iniciaron su desarrollo a principios de los años 1960, por la aplicación exitosa de los definidos modelos de crecimiento. En esencia un modelo dinámico de un sistema agrícola, consiste en una representación integral y matemática del sistema, incluyendo todos los efectos generados por las interrelaciones de los componentes del sistema y de éstos con el ambiente. Los modelos dinámicos, agrupan todas las ecuaciones de todos los factores responsables de los

procesos que inducen un cambio en los componentes del sistema. Las simulaciones por el contrario hacen referencia a una solución numérica del modelo dinámico del sistema, generando valores para las variables que representan los componentes de éste en el tiempo (Keating & Thorburn, 2018).

4.1. Forma general de un modelo dinámico

Un modelo de un sistema dinámico y continuo en el tiempo, puede definirse como un vector de variables de estado en función de variables y parámetros ambientales según la expresión, ecuación (20)

$$\begin{aligned} \frac{d(U_1(t))}{dt} &= g_1(U(t), X(t), \theta) \\ &\vdots \\ \frac{d(U_s(t))}{dt} &= g_s(U(t), X(t), \theta) \end{aligned} \quad (20)$$

donde t es el tiempo, $U(t) = [U_1(t), \dots, U_s(t)]^T$, y $X(t)$ son los vectores de variables de estado y ambientales respectivamente, en función del tiempo, θ vector de parámetros fijos incluidos en el modelo para la estimación de tasas de cambio, y g_1, g_2, \dots, g_s , son las funciones matemáticas que describen las relaciones entre las variables de estado, parámetros y variables ambientales. Las variables de estado $U(t)$ pueden comprender, por ejemplo, índice de área foliar, biomasa del cultivo, profundidad radical, altura de la planta, contenido de agua en cada una de las capas del suelo, entre otras. Las variables explicativas $X(t)$ típicamente incluyen variables climáticas (temperaturas, máxima, promedio, mínima, radiación, humedad, etc.), variables de manejo (irrigación, fertilización) y los parámetros hacen referencia a cantidades conocidas (nivel de nutrientes, tasa de mineralización de la materia orgánica) que entran como constantes en el modelo y no requieren de su medición en campo (Wallach *et al.*, 2014).

4.2. Modelos dinámicos de cultivos

En la literatura se puede encontrar una amplia variedad de modelos dinámicos de cultivos, ya sea desarrollados para integrar todos los componentes implicados durante el ciclo de cultivo de una especie o por procesos fisiológicos, por ejemplo, ROSGRO (Dayan *et al.*, 2004) desarrollado para rosa, PHENOGLAD (Uhlmann *et al.*, 2017) para gladiolo, TOMGRO (Van Keulen & Dayan, 1993) y TOMSIM (Heuvelink, 1996) para tomate y familias de modelos como la SUCROS para trigo, papa, remolacha, maíz, caña de azúcar y girasol (Van Laar *et al.*, 1997). Estos son solo una muestra de los modelos de cultivos que se pueden encontrar en la literatura, algunos de ellos cuentan con alto grado de complejidad, otros son fácilmente adaptables a diferentes especies, permiten modificaciones e inclusión de nuevos módulos (Van Ittersum *et al.*, 2003). En Colombia, para cultivos hortícolas específicamente los ornamentales, se han desarrollado una amplia variedad de modelos. Están disponibles algunos en especies como rosa, clavel y crisantemo, por su importancia como principales especies ornamentales de exportación para Colombia (ASOCOFLORES, 2016). Para rosa se propusieron modelos para el proceso fisiológico de distribución de la materia seca en las diferentes estaciones del año utilizando el tiempo térmico (Gutiérrez *et al.*, 2006),

Tabla 2: Revisión de algunos modelos desarrollados para crisantemo

Característica modelada	Variable explicativa	Autor
Crecimiento	Fotosíntesis	Charles-Edwards & Acock (1977)
	Fecha y densidad de siembra	Lee <i>et al.</i> (2002)
	Radiación fotosintéticamente activa	Lee (2002)
Crecimiento y apariencia visual en 3D	Radiación fotosintéticamente activa, temperatura, CO_2 y humedad relativa	De Visser <i>et al.</i> (2006)
Crecimiento y calidad externa	Potencial hídrico del suelo	Lin <i>et al.</i> (2011)
Desarrollo y calidad externa	Luz y la temperatura	Dai <i>et al.</i> (2008)
Longitud del entrenudo	Diferencias entre temperatura entre el día y la noche (DIF)	Carvalho <i>et al.</i> (2002)
Desarrollo foliar	Temperatura y luz integral diaria	Schouten <i>et al.</i> (2002)
Índice de área foliar	La partición de la materia seca en las hojas	Larsen & Hidén (1995)
Desarrollo floral	Temperatura	Lee & Heuvelink (2003)
Masa final de la planta	Diferencias entre temperatura entre el día y la noche (DIF)	Larsen & Persson (1999)
Rendimiento	Densidad de siembra y la intensidad de la luz suplementaria	Pearson <i>et al.</i> (1995)
Fenotipo	Temperatura y radiación	Heuvelink <i>et al.</i> (2002)
Fotosíntesis	Temperatura de la hoja, niveles de luz y concentraciones de CO_2	Janka <i>et al.</i> (2016)
Absorción de nutrientes	La tasa de crecimiento	Willits <i>et al.</i> (1992)

modelos para optimizar el suministro de nutrientes a las plantas en sistemas hidropónicos mediante la integración de distintos submodelos como crecimiento de brotes, crecimiento de raíces y absorción de nutrientes (Kim & Lieth, 2012), modelos de pronóstico de enfermedades relacionadas con el clima mediante la duración de la humedad de la hoja citeMashonjowaetal2013, entre otros. De igual manera para el clavel se cuenta con modelos fenológicos como herramientas diseñadas para conocer y predecir el desarrollo de las plantas utilizando la aparición de nudos como variable respuesta en función del tiempo térmico (López *et al.*, 2010), modelos simples de producción y distribución de masa seca, basados en la radiación fotosintéticamente activa y la temperatura (López *et al.*, 2014).

5. MODELAMIENTO EN CRISANTEMO

Globalmente, la FAO y varios países han avalado e incluso apoyado con recursos tanto el desarrollo como la implementación del modelamiento en la agricultura, como uno de los enfoques para entender el funcionamiento del sistema agrícola y en consecuencia se constituya en una herramienta para la toma acertada de decisiones de manejo (Jones *et al.*, 2017). Cabe aclarar que el modelamiento en la floricultura y especialmente en crisantemo no es un tema nuevo, ya que desde 1977 autores como Charles-Edwards & Acock (1977) presentaron una propuesta de modelo semi-empírico incorporando procesos como la fotosíntesis a un modelo de crecimiento dinámico para crisantemo. Como ese, se pueden encontrar en la literatura una amplia variedad de modelos como los que se presentan en la Tabla 2.

Aunque el crisantemo ha sido ampliamente estudiado, la gran mayoría de la información y de los trabajos de investigación se han realizado en países subtropicales, en cámaras de crecimiento, con condiciones controladas, como es el caso de los estudios realizados por Kang *et al.* (2012), Lee (2002), Schouten *et al.* (2002) y Carvalho *et al.* (2002), entre otros.

Lo anterior es posible gracias al desarrollo tecnológico con el que se cuenta en los países donde se han realizado las investigaciones, y a las características de sus invernaderos, pero, algunos autores como Schouten *et al.* (2002) y Janka *et al.* (2016) han señalado en sus conclusiones la importancia de realizar investigación en espacios protegidos comerciales con condiciones climáticas dinámicas, que acerquen y validen los resultados con la realidad.

Dadas las especificidades de la floricultura colombiana, todo el desarrollo generado en torno al modelamiento debe ser ajustado a las condiciones locales, para así lograr una representación más realista de estos sistemas (López *et al.*, 2010; Gutiérrez *et al.*, 2006). La mayoría de los modelos implementados en ornamentales en el país hacen parte de la etapa clásica de evolución de los modelos, en los que se relaciona alguna variable del vegetal, con algún factor ambiental como la temperatura, el fotoperiodo, la radiación, del suelo o de manejo agronómico y su efecto es evaluado experimentalmente mediante tratamientos y análisis de varianza (López *et al.*, 2010; Chica & Correa, 2005; Streck, 2004). Por el contrario, son escasas las propuestas de modelos funcionales y mucho más las de modelos dinámicos. No obstante, se encuentran algunos trabajos en ornamentales en los que se ha modelado tanto el proceso fenológico del vegetal y la distribución de asimilados integrando procesos del C, N, balance hídrico y la radiación (López *et al.*, 2014; Gutiérrez *et al.*, 2006). En resumen, el negocio de las flores requiere de una estricta sincronía entre la oferta del producto y la demanda, la cual es afectada por factores ambientales ya descritos. Sin duda alguna las herramientas del modelamiento contribuirán cerrando esa brecha, lo que puede significar una ventaja competitiva, para los productores de flores colombianas.

6. CONCLUSIONES

El análisis y modelamiento de las variables de crecimiento y desarrollo de plantas han permitido una mejor comprensión de los diferentes procesos biológicos. En plantas ornamentales se cuenta con una amplia cantidad de información en este campo, sin embargo, es necesario comprobar su utilidad bajo condiciones colombianas o evaluar la necesidad desarrollar modelos en condiciones tropicales y en espacios protegidos comerciales, para que estos puedan ser utilizados de manera práctica como instrumento para el mejoramiento de la floricultura colombiana.

Referencias

- Ajkman, D. P. & Benjamin, L. R. (1994). A model for plant and crop growth, allowing for competition for light by the use of potential and restricted projected crown zone areas. *Annals of Botany*, 73(2), 185-194.
- Asocolflores (2016). Informe anual (2016). [En línea]. Asociación Colombiana de Exportadores de Flores. [Consultada en diciembre de 2019]. Disponible en: <http://www.asocolflores.org>
- Blackman, V. (1919). On some aspects of the plea for reconstruction. *New Phytologist*, 18(1 – 2), 50-56.
- Carvalho, S. M. P., Heuvelink, E., Cascais, R. & Van Kooten, O. (2002). Effect of day and night temperature on internode and stem length in chrysanthemum: is everything explained by DIF? *Annals of Botany*, 90(1), 111-118.
- Charles-Edwards, D. A. & Acock, B. (1977). Growth response of a Chrysanthemum crop to the environment. II. A mathematical analysis relating photosynthesis and growth. *Annals of Botany*, 41(1), 49-58.
- Chica, F. de J. T. & Correa, G. A. L. (2005). Evaluación de dos tratamientos fotoperiódicos en crisantemo (*Dendranthema grandiflorum* (Ramat.) Kitam.), bajo condiciones del intertrópico Andino alto. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 58(2), 2859-2881.
- Dai, J. F., Luo, W. H. & Yang, Z. (2008). A photo-thermal model for predicting development and quality of standard cut chrysanthemum in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 801(2), 1423-1430.
- Dayan, E., Presnov, E. & Fuchs, M. (2004). Prediction and calculation of morphological characteristics and distribution of assimilates in the ROSGRO model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 65(1 – 2), 101–116.
- De Visser, P. H. B., van der Heijden, G. W. A. M., Marcelis, L. F. M., Carvalho, S. M. P. & Heuvelink, E. (2006). A functional-structural model of chrysanthemum for prediction of ornamental quality. *Acta Horticulturae*, 718, 59-66.
- Gutiérrez, C. R. P., González, R. M. M. & Baille, A. (2006). Dry matter production and partitioning in rose (*Rosa hybrida*) flower shoots. *Scientia Horticulturae*, 107(3), 284–291.
- Heuvelink, E. (1996). Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. PhD Thesis, Wageningen University. The Netherlands, ISBN 90-5485-498-7.
- Heuvelink, E., Lee, J. H., Buiskool, R. P. M. & Ortega, L. (2002). Light on cut chrysanthemum: measurement and simulation of crop growth and yield. *Acta Horticulturae*, 580, 197–202.
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B. & Askew, A. P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*, 90(4), 485-488.

- Hunt, R. (1990). Basic growth analysis: plant growth analysis for beginners. London, England, Unwin Hyman.
- Janka, E., Körner, O., Rosenqvist, E. & Ottosen, C. O. (2016). A coupled model of leaf photosynthesis, stomatal conductance, and leaf energy balance for chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora*). *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 264–274.
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I. & Wheeler, T. R. (2017). Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, 155, 240–254.
- Kang, M., Heuvelink, E., Carvalho, S. M. P. & de Reffye, P. (2012). A virtual plant that responds to the environment like a real one: the case for chrysanthemum. *New Phytologist*, 195, 384–395.
- Keating, B. A. & Thorburn, P. J. (2018). Modelling crops and cropping systems—evolving purpose, practice and prospects. *European Journal of Agronomy*, 100, 163–176.
- Kim, W. S. & Lieth, J. H. (2012). Simulation of year-round plant growth and nutrient uptake in Rosa hybrida over flowering cycles. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 53(3), 193–203.
- Larsen, R. U. & Hidén, C. (1995). Predicting leaf unfolding in flower induced shoots of greenhouse grown chrysanthemum. *Scientia Horticulturae*, 63(3–4), 225–239.
- Larsen, R. U. & Persson, L. (1999). Modelling flower development in greenhouse chrysanthemum cultivars in relation to temperature and response group. *Scientia Horticulturae*, 80(1–2), 73–89.
- Lee, J. H. (2002). Analysis and simulation of growth and yield of cut chrysanthemum. PhD Dissertation, Wageningen University, The Netherlands.
- Lee, J. H., Heuvelink, E. & Challa, H. (2002). Effects of planting date and plant density on crop growth in cut chrysanthemum. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77, 238–247.
- Lee, J. H. & Heuvelink, E. (2003). Simulation of leaf area development based on dry matter partitioning and specific leaf area for cut chrysanthemum. *Annals of Botany*, 91(3), 319–327.
- Lin, L., Li, W., Shao, J., Luo, W., Dai, J., Yin, X., Zhou, Y. & Zhao, C. (2011). Modelling the effects of soil water potential on growth and quality of cut chrysanthemum (*Chrysanthemum morifolium*). *Scientia Horticulturae*, 130(1), 275–288.
- López, M. A., Chaves, B., Flórez, V. J. & Salazar, M. R. (2010). Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(19), 47–54.
- López, M. M. A., Chaves C. B. & Flórez R. V. J. (2014). Potential growing model for the standard carnation cv. Delphi. *Agronomía Colombiana*, 32(2), 196–204.

- Mashonjowa, E., Ronsse, F., Mubvuma, M., Milford, J. R. & Pieters, J. G. (2013). Estimation of leaf wetness duration for greenhouse roses using a dynamic greenhouse climate model in Zimbabwe. *Computers and Electronics in Agriculture*, 95, 70–81.
- Mutsaers, H. J. W. & Wang, Z. (1999). Are simulation models ready for agricultural research in developing countries? *Agronomy Journal*, 91(1), 1-4.
- Oquist, P. (1978). The epistemology of action research. *Acta Sociológica*, 21(2), 143-163.
- Paine, C. E. T., Marthews, T. R., Vogt, D. R., Purves, D., Rees, M., Hector, A. & Turnbull, L. A. (2012). How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(2), 245–256.
- Pearcy, R. W., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A. & Rundel, P. W. (1989). Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Pearson, S., Hadley, P. & Wheldon, A. E. (1995). A model of the effect of day and night temperatures on the height of chrysanthemums. *Acta Horticulturae*, 378, 71-79.
- Peltonen-Sainio, P., Forsman, K. & Poutala, T. (1997). Crop management effects on pre-and post-anthesis changes in leaf area index and leaf area duration and their contribution to grain yield and yield components in spring Cereals. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 179(1), 47-61.
- Rajput, A., Rajput, S. S. & Jha, G. (2017). Physiological parameters leaf area index, crop growth rate, relative growth rate and net assimilation rate of different varieties of rice grown under different planting geometries and depths in SRI. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 5(1), 362-367.
- Schouten, R. E., Carvalho, S. M. P., Heuvelink, E. & Van Kooten, O. (2002). Modelling of temperature-controlled internode elongation applied to Chrysanthemum. *Annals of botany*, 90(3), 353-359.
- Streck, N. A. (2004). A temperature response function for development of the chrysanthemum (Chrysanthemum x morifolium Ramat.). *Ciência Rural*, 34(1), 49-54.
- Uhlmann, L. O., Streck, N. A., Becker, C. C., Schwab, N. T., Benedetti, R. P., Charão, A. S. & Becker, D. (2017). PhenoGlad: A model for simulating development in Gladiolus. *European Journal of Agronomy*, 82, 33–49.
- Van Ittersum, M., Leffelaar, P., van Keulen, H., Kropff, M., Bastiaans, L. & Goudriaan, J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(3 – 4), 201-234.
- Van Keulen, H. & Dayan, E., (1993). TOMGRO, a greenhouse tomato simulation model. Simulation Report CABO-T no. 29, Wageningen University and Research Centre, The Netherlands.

Van Laar, H. H., Goudriaan, J. & Van Keulen, H. (1997). SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. Quantitative Approaches in Systems Analysis, No. 14. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands.

Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W. & Brun, F. (2014). Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment. Academic Press.

Willits, D. H., Nelson, P. V., Peet, M. M., Depa, M. A. & Kuehny, J. S. (1992). Modeling nutrient uptake in Chrysanthemum as a function of growth rate. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(5), 769-774.

Yin, X., Goudriaan, J., Lantinga, E. A., Vos, J. & Spiertz, H. J. (2003). A flexible sigmoid function of determinate growth. *Annals of Botany*, 91(3), 361-371.