

Modelos de cultivos y modelos fenológicos*

MIGUEL ANGEL LÓPEZ M.¹, BERNARDO CHAVES C.²
Y VÍCTOR J. FLÓREZ R.²

Definición y principios de los modelos de cultivos

La estructuración, formulación y aplicación de modelos de simulación en la agricultura se ha usado ampliamente en los últimos años debido a su utilidad como herramienta en la toma de decisiones sobre el manejo apropiado de los cultivos (Salazar, 2006).

Los modelos son herramientas para sintetizar el conocimiento, probar hipótesis, describir y entender sistemas complejos y comparar diferentes situaciones; se utilizan como soporte para la toma de decisiones de manejo y planeación de la producción (Lentz, 1998; Marcelis *et al.*, 1998).

La modelación simplifica al máximo posible una situación en estudio (Monteith, 1996), a través de una representación, generalmente matemática, del sistema de interés (Goudriaan y van Laar, 1994). El objetivo de la modelación es crear un modelo que opere y produzca una imitación lo más cercana posible al mundo o situación real a través de un proceso conocido como simulación (Salazar, 2006).

Según Penning de Vries *et al.* (1989), los modelos se clasifican en dos grandes grupos: modelos descriptivos, también llamados empíricos, estadísticos o de caja negra, cuya característica es reflejar poco o nada de los mecanismos causales del comportamiento de un sistema, y modelos explicativos que se caracterizan por tratar de establecer relaciones causa-efecto y por realizar una descripción cuantitativa de los mecanismos y procesos que afectan un sistema.

Al respecto de los modelos de simulación de cultivos, Jame y Cutforth (1996) indican que las dos principales razones que motivan su construcción están relacionadas con: (1) la mejor comprensión de los procesos que inter-

* Para citar este capítulo: López M., M.A., Chaves C., B. y Flórez R., V.J. 2011. Modelos de cultivos y modelos fenológicos. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 153-177.

1 I.A. Magíster. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

2 Profesores Asociados, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. bchavesc@unal.edu.co y vjflorezr@unal.edu.co.

vienen en la producción de un cultivo; y (2) el uso del modelo como una herramienta en el manejo de los sistemas agrícolas.

Para la modelación y simulación de un sistema de producción agrícola, Jones *et al.* (1987) plantean el siguiente procedimiento:

1. Establecer un objetivo claro, definir el problema y la información que se pretende obtener con la simulación;
2. Definir los componentes del sistema, sus límites, entradas y salidas;
3. Efectuar una amplia revisión de la información disponible;
4. Desarrollar el modelo a través de diagramas que representen los componentes del sistema y sus interrelaciones;
5. Organizar en computador a través de códigos;
6. Verificar, calibrar y validar el modelo. La verificación consiste en evaluar la precisión con que los códigos de cómputo representan el modelo; la calibración se refiere a la estimación de los parámetros y la validación es el proceso que compara los resultados de la simulación con datos que no se han utilizado previamente en la calibración o en cualquier fase del desarrollo del modelo;
7. Análisis de sensibilidad, identifica los parámetros que mayor peso tienen en el modelo y verifica qué tanto cambia una salida al cambiar un parámetro;
8. Aplicación del modelo.

Cuando en cultivos se hace referencia a modelos potenciales, es necesario indicar que el nivel de producción potencial es aquel que se logra en condiciones donde la especie de interés, durante todo su periodo de crecimiento y desarrollo no presenta limitaciones relacionadas con agua, nutrición, arvenses, enfermedades o plagas; bajo estas condiciones, la tasa de crecimiento está determinada principalmente por la radiación solar, la temperatura y el estado actual del cultivo. En síntesis, en condiciones consideradas “óptimas”, sólo el clima y las características del cultivo pueden ser limitantes (Gary *et al.*, 1998).

En los cultivos los principales objetos de modelación son el crecimiento, el desarrollo, la producción y el balance de agua y nitrógeno; principalmente, a partir de datos de entrada relacionados con el clima, el suelo y el sistema de cultivo (Brisson *et al.*, 2003). Crecimiento se entiende como la sumatoria de los procesos de división celular, elongación celular y ganancia de masa seca, mientras que el desarrollo es un proceso que tiene implícito el crecimiento sumado a la especialización o diferenciación celular.

La acumulación de masa seca o crecimiento de un cultivo se puede modelar como función de la radiación fotosintéticamente activa (PAR), el uso eficiente de la luz (LUE) y el coeficiente de extinción de la luz (k) (Tsubo *et al.*, 2005; Salazar, 2006; Salazar *et al.*, 2008).

La mayoría de modelos de cultivos son de tipo explicativo basados en la fotosíntesis o también conocidos como modelos proceso-orientados (Gary *et al.*, 1998). El principio de funcionamiento de estos modelos plantea que el rendimiento de un cultivo, en volumen y calidad, se determina por la producción y distribución de masa seca y el contenido de masa seca en los órganos cosechables. En este tipo de modelos (figura 1) la intercepción de la luz por las hojas se calcula para simular la producción de fotoasimilados, compuestos que a su vez se utilizan, en una proporción, para la respiración de mantenimiento y crecimiento, mientras que el restante se distribuye en los diferentes órganos en crecimiento (raíz, tallo, hojas, flores, frutos) (Marcelis *et al.*, 1998).

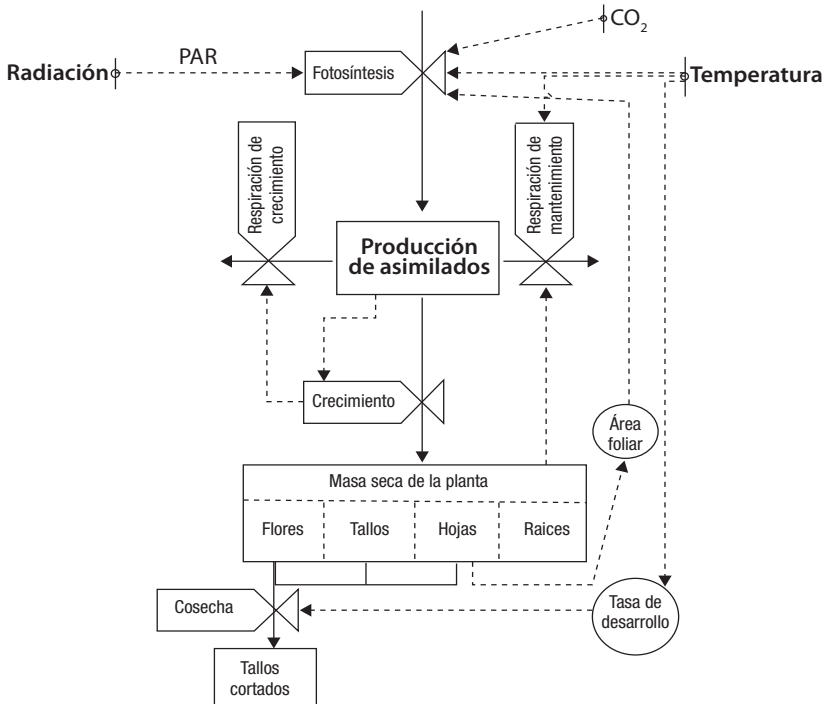


Figura 1. Diagrama del modelo del cultivo de clavel basado en la fotosíntesis, producción y distribución de masa seca (Modificado de Marcelis *et al.*, 1998).

En este contexto, la determinación del área foliar tiene gran trascendencia dentro de un modelo de cultivo, ya que es el órgano que permite la captación de la luz y, por tanto, interviene en el proceso fotosintético generador de biomasa. Así, su medición bien sea directa o a través de simulación es un requisito necesario a la hora de modelar. La simulación del área foliar (AF)

o del índice de área foliar (IAF) se puede hacer, fundamentalmente, por dos métodos: (1) descripción del AF como una función del estadio de desarrollo o (2) predicción del AF a partir de la masa seca foliar simulada (Marcelis *et al.*, 1998); sin embargo, algunos autores como Spitters *et al.* (1989) en especies anuales, de Visser (1994) en cebolla, de Visser *et al.* (1995) en zanahoria y Gijzen *et al.* (1998) en hortalizas en invernadero utilizan la combinación de ambos métodos.

Algunos modelos de producción de cultivos

Debido a su orientación y adaptación hacia la simulación del crecimiento y desarrollo de cultivos anuales, CERES, APSIM y STICS sobresalen dentro del grupo de modelos de producción de cultivos. CERES modela el crecimiento y desarrollo de cereales como cebada, trigo, arroz, maíz y sorgo. En el modelo básico, la tasa de crecimiento se calcula con base en la interceptación de luz y la eficiencia en el uso de la radiación. En trigo, el modelo incluye la simulación de procesos como desarrollo fenológico, desarrollo del canopi, formación de órganos, fotosíntesis, asimilación y translocación de asimilados y dinámica del agua, del carbono y del nitrógeno en el suelo (Jame y Cutforth, 1996).

Para muchos autores, el desarrollo de CERES es la base para construir modelos adaptados que describan con menor error o mayor complejidad la dinámica del crecimiento, desarrollo y producción de las plantas. En este contexto, Kovács (2005), a través del concepto de flujo de masa, mejoraron la precisión del modelo CERES para estimar la cantidad de nitrógeno del suelo disponible para las raíces. De esta manera, la baja productividad puede explicarse como resultado del lavado de nitrógeno en el suelo.

Lizaso *et al.* (2005) utilizaron como base el modelo de maíz CERES-Maize v. 3.7 para desarrollar el modelo CERES-PR, con el objetivo de realizar una mejor simulación del efecto de las condiciones de estrés en el crecimiento y desarrollo del cultivo. Este modelo mejorado presenta mayor complejidad, ya que analiza los aportes de la fotosíntesis y las pérdidas en biomasa por respiración. De igual forma, con base en CERES-Maize, Yang *et al.* (2004) desarrollaron otro modelo de simulación para maíz que supera las capacidades del modelo base para responder a cambios en el medio ambiente. El modelo mejorado, Hybrid-Maize, utiliza funciones de crecimiento y desarrollo junto a los modelos genéricos de formulación mecanicista de la fotosíntesis y la respiración.

APSIM (The agricultural production systems simulator) se desarrolló en Australia, por la unidad de investigación de sistemas de producción agrícola, para simular procesos biofísicos del suelo como cambios en el pH, balance de agua, nitrógeno y fósforo, entre otros. Su rango de simulación es amplio e

incluye pastos y forestales; sus aplicaciones van desde soporte y diseño para producción hasta toma de decisiones (Keating *et al.*, 2003).

Un ejemplo del anterior grupo de modelos es APSIM-sugarcane, el cual simula el crecimiento del cultivo de caña de azúcar en función del clima (precipitación, radiación, temperatura del aire), agua y nitrógeno. El modelo simula un cultivo de caña uniforme y predice el rendimiento en tallos y en sacarosa, concentración de sacarosa comercial, biomasa del cultivo, uso del agua y toma y partición del nitrógeno al interior de la planta (Keating *et al.*, 1999).

El INRA de Francia en colaboración con otros centros o institutos como CIRAD (Centro de cooperación internacional en investigación agronómica para el desarrollo), CEMAGREF (Centro de maquinaria agrícola), ITCF (Instituto técnico de cereales y forrajes), CETIOM (Centro técnico interprofesional de oleaginosas) y AGPM (Asociación general de productores de maíz), entre otros, desarrollaron el STIC (Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standard) a partir de 1996. Las variables de entrada de este modelo están relacionadas con el clima, el suelo y el sistema de cultivo (radiación, temperatura máxima y mínima, precipitación, evapotranspiración, humedad), mientras que las variables de salida incluyen rendimiento en términos de calidad y cantidad, fenología, distribución de masa seca y variables ambientales relacionadas con drenaje y pérdida de nitrato. En síntesis, los principales procesos simulados por STIC son el crecimiento y desarrollo de cultivos como trigo, maíz, tomate, soya, girasol, arveja, banano, caña de azúcar, lechuga y zanahoria (Brisson *et al.*, 2003), al igual que el balance de agua y de nitrógeno.

van Ittersum *et al.* (2003) aseguran que los modelos desarrollados en Wageningen (LINTUL, SUCROS, ORYZA, WOFOST e INTERCOM) son los más grandes y amplios sistemas de modelación. Según los autores, los mayores logros alcanzados con el desarrollo de este grupo de modelos son: a) amplia variedad de enfoques en sistemas de modelación con diferentes escalas y propósitos; b) contribución a los sistemas cuantitativos en general y las aplicaciones en niveles jerárquicos; y c) contribución al entendimiento de los cultivos y sistemas de producción como herramienta de soporte en la formación de profesionales.

El modelo SUCROS simula el crecimiento y desarrollo del cultivo de trigo a partir de las variables de entrada radiación y temperatura, opera bajo condiciones adecuadas de nutrición y sin presencia limitante de plagas, enfermedades o malezas. En el caso del SUCROS2 se adiciona la precipitación como una nueva variable de entrada y se obtienen como salidas la simulación del crecimiento del cultivo en condiciones de disponibilidad hídrica limitada (Spitters *et al.*, 1989). Según Salazar (2006), uno de los desarrollos más grandes de este grupo es la simulación del crecimiento y desarrollo del cultivo basado en procesos químicos, físicos y fisiológicos.

SUCROS al igual que CERES también sirve como base para el desarrollo de nuevos modelos, como en el caso de INFOCROP. Este modelo de cultivos genérico y dinámico permite evaluar además del efecto del clima, genotipo vegetal, tipo de suelos y prácticas de manejo, el impacto de insectos plaga y enfermedades sobre el crecimiento y producción de los cultivos (Aggarwal *et al.*, 2006a). La evaluación del modelo en cultivos de arroz y trigo en diferentes ambientes del trópico mostró resultados satisfactorios respecto a su capacidad de simulación (Aggarwal *et al.*, 2006b).

En cultivos perennes, Tixer *et al.* (2004) reportan a SIMBA-POP como un modelo calibrado y validado para predecir cosechas en banano. De igual manera, Kooman y Jones (1995) describen un modelo de producción potencial para banano en Honduras, donde se evaluó la temperatura y la radiación junto al efecto de la variación del clima durante un año y entre años. Adicionalmente, presentan un análisis de sensibilidad del modelo con variables como crecimiento inicial de la hoja, densidad de siembra, intervalo de emisión de brotes y asignación de masa seca al fruto.

Otros modelos de cultivo de interés agrícola presentados por Whisler *et al.* (1986) y Ritchie y NeSmith (1991) son: ALSIM (alfalfa), AUSCANE (caña de azúcar), SUN 51 (girasol), POTATOE (papa), SUBSTOR (yuca, ñame, piña), PNUTGRO (maní), BEANGRO (fríjol), WINSORG (sorgo) y GOS-SYM (algodón), entre otros.

En relación con cultivos hortícolas, tomate es una de las especies en la que se han desarrollado varios modelos de simulación; sin embargo, sólo algunos (TOMGRO, TOMSIM, TOMPOUSSE) simulan el crecimiento, desarrollo y producción. El principal objetivo de estos modelos es servir como herramienta útil para optimizar el control del clima en los invernaderos y con ello la productividad del cultivo (Pulido, 2008).

TOMGRO es un modelo que se basa en la fotosíntesis, describe el desarrollo fenológico y el incremento en masa seca de los diferentes órganos de la planta desde trasplante hasta el fin de cosecha, bajo condiciones variables de radiación solar, temperatura y concentración de CO₂ (Cooman, 2002). En este modelo, según Jones *et al.* (1991), la acumulación de masa seca responde al balance de carbono: asimilación de CO₂, respiración de mantenimiento y de crecimiento; mientras que la partición de asimilados obedece a la fuerza vertedero y a la edad del órgano. Por último, la organogénesis y la duración de los órganos dependen principalmente de la temperatura (Cooman, 2002).

TOMSIM es otro modelo dinámico que simula la distribución de masa seca entre las partes vegetativa y reproductiva del tomate en invernadero y su partición en frutos individuales (Salazar, 2006). En otras investigaciones relacionadas con la dinámica de partición de masa seca en tomate, Heuvelink (1997) indica que la carga de frutos (número de frutos por planta) influencia fuertemente la partición de asimilados entre los órganos vegetativos y repro-

ductivos; así, la masa individual de los frutos se incrementa a medida que se disminuye el número de frutos por planta.

En pepino, Marcelis y Gijzen (1998) desarrollaron el modelo mecanístico KOSI 1.0 para predecir la masa fresca de los frutos. El modelo está estructurado en los siguientes módulos: transmisión de la luz, intercepción de la luz por el cultivo, fotosíntesis de hoja y canopi, partición de asimilados, crecimiento del fruto, contenido de masa seca del fruto y fruta cosechada. La transmisión de la luz, la intercepción de la luz y la fotosíntesis se calculan en cinco tiempos durante el día. Estos tiempos se seleccionan de tal manera que la fotosíntesis diaria se pueda calcular por el método de integración Gaussiano.

Kooman y Spitters (1995) presentan la descripción de un modelo general de producción potencial de papa a partir de dos ejemplos: el primero corresponde a la producción potencial de papa y la acumulación de masa seca en condiciones óptimas de agua y nutrientes donde se asume la ausencia de arvenses, plagas y enfermedades. En este, se distinguen tres procesos importantes: intercepción de luz, utilización de la luz para producción de masa seca y distribución de masa seca. Los valores simulados, tanto para la masa total como para la masa del tubérculo, fueron similares a los datos medidos. El segundo ejemplo incluye el estrés por sequía como factor limitante de la producción. Los resultados muestran buena relación entre la simulación del modelo y los datos medidos de masa seca total y masa del tubérculo; no obstante, el modelo sobrestima la masa de las hojas y del tallo.

En plantas ornamentales, el desarrollo de modelos hasta el momento no presenta una producción significativa. Uno de los primeros modelos en cultivos ornamentales lo desarrolló Benschop (1985) para tulipanes; en este modelo se simula el área foliar como el producto de la masa foliar simulada por el área foliar específica, mientras que la fotosíntesis del canopi se simula a partir de la fotosíntesis de la hoja a través de funciones exponenciales. La distribución de asimilados se simula por regulación alométrica, es decir, dependiendo del tamaño del órgano vertedero con respecto a su órgano fuente.

En schefflera, Leutscher y Vogelezang (1990) simularon el crecimiento y desarrollo a partir del área foliar; la cual a su vez se simuló utilizando el producto de la masa foliar por el área foliar específica. En este caso, la fotosíntesis de la hoja se utilizó para simular la fotosíntesis del canopi a través de funciones hiperbólicas, mientras que la regulación alométrica permitió simular la partición de asimilados.

Lieth y Pasian (1991) desarrollaron un modelo para el cultivo de rosa. Los autores simulan el área foliar como el producto de la masa foliar simulada por el área foliar específica, mientras que la fotosíntesis del canopi se simula a partir de la fotosíntesis de la hoja a través de funciones hiperbólicas. La regulación alométrica se usó para simular la distribución de asimilados. Tam-

bién en rosa, Kool y de Koning (1996) desarrollaron un modelo sin simular el área foliar. En este caso, la fotosíntesis del canopi se simuló a partir de la fotosíntesis de la hoja mediante funciones exponenciales y la partición de asimilados se simuló por regulación alométrica.

En rosa cultivar Dallas injertado en el patrón Manetti, Gutiérrez Colomer *et al.* (2006) plantearon un modelo de distribución de masa seca durante las diferentes estaciones del año basado en el tiempo térmico que se expresa en grados día. Los resultados indican que en primavera los tallos y hojas de la planta acumulan una mayor cantidad de masa seca con relación al verano y otoño; sin embargo, no encontraron diferencias significativas en la masa seca del botón floral para las tres estaciones evaluadas.

En lo relacionado con especies forestales como café, Picini *et al.* (1999) desarrollaron un modelo de predicción de la producción potencial en función de la producción del año anterior y la relación entre la evapotranspiración real y potencial obtenida del balance hídrico del cultivo, el cual se realiza para cada estadio fenológico del cultivo.

De igual manera, dos Santos y Paes de Camargo (2006) desarrollaron un modelo agrometeorológico para la predicción de la cosecha de café en el estado de São Paulo. El modelo estima la producción potencial del cultivo en función del déficit hídrico, la producción del año anterior y la temperatura. Los investigadores reportan que la mayor sensibilidad del cultivo a la sequía se presenta en la etapa de floración y formación de granos.

Modelos fenológicos y tiempo térmico

El desarrollo de un cultivo depende en gran medida de la temperatura y del fotoperíodo; sin embargo, en el trópico la temperatura es la variable ambiental con mayor influencia en el desarrollo de los cultivos. El papel regulador de la temperatura se realiza a través de su acción sobre las reacciones enzimáticas que directa o indirectamente intervienen en los procesos de desarrollo (Baker y Reddy, 2001; Bonhomme, 2000; Normand y Léchaudel, 2006; Pulido, 2008).

En la agricultura la combinación del tiempo y la temperatura resulta en el denominado tiempo térmico (TT) o también conocido como suma de calor, grados día, grados día de desarrollo o tiempo fisiológico. Este enfoque se ha utilizado en numerosos estudios para describir la fenología de cultivos como maíz (*Zea mays* L.), caña de azúcar (*Saccharum spp.*), melón (*Cucumis melo* L.), garbanzo (*Cicer arietinum* L.) y algodón (*Gossypium hirsutum* L.) (Ruiz *et al.*, 2002; Campbell *et al.*, 1998; Baker *et al.*, 2001; Soltani *et al.*, 2006 y Viator *et al.*, 2005). La temperatura es un factor básico que influencia especialmente la tasa de desarrollo. Muchas especies están adaptadas a rangos particulares de temperatura; así, a medida que la temperatura ambiental o temperatura media (T_i) disminuye, sus tasas de desarrollo se reducen, a tal punto que si la temperatura

baja al límite, el desarrollo se detiene; a esta temperatura límite se denomina base (T_b). Por el contrario, a medida que la temperatura aumenta, sus tasas de desarrollo se incrementan hasta una temperatura óptima (T_o), a partir de la cual estas disminuyen y eventualmente se detienen en su temperatura máxima de desarrollo (T_m) (Trudgill *et al.*, 2005).

La velocidad de desarrollo se puede determinar a través del inicio y el final de las fases y las etapas (Schwartz, 1999) o, mediante el conteo semanal del número de nudos, con la duración o el tiempo transcurrido desde la aparición de un nudo hasta el siguiente (Angulo, 2003).

El número de nudos representa el estadio de desarrollo o edad de la planta y es una característica dependiente de la tasa de aparición de nudos, que, a su vez, es una función fenológica dependiente de la temperatura. La tasa de aparición de nudos junto con las tasas de desarrollo de hojas y frutos regulan el desarrollo de los órganos en las plantas (Cooman, 2002). El incremento del índice de área foliar y, por tanto, la intercepción de la radiación y el crecimiento, dependen de la aparición de nudos en el tallo (Robertson *et al.*, 2002), ya que la aparición de un nudo es requisito indispensable para el desarrollo de una hoja.

Según Ruiz *et al.* (2002), la relación entre la tasa de desarrollo y la temperatura es frecuentemente lineal para plantas y algunos invertebrados y de esta relación se derivan dos conceptos importantes: el tiempo térmico y la T_b . El tiempo térmico o constante térmica es la cantidad de grados día (gdd) necesarios para finalizar un determinado proceso de desarrollo o fase fenológica (Trudgill *et al.*, 2005). El cálculo del tiempo térmico puede llevarse a cabo a través de varios métodos; no obstante, los dos métodos más comunes son el método simple y el método residual.

Método simple: En este método se calcula la T_i a partir de las temperaturas máximas y mínimas del día y, posteriormente, se le resta la T_b (Jenni *et al.*, 1996; Confalone y Navarro, 1999).

$$T_i = \frac{(T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})}{2} ; TT = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$$

En donde TT es el tiempo térmico expresado en gdd, n es el número de días, T_i la temperatura media y T_b la temperatura base.

En cuanto al cálculo de la temperatura media (T_i), autores como Soltani *et al.* (1995) indican que la medición de la temperatura del aire hora a hora ofrece mayor precisión respecto a la utilización de las temperaturas máximas y mínimas.

Método residual: La metodología es similar al método simple; sin embargo, incluye algunas restricciones, las cuales plantean que cuando las temperaturas máximas y mínimas están por encima o por debajo de la T_m y T_b , respectivamente, se deben utilizar la T_m y T_b para el cálculo de la tempe-

ratura media (T_i). Posteriormente, a esta T_i se le debe restar la temperatura base (Montes *et al.*, 2004).

$$T_i = \frac{(T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})}{2}$$

Con las siguientes consideraciones: Si $T_{\text{mín}} < T_b$, se asume el valor de T_b ; si $T_{\text{máx}} > T_m$, se asume el valor de T_m ; y si $T_{\text{mín}} < T_b$ y $T_{\text{máx}} > T_m$, se asumen los valores de T_b y T_m .

El concepto de tiempo térmico se aplica ampliamente en agricultura y silvicultura. En diversos cultivos se utiliza para el cálculo de la tasa de aparición de nudos, hojas, inflorescencias y desarrollo de frutos (Brown y Moot, 2004; NeSmith, 1997; Normand y Léchaudel, 2006; Fleisher y Timlin, 2006; Salazar, 2006; Pulido, 2008); y para la producción potencial (Clifton-Brown *et al.*, 2000 y Salazar, 2006). De acuerdo con Bonhomme (2000), para la aplicación del concepto de tiempo térmico se requiere linealidad o una relación indiscutible entre la tasa de desarrollo y la temperatura. Se espera que los datos de temperatura sean confiables y no existan factores limitantes para el desarrollo del cultivo.

Autores como Normand y Léchaudel (2006), Steinmaus *et al.* (2000) y Pulido (2008) coinciden en que la calidad de la predicción y la aplicación de un modelo desarrollado a partir del concepto de tiempo térmico depende de la correcta estimación de un único parámetro, la temperatura base (T_b). El concepto de T_b se puede describir desde la perspectiva fisiológica o estadística. Fisiológicamente, se define como el valor de la temperatura bajo el cual el desarrollo de un cultivo o un órgano específico de una planta se detiene. Sin embargo, la T_b fisiológica es de difícil determinación y para cada fase del desarrollo y para cada órgano puede existir un valor determinado (Trudgill *et al.*, 2005; Pulido, 2008). Estadísticamente, la T_b es un parámetro con el cual se obtiene la menor variación en la acumulación de grados día para un estadio fenológico en particular (Bonhomme, 2000; Normand y Léchaudel, 2006; Yang *et al.*, 1995; y Trudgill *et al.*, 2005). La T_b como parámetro estadístico generalmente es más baja que la temperatura base fisiológica, pero debe ser consistente con el método de cálculo y ser adecuada para lograr un buen ajuste del modelo desarrollado (Bonhomme, 2000; Normand y Léchaudel, 2006; Steinmaus *et al.*, 2000).

Según Campbell *et al.* (1998) a nivel experimental se utilizan dos metodologías para la toma de datos: a) Uso de ambientes controlados con diferente rango de temperatura constante donde se mide la tasa de crecimiento según el régimen de temperatura; y b) Cultivos experimentales en campo en donde se registra la tasa de crecimiento y la temperatura media del aire. Sin embargo, en ambos casos la temperatura base se define como aquella en la cual se minimiza la variación para la regresión entre la tasa de desarrollo y el tiempo térmico acumulado.

Métodos de estimación de la temperatura base (T_b)

La literatura reporta diferentes métodos para determinar la temperatura base. Pulido (2008), en su investigación sobre modelos fenológicos, cita los siguientes como los más importantes.

1. **La mínima desviación estándar de la suma de tiempo térmico para una serie de datos:** en este método se selecciona la temperatura base que reduce al mínimo la variación en los gdd para una serie de datos.

$$SD_{gdd} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (gdd_i - Mgdd)^2}{n-1} \right]^{1/2}$$

Donde: SD_{gdd} es la mínima desviación estándar en gdd, gdd_i son los grados día de las *iesimas* siembras, $Mgdd$ es la media de todos los grados día de todas las siembras, y n es el número de siembras.

2. **Minimización de la desviación estándar,** expresada en días, que corresponde a la suma del tiempo térmico. Este método requiere la selección de la temperatura base a partir de una serie de temperaturas propuestas.

$$SD_{dia} = \frac{SD_{gdd}}{x_t - Tb}$$

Donde: SD_{dia} es la desviación estándar en días, SD_{gdd} es la desviación estándar en gdd, x_t es el promedio total de temperatura de todas las siembras y Tb la temperatura base.

3. **Coefficiente de variación en el método de días**

$$CV_{dia} = \frac{SD_{dia}}{x_d} * 100\%$$

Donde: SD_{dia} es la desviación estándar en días y x_d el número de días promedio para alcanzar un determinado estadio de desarrollo.

4. **Método de coeficiente de regresión.** Este método presenta la siguiente fórmula:

$$Y_i = a + bT_i \text{ , } Y_i = (Ti - Tb)d_i$$

Donde a y b son constantes, Ti es la temperatura media para las *iesimas* siembras, d_i es el número de días requerido para alcanzar un estadio de desarrollo de la *iesima* siembra y Y_i son gdd para *iesimas* siembras.

5. **Método de la tasa de desarrollo o intercepción de x.** La fórmula general de este método es $1/f = a + bT_i$, donde f es el número de días entre los estadios de desarrollo, $1/f$ es la tasa de desarrollo, a es el intercepto, b el coeficiente de regresión y T_i es la temperatura media. Cuando la tasa de desarrollo $1/f = 0$, la temperatura base es $-a/b$.

La importancia de la determinación del valor de T_b y el cálculo de los gdd para un cultivo radica en que una vez se determinan estos valores, la tasa y duración de un proceso o fase fenológica en un rango de temperatura determinado se pueden calcular fácilmente (Trudgill *et al.*, 2005).

Zacharias *et al.* (2008) desarrollaron un modelo para la predicción del inicio de la plena floración en café, basado en los conceptos de grados día y sumatoria de la evapotranspiración potencial. Los autores reportan una estrecha relación ($R^2 = 0,998$) entre los grados día y la evapotranspiración potencial acumulada. Los resultados indican que para el inicio de la floración plena en café se necesitan 1.579 gdd o la acumulación de 335 mm de evapotranspiración potencial.

Aplicaciones y estado de la modelación en Colombia

La modelación de cultivos proporciona información cuantitativa para la toma de decisiones, como época de siembra, riego, fertilización, manejo de plagas y enfermedades. Además, puede servir como herramienta para llevar a cabo estimaciones de potencial de rendimiento, necesidades hídricas, pérdidas de fertilizantes y otros factores (Gary *et al.*, 1998; Meira y Guevara, 2000).

Los modelos de cultivo tienen como objetivo simular el crecimiento y desarrollo de las plantas en función de factores externos, generalmente temperatura y radiación, y constituyen una herramienta en el análisis de decisión del manejo de un cultivo (Salazar *et al.*, 2008). El conocimiento previo del crecimiento y desarrollo de un cultivo a través de la simulación obtenida a partir de un modelo, permite planear las prácticas de manejo orientadas a acelerar o retrasar el crecimiento de la planta con el fin de obtener la cosecha en las épocas adecuadas y con ello maximizar la utilidad del productor.

Un modelo de cultivo no sólo predice la producción final de biomasa o rendimiento cosechable, sino que también contiene información cuantitativa acerca de la mayoría de procesos involucrados en el desarrollo y crecimiento de la planta (Jame y Cutforth, 1996), incluyendo fenología (Jones y Ritchie, 1990).

Los modelos de cultivo tienen varias aplicaciones reales y potenciales en respuesta a temas relacionados con investigación, manejo y planificación de cultivos. Los modelos pueden ayudar a la comprensión de las interacciones entre la genética, la fisiología y el ambiente, con una integración interdisciplinaria. Además, permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación

de un cultivo futuro, y tomar decisiones oportunas durante el ciclo del cultivo (Dourado-Neto *et al.*, 1998; Meira y Guevara, 2000; Ranganathan *et al.*, 2001).

Según Salazar (2006), mediante un modelo de simulación bien fundamentado es posible conocer el comportamiento de un cultivo ante variaciones ambientales y prácticas culturales, en respuesta a valores totales diarios u horarios de radiación solar, temperatura, lluvia o riego; así como la respuesta a manejos culturales como fertilización y densidad de siembra, entre otros.

Debido a que la PAR es una entrada de los modelos de cultivo, se puede llevar a cabo la simulación del comportamiento del crecimiento y desarrollo de un cultivo específico bajo diferentes condiciones o escenarios de PAR. Este proceso permite, desde el punto de vista de la oferta de radiación, la selección de zonas más aptas para la siembra del cultivo y, a su vez, puede representar mayor eficiencia económica, expresada en términos de rentabilidad y tiempo.

De igual manera, la selección de la mejor época de siembra puede realizarse de forma similar, si se considera que durante el transcurso del año la luz y la temperatura son factores cambiantes, pero generalmente guardan correspondencia con los datos históricos del clima. Así, se puede seleccionar como época de siembra aquella que permita la mayor captación de PAR posible y, por tanto, propicie la máxima producción de masa seca y la mayor acumulación en los órganos de interés económico.

Los modelos fenológicos son herramientas dirigidas a conocer y predecir el desarrollo de las plantas. La aplicación de estos modelos incluye la estimación de las épocas de cosecha de algunos cultivos: por ejemplo, un modelo de aparición de nudos hace implícito la aparición de hojas, y la mayoría de cultivos de crecimiento determinado luego de un cierto número de nudos producen estructuras reproductivas, que determinan la cosecha. De esta forma, si se conoce la temperatura y su relación con la tasa de aparición de nudos, es posible estimar las épocas de cosecha a partir de supuestos de temperatura promedio diaria.

Por otro lado, los modelos fenológicos también permiten la implementación de prácticas agronómicas orientadas a incrementar o disminuir la velocidad de un proceso. Así, en caso de que, con base en un modelo fenológico, se detecte un retraso en un proceso como la aparición de nudos, el manejo de la temperatura a través de la ventilación en un invernadero de producción de plantas ornamentales puede ser una alternativa viable para incrementar las tasas de crecimiento y con ello disminuir el retraso en el desarrollo del cultivo. De la misma forma, puede permitir la planeación de otras prácticas de manejo con gran influencia sobre el crecimiento como es el caso de la fertilización.

En Colombia, Salazar (2006) y Salazar *et al.* (2008) presentaron un modelo de producción potencial para uchuva (*Physalis peruviana* L.), que describe el desarrollo fenológico, producción y distribución de masa seca de la planta

desde el trasplante hasta el final del primer ciclo de cosecha. En esta investigación el LUE durante la etapa vegetativa fue de $0,46 \text{ g.MJ}^{-1}$ mientras que en la etapa reproductiva ascendió a $2,62 \text{ g.MJ}^{-1}$. De igual manera, los coeficientes de partición de masa seca del tallo y las hojas calculados para la fase vegetativa correspondieron a $0,28$ y $0,72$, respectivamente. En la etapa reproductiva, estos coeficientes de partición tomaron valores de $0,09$, $0,22$ y $0,69$ para las hojas, tallos y frutos, respectivamente.

En la figura 2 se presentan los valores observados y simulados para la masa seca total y por órganos obtenidos en la investigación de Salazar (2006). Este trabajo concluye que en uchuva en la fase vegetativa el 72% de la masa seca total corresponde a las hojas y el 28% a los tallos. En la fase reproductiva, el 69% de la masa seca total se distribuyó a los frutos, el 22% al tallo y el restante 9% a las hojas.

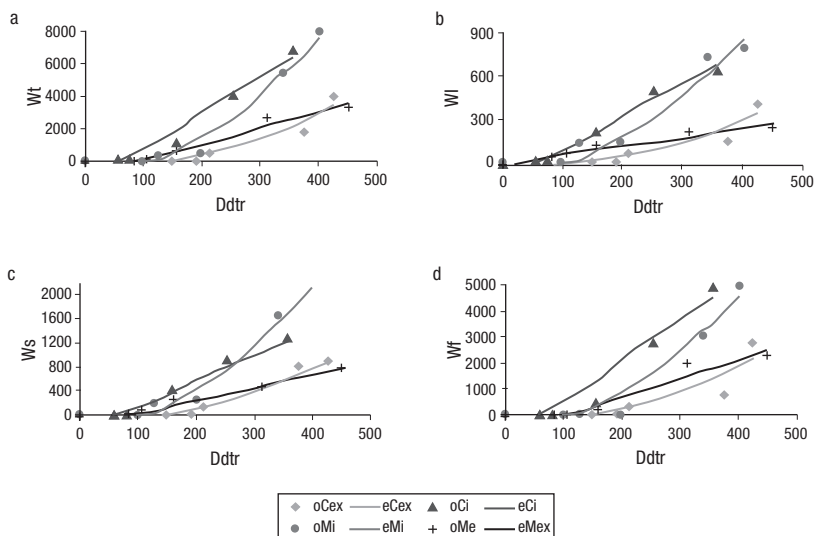


Figura 2. a) Valores observados y simulados de la masa seca total (Wt); b) de hojas (Wl); c) tallos (Ws) y d) frutos (Wf) en función de días después del trasplante (Ddtr); oCex, oMex, oCi, oMi, eCex, eMex, eCi y eMi son los valores observados y estimados de masa seca para Chía (C) y Miraflores (M) a campo abierto e invernadero, respectivamente. (Con autorización de Salazar (2006), noviembre de 2011).

En otra investigación del ámbito nacional, Galindo (2006) presenta un modelo explicativo del crecimiento, desarrollo y productividad potencial del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) en condiciones de la sabana de Bogotá, que se basa en la información de otros modelos de cultivos como CROPSYST y CERES-Maize.

En condiciones de la sabana de Bogotá, Carranza *et al.* (2008) también desarrollaron dos modelos simples de simulación de distribución de masa seca para los cultivos de brócoli (*Brassica* sp.) y repollo (*Brassica oleracea*).

En esta investigación, los autores reportan coeficientes de extinción de la luz de 0,5120 y 0,5052 para los cultivos de brócoli y repollo, respectivamente. Por su parte, el IAF máximo en brócoli fue de 1,76 obtenido a los 50 días después de trasplante (ddt), mientras que en repollo alcanzó los 5,17 a los 68 ddt.

En lo relacionado con porcentajes de partición de masa seca, el brócoli presentó coeficientes de 0,4662; 0,4513; 0,0825 para las hojas, tallos y raíz en la etapa vegetativa y 0,1418; 0,3643; 0,2709; 0,2230 para las hojas, tallos, raíz e inflorescencia en la etapa reproductiva. En el caso del repollo, los coeficientes son de 0,6530; 0,2841; 0,0630 para las hojas, tallos y raíz, respectivamente. El LUE en g.MJ^{-1} alcanzó valores de 0,2280 para el cultivo de brócoli y 0,1180 para el de repollo. Los autores concluyeron que en repollo más del 65,3% de la biomasa producida se acumuló en las hojas que son el órgano de interés económico, un 28,4% se acumuló en el tallo y sólo un 6,3% en la raíz.

En las figuras 3 y 4 para brócoli y repollo, respectivamente, se presentan los valores observados y simulados de la producción de masa seca total y su partición en los diferentes órganos en función de los días después de trasplante.

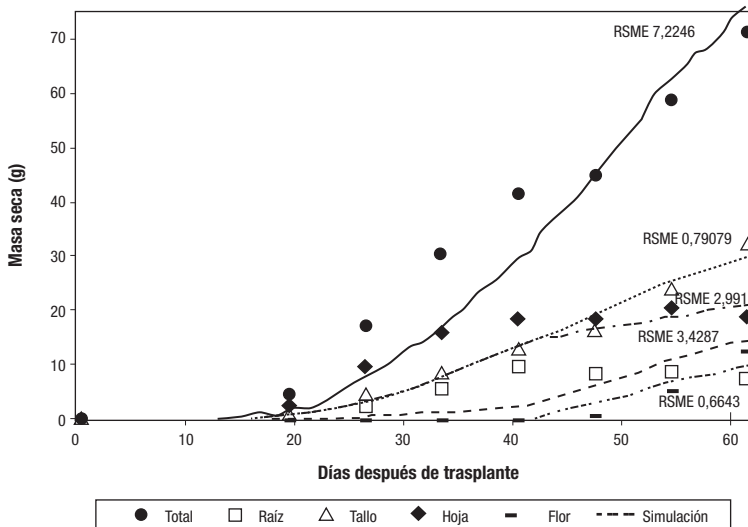


Figura 3. Valores observados y simulados de la producción de masa seca total y partición en los diferentes órganos (raíz, tallo, hojas y flor) en un cultivo de brócoli. (Con autorización de Carranza *et al.* (2008), noviembre de 2011).

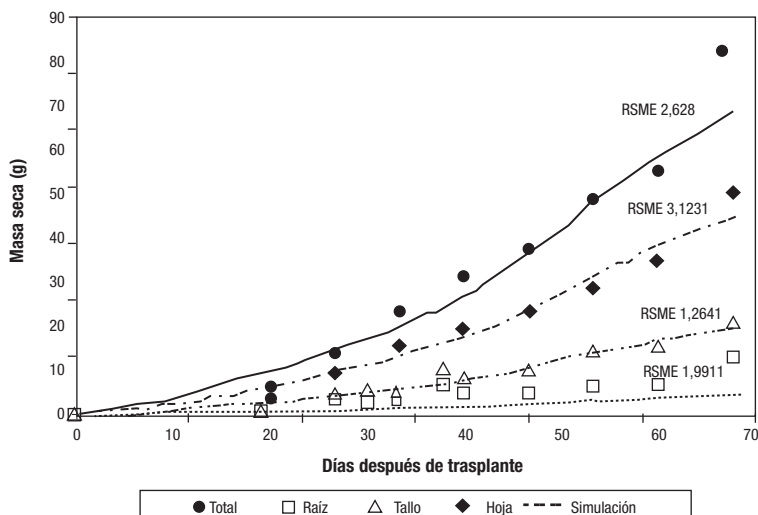


Figura 4. Valores observados y simulados de la producción de masa seca total y partición en los diferentes órganos (raíz, tallo y hojas) en un cultivo de repollo. (Con autorización de Carranza *et al.* (2008), noviembre de 2011).

En Colombia en especies forestales, Cenicafé, en conjunto con el sector reforestador y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, desarrolló en el año 2005 la primera versión del Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico (CREFT). Esta herramienta permite cuantificar la acumulación de carbono en nuevas plantaciones de café en condiciones del trópico. El CREFT, a través de variables de entrada como la localización geográfica (latitud, longitud y altitud), fecha de siembra y datos diarios de temperatura máxima, mínima y de brillo solar calcula el crecimiento, acumulación y distribución de carbono en la planta (Riaño *et al.*, 2005).

En lo relacionado con investigaciones sobre modelos fenológicos, Salazar *et al.* (2008) en su trabajo desarrollado en el cultivo de uchuva en las cuatro condiciones estudiadas, Chía y Miraflores con y sin invernadero, reporta una temperatura base para la aparición de nudos de 6,29 °C y tasas promedio de aparición de nudos del orden de 0,2 y 0,08 nudos por día para las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo, respectivamente. En la figura 5 se presenta la respuesta del número de nudos a la acumulación de tiempo térmico.

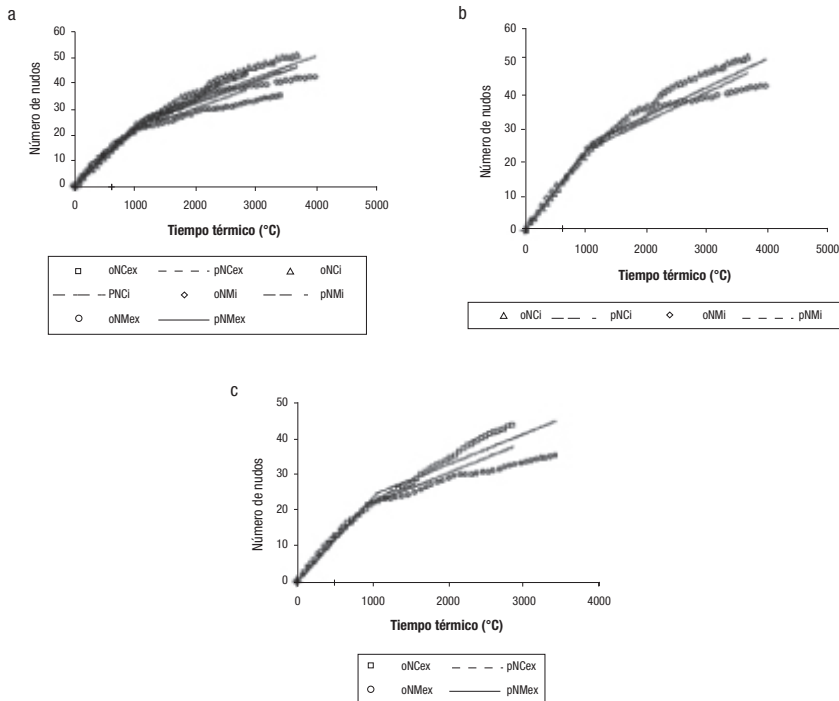


Figura 5. Aparición de nudos en función de tiempo térmico. oNCex, oNMex, oNCi y oNMi son los nudos observados y pNCex, pNMex, pNCi, pNMi son los nudos estimados para Chía (C) y Miraflores (M) a campo abierto y dentro del invernadero, respectivamente. (Con autorización de Salazar *et al.* (2008), noviembre de 2011).

Por su parte, Pulido (2008) determinó la temperatura base para las etapas fenológicas de aparición del botón floral, apertura del botón floral, cuajado del fruto y maduración del fruto de lulo (*Solanum quitoense*) en condiciones de la sabana de Bogotá y Miraflores, Boyacá. Los valores encontrados para las anteriores fases fenológicas son 1,21; 10,01; 9,42 y 7,21, respectivamente. En la figura 6 se presenta la respuesta del número de nudos a la acumulación de temperatura (figura 6 a) y a la acumulación de tiempo térmico (figura 6 b). El autor concluye que la aparición de nudos en el cultivo de lulo presentó un comportamiento de tipo exponencial en función del tiempo térmico y reportó un buen ajuste a la curva de crecimiento de von Bertalanffy. De igual manera, el modelo desarrollado describe adecuadamente la aparición de nudos (hojas e inflorescencias) en la planta de lulo en las condiciones ambientales y de manejo de los cultivos experimentales.

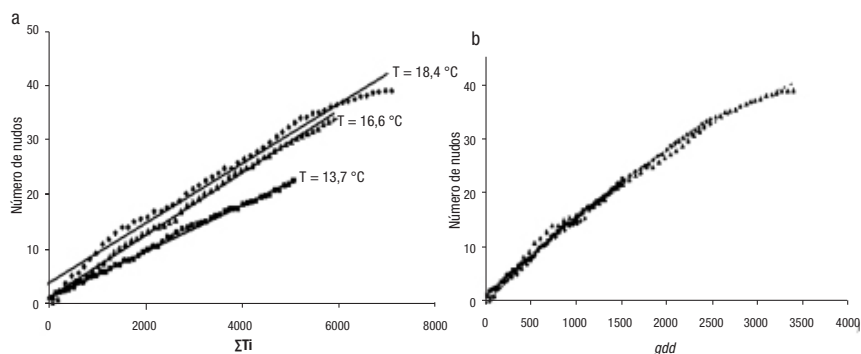


Figura 6. a) Número de nudos observado por tallo en función de la temperatura acumulada (ΣT_i) para plantas de lulo cultivadas en tres condiciones climáticas diferentes: Chía exterior Ce (■), Chía interior Ci (▲) y Miraflores interior Mi (◆). b) Comparación del número de nudos simulado (Ce: —, Ci: ---, Mi:) y observado (Ce: ■, Ci: ◆, Mi: ▲) en función del tiempo térmico acumulado (Σgdd) para lulo en tres condiciones climáticas. (Fuente: Pulido, 2008).

En Colombia, también se han desarrollado modelos empíricos de crecimiento de cultivos ornamentales. Dentro de este grupo de modelos sobresalen el de Chaparro *et al.* (2006), quienes realizaron el análisis de crecimiento en rosa (*Rosa* sp.) var. Charlotte en dos sistemas de cultivo: sustrato y suelo. Los autores determinaron la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), el índice de área foliar (IAF), la tasa relativa de crecimiento (TRC) y la tasa de asimilación neta (TAN). En esta investigación la producción de masa seca se ajustó a un modelo de tipo logístico. Los resultados indican que la máxima TCC se obtuvo en el tratamiento mezcla de 35% de cascarilla de arroz quemada y 65% de fibra de coco, cuyo valor fue de $0,00067 \text{ g.cm}^{-2}.\text{día}^{-1}$. De igual forma, este tratamiento también reportó el mayor valor de IAF para el tallo floral, de 0,99. Por su parte, el tratamiento 100% cascarilla de arroz quemada presenta las mayores TRC y TAN con valores de $0,15 \text{ g.g}^{-1}.\text{día}^{-1}$ y $0,001 \text{ g.cm}^{-2}.\text{día}^{-1}$, respectivamente.

En la sabana de Bogotá, Farías *et al.* (2006) desarrollaron las curvas de crecimiento de rosa en sistema de cultivo sin suelo para las variables longitud del tallo y longitud y diámetro del botón floral. Los resultados plantean que el crecimiento en longitud y diámetro tanto del tallo como del botón se ajustan a un modelo de tipo logístico. La mayor longitud del tallo floral se consiguió en el tratamiento suelo con valores de 89,81 cm. Por su parte, la máxima tasa de crecimiento del tallo se presentó en general entre los 30 a 35 días después del *pinch* (ddp). La longitud del botón floral varió en general entre 57 a 79 mm, mientras que las máximas tasas de crecimiento se encontraron entre los 57 a 60 ddp. En el caso de diámetro del botón floral los mayores valores se encuentran entre 30 y 40 mm y las máximas tasas de crecimiento se obtienen entre los 53 a 55 ddp.

En clavel (*Dianthus caryophyllus* L.), Cárdenas *et al.* (2006) llevaron a cabo el análisis de crecimiento en el cv. Nelson cultivado en condiciones de la sa-

bana de Bogotá. Para tal fin, se determinaron los índices de crecimiento IAF, TAN, TCC y TRC. Todas las variables evaluadas ajustaron al modelo de crecimiento logístico. Los resultados indican que el área foliar presenta valores máximos comprendidos entre 995 y 1172 cm², mientras que sus máximas tasas de crecimiento se encuentran entre la semana 11 a 15. Por su parte, la masa seca foliar reporta valores máximos que varían entre 14 y 18,3 g con máximas tasas de crecimiento entre las semanas 15 a 20. En el caso de la masa seca del tallo, los máximos valores se encuentran en el rango de 20,7 a 23,8 g y sus mayores tasas de crecimiento se encuentran entre las semanas 19 y 20. Por último, la masa seca total presenta valores máximos comprendidos entre 47,2 y 52,0 g con tasas máximas de crecimiento entre las semanas 19 y 20.

También en clavel, López *et al.* (2010) generaron un modelo fenológico de aparición de nudos en tallos florales cv. Delphi establecidos en tres tipos de sustratos: 100% cascarilla de arroz quemada; mezcla de 65% cascarilla de arroz quemada - 35% fibra de coco; y mezcla de 35% cascarilla de arroz quemada - 65% fibra de coco. El modelo se basa en la temperatura y la tasa de aparición de nudos; se asume que el cultivo tiene condiciones óptimas de agua y nutrientes y que no está limitado por plagas, enfermedades o arvenses. En el modelo, el desarrollo fenológico de la planta se determinó por el TT, para lo cual se estimó la Tb para la aparición de nudos, mediante el ajuste de un modelo exponencial modificado entre la tasa de aparición de nudos y la temperatura acumulada. La Tb estimada presentó un valor de 0,12°C. La simulación de los nudos se realizó con el método de Euler y el modelo ajustó de manera satisfactoria con un valor de raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RSME) de 0,2833 (figura 7).

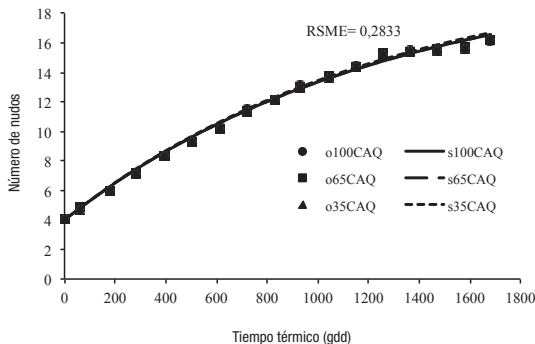


Figura 7. Aparición de nudos en tallos florales de clavel estándar cv. Delphi en función de tiempo térmico en grados día (gdd). o100CAQ, o65CAQ, o35CAQ corresponden al número de nudos observado para los sustratos 100% cascarilla de arroz quemada; mezcla de 65% cascarilla de arroz quemada - 35% fibra de coco; y mezcla de 35% cascarilla de arroz quemada - 65% fibra de coco. s100CAQ, s65CAQ, s35CAQ representan al número de nudos simulado para los mismos sustratos.

Bibliografía

- Aggarwal, P.K., Kalra, N., Chander, S., and Pathak, H. 2006a. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. I. Model description. *Agricultural Systems*, 89:1-25.
- Aggarwal, P.K., Banerjee, B., Daryaei, M.G., Bhatia, A., Bala, A., Rani, S., Chander, S., Pathak, H., and Kalra, N. 2006b. InfoCrop: A dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro-ecosystems in tropical environments. II. Performance of the model. *Agricultural Systems*, 89:47-67.
- Angulo C., R. 2003. *Frutales exóticos de clima frío*. Bogotá: Bayer CropScience. 136p.
- Baker, J.T. and Reddy, V.R. 2001. Temperature effects on phenological development and yield of muskmelon. *Annals of Botany*, 87(5):605-613.
- Baker, J.T., Leskovar, D.I., Reddy, V.R. and Dainello, F.J. 2001. A simple phenological model of muskmelon development. *Annals of Botany*, 87(5):615-621.
- Benschop, M. 1985. TUCROS: een simulatiemodel voor de tulpecultivar 'Apeldoorn'. Simulation Report CABO-TT No. 6, pp. 83.
- Bonhomme, R. 2000. Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 13:1-10.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J.P., H nault, C., Maraun, F., Seguin, B., and Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18:309-332.
- Brown, H.E. and Moot, D.J. 2004. *Main-stem node appearance of lucerne regrowth in a temperate climate*. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane. Disponible en [www.cropscience.org.au/icsc2004/poster/2/8/1939_brown.htm](http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/poster/2/8/1939_brown.htm).
- Campbell, J., Robertson, M., and Grof, C. 1998. Temperature effects on node appearance in sugarcane. *Australian Journal of Plant Physiology*, 25:815-818.
- Cárdenas M., C.A., Rivera G., I.F., Flórez R., V.J., Piedrahíta C., W. y Chaves C., B. 2006. Análisis de crecimiento en clavel estándar variedad 'Nelson' cultivado en sustratos. En: Flórez R., V.J., Fernández M., A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*. Bogotá: Unibiblos. pp. 111-127.

- Carranza, C., Lanchero, O., Miranda, D., Salazar, M.R. y Chaves, B.
2008. Modelo simple de simulación de distribución de masa seca
en brócoli (*Brassica* sp.) variedad Coronado y repollo (*Brassica
oleracea*) híbrido Delus cultivado en la Sabana de Bogotá.
Agronomía Colombiana, 26(1):23-31.
- Chaparro T., L.A., Farías A., A. Chaves C., B., Miranda L., D. y Flórez R.,
V.J. 2006. Análisis de crecimiento en rosa variedad 'Charlotte' en
los sistemas de cultivo en sustrato y en suelo. En: Flórez R., V.J.,
Fernández M., A. de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán
P., J.M. (Eds.). *Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana*.
Bogotá: Unibiblos. pp. 77-90.
- Clifton-Brown, J.C., Neilson, B., Lewandowski, I., and Jones, M.B. 2000.
The modelled productivity of *Miscanthus x giganteus* (GREEF et
DEU) in Ireland. *Industrial Crops and Products*, 12:97-109.
- Confalone, A.E. y Navarro D., M. 1999. Comparación de modelos de tiempo
térmico para maíz. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 7(2):207-211.
- Cooman, A. 2002. *Feasibility of protected tomato cropping in the high
altitude tropics using statistical and system dynamic models for plant
growth and development*. PhD. Thesis. Faculteit Landbouwkubdige,
Katholieke Universiteit Leuven. 255p.
- de Visser, C.L.M. 1994. ALCEPAS, an onion growth model based
on SUCROS87. I. Development of the model. *The Journal of
Horticultural Science and Biotechnology*, 69(3):501-518.
- de Visser, C.L.M., Schoneveld, J.A., and Zwart-Roodzant, M.H. 1995.
*Ontwikkeling van een gewasgroeimodel voor peen op basis van
SUCROS87*. PAGV, Lelystad. 124 p.
- dos Santos, M.A. e Paes de Camargo, M.B. 2006. Parametrização de modelo
agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas
condições do estado de São Paulo. *Bragantia*, 65(1):173-183.
- Dourado-Neto, D., Teruel, D.A., Reichardt, K., Nielsen, D.R., Frizzone, J.A.,
and Bacchi, O.O.S. 1998. Principles of crop modeling and simulation:
I. uses of mathematical models in agricultural science. *Scientia
Agricola*, 55:46-50.
- Farías A., A., Chaparro T., L.A., Campos R., A., Chaves C., B. y Flórez R.,
V.J. 2006. Curvas de crecimiento de rosa en sistemas de cultivo sin
suelo en la Sabana de Bogotá. En: Flórez R., V.J., Fernández M., A.
de la C., Miranda L., D., Chaves C., B. y Guzmán P., J.M. (Eds.).
Avances sobre fertirriego en la floricultura colombiana. Bogotá:
Unibiblos. pp. 91-110.
- Fleisher, D.H. and Timlin, D. 2006. Modeling expansion of individual leaves
in the potato canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139:84-93.

- Galindo P., J.R. 2006. *Desarrollo de un modelo explicativo de la productividad potencial del cultivo de arveja (Pisum sativum L.) var. Santa Isabel bajo condiciones de la Sabana de Bogotá*. Tesis doctoral, Facultad de Agronomía. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 159p.
- Gary, C., Jones, J.W., and Tchamitchian, M. 1998. Crop modelling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae*, 74:3-20.
- Gijzen, H., Heuvelink, E., Challa, H. Marcelis, L.F.M., Dayan, E., Cohen, S., and Fuchs, M. 1998. HORTISIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate. *Acta Horticulturae*, 456:441-450.
- Goudriaan, J. and van Laar, H.H. 1994. *Current issues in production ecology. Modelling potential growth processes*. Text book with exercises. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. pp. 69-93.
- Gutiérrez Colomer, R.P., González-Real, M.M., and Baille, A. 2006. Dry matter production and partitioning in rose (*Rosa hybrida*) flower shoots. *Scientia Horticulturae*, 107:284-291.
- Heuvelink, E. 1997. Effect of fruit load on dry matter partitioning in tomato. *Scientia Horticulturae*, 69:51-59.
- Jame, Y.W. and Cutforth, H.W. 1996. Crop growth models for decision support systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 76:9-19.
- Jenni, S., Cloutier, D.C., Bourgeois, G., and Stewart, K.A. 1996. A heat unit model to predict growth and development of muskmelon to anthesis of perfect flowers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(2):274-280.
- Jones, J.W., Mishoe, J.W., and Boote, K.J. 1987. *Introduction to simulation and modelling*. Technical Bulletin No. 100. Food and Fertilizer Technology Center. Gainesville: ASPAC. 19p.
- Jones, J.W. and Ritchie, J.T. 1990. Crop growth models. In: Hofman, G.J., Howell, T.A., and Solomon, K.H. (Eds.). *Management of farm irrigation systems*. Monograph No. 9. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers. pp. 63-69.
- Jones, J.W., Dayan, E., Allen, L.H., van Keulen, H., and Challa, H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE*, 34(2):663-672.
- Keating, B.A., Robertson, M.J., Muchow, R.C., and Huth, N.I. 1999. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, 61:253-271.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verbug, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., and Smith, C.J. 2003. An overview of APSIM, a

- model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18:267-288.
- Kool, M.T.N. and de Koning, J.C.M. 1996. Analysis of rose crop production. *Acta Horticulturae*, 424:79-85.
- Kooman, P.L and Jones, J.W. 1995. *Report on the theoretical studies with potential yield and shooting models for banana*. Work document. Florida University.
- Kooman, P.L. and Spitters, C.J.T. 1995. Coherent set of models to simulate potato growth. In: Kaba, P., Marshall, B., van den Broek, B.J., Vos, J., and van Keulen, H. (Eds.). *Modelling and parameterization of the soil-plant-atmosphere system. A comparison of potato growth models*. Wageningen: Wageningen Press. pp. 253-274.
- Kovács, G.J. 2005. Modelling of adaptation processes of crops to water and nitrogen stress. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30:209-216.
- Lentz, W. 1998. Model applications in horticulture: a review. *Scientia Horticulturae*, 74:151-174.
- Leutscher, K.J. and Vogelezang, J.V.M. 1990. A crop growth simulation model for operational management support in pot plant production. *Agricultural Systems*, 33(2):101-114.
- Lieth, J.H. and Pasion, C.C. 1991. A simulation model for the growth and development of flowering rose shoots. *Scientia Horticulturae*, 46(1-2):109-128.
- Lizaso, J.I., Batchelor, W.D., Boote, K.J., Westgate, M.E., Rochette, P., and Moreno-Sotomayor, A. 2005. Evaluating a leaf-level canopy assimilation model linked to CERES-Maize. *Agronomy Journal*, 97(3):734-740.
- López M., M.A., Chaves, B., Flórez R., V.J. y Salazar, M.R. 2010. Modelo de aparición de nudos en clavel (*Dianthus caryophyllus* L.) cv. Delphi cultivado en sustratos. *Agronomía Colombiana*, 28(1):47-54.
- Marcelis, L.F.M. and Gijzen, H. 1998. Evaluation under commercial conditions of a model of prediction of the yield and quality of cucumber fruits. *Scientia Horticulturae*, 76:171-181.
- Marcelis, L.F.M., Heuvelink, E., and Goudriaan, J. 1998. Modelling biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74:83-111.
- Meira, S. y Guevara, E. 2000. *Uso de modelos de simulación de cultivos como herramienta para la toma de decisiones en el cultivo de soja*. Buenos Aires: INTA. 6p.
- Monteith, J.L. 1996. The quest for balance in crop modelling. *Agronomy Journal*, 88:695-697.
- Montes, S., Herrera, E. y Aguirre, A. 2004. Fenología del cultivo del chile (*Capsicum annuum* L.). Primera Convención Mundial del Chile.

- NeSmith, S.D. 1997. Summer squash (*Cucurbita pepo* L.) leaf number as influenced by thermal time. *Scientia Horticulturae*, 68:219-225.
- Normand, F. and Léchaudel, M. 2006. Toward a better interpretation and use of thermal time models. *Acta Horticulturae*, 707:159-165.
- Penning de Vries, F.W.T., Jansen, D.M., Berger, H.F.M., and Bakema, A. 1989. *Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops*. Simulation monographs No. 29. Wageningen: Pudoc. 271p.
- Picini, A.G., Paes de Camargo, M.B., Ortolani, A.A., Fazuoli, L.C. e Gallo, P.B. 1999. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. *Bragantia*, 58(1):157-170.
- Paludo, S.P. 2008. *Desarrollo de un modelo fenológico de Lulo (Solanum quitoense Lam.). var. Septentrionale*. Tesis de maestría, Facultad de Agronomía. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 84p.
- Ranganathan, R., Chauhan, Y.S., Flower, D.J., Robertson, M.J., Sanetra, C., and Silim, S.N. 2001. Predicting growth and development of pigeonpea: leaf area development. *Field Crops Research*, 69:163-172.
- Riaño, N.M., Tangarife, G., Osorio, O.I., Giraldo, J.F., Ospina, C.M., Obando, D., Gómez, L.F. y Jaramillo, L.F. 2005. *Modelo de crecimiento y captura de carbono para especies forestales en el trópico* - CREFT. Manual técnico y guía del usuario. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), Corporación Nacional de Investigación Forestal (CONIF), Federación Nacional de Cafeteros de Colombia - Centro Nacional de Investigaciones de Café (FNC - CENICAFÉ). 51p.
- Ritchie, J.T. and NeSmith, S.D. 1991. Temperature of crop development. In: Hanks, J. and Ritchie, J.T. (Eds.). *Modeling plant and soil systems*. Madison: American Society of Agronomy. pp. 5-29.
- Robertson, M.J., Carberry, P.S., Huth, N.I., Turpin, J.E., Probert, M.E., Poulton, P.L., Bell, M., Wright, G.C., Yeates, S.J., and Brinsmead, R.B. 2002. Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(4):429-446.
- Ruiz, J., Flores, H., Ramírez, J., and González, D. 2002. Cardinal temperatures and length of maturation cycle of maize hybrid H-311 under rain fed conditions. *Agrociencia*, 36:569-577.
- Salazar G., M.R. 2006. *Un modelo simple de producción potencial de uchuva (Physalis peruviana L.)*. Tesis doctoral, Facultad de Agronomía. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 114p.
- Salazar, M.R., Jones, J.W., Chaves, B., and Cooman, A. 2008. A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Scientia Horticulturae*, 115:142-148.
- Schwartz, M.D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42(3):113-118.

- Soltani, N., Anderson, J.L., and Hamson, A.R. 1995. Growth analysis of watermelon plants grown with mulches and rowcovers. *American Society for Horticultural Science*, 120(6):1001-1009.
- Soltani, A., Hammer, G.L., Torabi, B., Robertson, M.J., and Zeinali, E. 2006. Modeling chickpea growth and development: Phenological development. *Field Crops Research*, 99:1-13.
- Spitters, C.J.T., van Keulen, H., and van Kraalingen, D.W.G. 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS 87. In: Rabbinge, R., Ward, A.S., and van Laar H.H. (Eds.). *Simulation and systems management in crop protection*. Simulation Monographs No. 32. Wageningen: Pudoc. pp.147-181.
- Steinmaus, S.J., Prather, T.S., and Holt, J.S. 2000. Estimation of base temperatures for nine weed species. *Journal of Experimental Botany*, 51(343):275-286.
- Tixer, P., Malezieux, E., and Dorel, M. 2004. SIMBA-POP: A cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological Modelling*, 180:407-417.
- Trudgill, D.L., Honek, A., Li, D., and van Straalen, N.M. 2005. Thermal time - Concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146:1-14.
- Tsubo, M., Walker, S., and Ogindo, H.O. 2005. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions I. Model development. *Field Crops Research*, 93:10-22.
- van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Kropff, M.J., Bastiaans, L., and Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18:201-234.
- Viator, R.P., Nuti, R.C., Edmisten, K.L., and Wells, R. 2005. Predicting cotton boll maturation period using degree days and other climatic factors. *Agronomy Journal*, 97:494-499.
- Whisler, F.D., Acock, B., Baker, D.N., Fye, R.E., Hodges, H.F., Lambert, J.R., Lemmon, H.E., McKinion, J.M., and Reddy, V.R. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, 40:141-208.
- Yang, S., Logan, J., and Coffey, D.L. 1995. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74:61-74.
- Yang, H.S., Dobermann, A., Lindquist, J.L., Walters, D.T., Arkebauer, T.J., and Cassman, K.G. 2004. Hybrid-maize-a maize simulation model that combines two crop modelling approaches. *Field Crops Research*, 87:131-154.
- Zacharias, A.O., Paes de Camargo, M.B. e Fazuoli, L.C. 2008. Modelo agrometeorológico de estimativa do início da florada plena do cafeeiro. *Bragantia*, 67(1):249-256.