

**MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL MANEJO DEL RIEGO Y
NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE (*Lycopersicon
esculentum* Mill.) EN INVERNADERO**

ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

TESIS

Presentado como requisito para
Obtener el grado de:

Doctor en Ciencias en Ingeniería de Sistemas de Producción



Universidad Autónoma Agraria

Antonio Narro

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre de 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL MANEJO DEL RIEGO Y NUTRICIÓN DEL CULTIVO
DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.) EN INVERNADERO

TESIS

ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

Que se Somete a Consideración del H. Jurado Examinador como
Requisito Parcial, para optar al grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
COMITÉ PARTICULAR


Asesor principal:


Dr. Adalberto Benavides Mendoza

Asesor:


Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:



Dr. Homero Ramírez Rodríguez

Asesor:


Dr. Karim de Alba Romenus

Asesor:


Dra. América Berenice Morales Díaz


Dr. Fernando Ruiz Zárate

Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Diciembre de 2013.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por el apoyo económico brindado mediante su programa de becas de posgrado.

A la UAAAN por permitirme realizar mis estudios en esta magnífica institución.

Al Dr. Adalberto Benavides Mendoza por darme todo su apoyo como mi director de tesis.

Al Dr. Karim de Alba Romenus por todo el apoyo recibido durante mis estudios.

A la Dra. América Morales Díaz por su asesoría.

Al Dr. Homero Ramírez Rodríguez por la asesoría recibida.

Al Dr. Alejandro Zermeño González por el apoyo y asesoría brindados.

Al Ing. Sergio Braham Zabag y al Departamento Forestal por las facilidades prestadas para realizar el trabajo experimental.

Al Laboratorio de Nutrición Animal y al TLQ Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel.

Al Departamento de Horticultura.

A los compañeros de posgrado.

A todas las personas que me ayudaron durante el transcurso de mis estudios.

DEDICATORIA

A mis padres por enseñarme a vivir.

A Adriana por todo el apoyo que me ha dado y por todo lo que hemos compartido.

A mis hermanos por ser parte importante en mi vida.

RESUMEN

MODELOS MATEMÁTICOS PARA EL MANEJO DEL RIEGO Y NUTRICIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.) EN INVERNADERO

POR

ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

**DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DICIEMBRE 2013

Dr. Adalberto Benavides Mendoza –Asesor–

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum*, ecuaciones de regresión, evapotranspiración, transpiración, manejo nutricional, modelación matemática, simulación.

El tomate es la hortaliza más importante a nivel mundial, en México este cultivo es de gran importancia ya que el 70% de la superficie cultivada que se produce bajo condiciones protegidas corresponde al tomate. Es importante realizar un manejo eficiente en la agricultura intensiva para lo que se requieren conocer los factores que condicionan el potencial de producción de los cultivos. El uso del agua

por los cultivos es el factor de mayor importancia para determinar el rendimiento, la nutrición mineral es el segundo factor más importante. Es conveniente utilizar técnicas como la modelación matemática, que permitan diseñar estrategias para un manejo eficiente del agua y nutrientes en el cultivo de tomate.

Se desarrollaron dos ciclos de cultivo de tomate durante los años 2011 y 2012 con el fin de generar la información necesaria para calibrar y validar un modelo dinámico de crecimiento. Se eliminaron cuatro plantas por semana en las que se determinó el peso fresco y seco de los diferentes órganos. Con el fin de conocer la relación que existe entre los diferentes órganos de la planta de tomate se realizaron análisis de correlación y de regresión entre éstos. Con los datos obtenidos se generaron curvas de crecimiento de las diferentes estructuras de la planta. También se midieron los consumos diarios de agua por las plantas para determinar la evapotranspiración y transpiración. Usando regresión múltiple se ajustaron ecuaciones para estimar la evapotranspiración y la transpiración diaria. Mediante instrumentación se midieron las variables climáticas. Así mismo, durante el desarrollo del cultivo se realizaron análisis minerales para determinar el contenido de N, P, K, Ca, Mg y S en los diferentes órganos de la planta. Con esta información se generaron ecuaciones de regresión para imitar el contenido de los minerales en las plantas, además de que los modelos de regresión se incluyeron en el modelo dinámico con el fin de simular dinámicamente los cambios en la concentración de los minerales a través del tiempo.

Se encontró que el cultivo de tomate presentó una etapa de crecimiento exponencial a partir del trasplante y hasta la floración; y otra etapa de crecimiento lineal a partir de floración. Se demostró que existe una fuerte correlación entre los

pesos frescos y secos de los diferentes órganos de la planta ($P \leq 0.01$), y en las diferentes etapas de crecimiento ($P \leq 0.01$).

En cuanto al consumo de agua por las plantas de tomate, se generaron ecuaciones de regresión las cuales presentaron valores del índice R^2 ajustado mayores a 0.90 tanto para estimar la transpiración como para estimar la evapotranspiración.

Respecto a la modelación del crecimiento de tomate, los resultados mostraron que el modelo de crecimiento simula adecuadamente las salidas peso de hojas y peso de frutos ($EF > 0.95$ e $Index > 0.95$), para las salidas hojas cosechadas y frutos cosechados la simulación fue menos precisa ($EF < 0.90$ e $Index < 0.90$). Por su parte, la simulación de la concentración de los minerales fue adecuada para N, P, K, y S ya que tanto el EF como el $index$ presentaron valores superiores a 0.95. En el caso del Ca y Mg las simulaciones de la concentración de estos presentaron valores del EF de 0.75 y 0.89 respectivamente.

La información presentada en este trabajo es útil para el manejo del riego y la nutrición como factores más importantes del cultivo de tomate en invernadero. Con los modelos de regresión múltiple obtenidos es posible estimar las necesidades hídricas de las plantas de tomate bajo condiciones de invernadero a partir de variables sencillas de obtener. La modelación dinámica del crecimiento de tomate y del comportamiento de los minerales de mayor concentración es útil para la planificación del manejo del cultivo así como para diseñar estrategias más adecuadas para la nutrición del mismo.

ABSTRACT

MATHEMATICAL MODELS TO DETERMINE IRRIGATION SCHEDULING AND NUTRITION REQUIREMENTS OF GREENHOUSE TOMATO CROP (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

By

ANTONIO JUÁREZ MALDONADO

DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. DECEMBER 2013.

Dr. Adalberto Benavides Mendoza –*Adviser*–

Keywords: *Lycopersicon esculentum*, regression equations, evapotranspiration, transpiration, nutritional management, mathematical modelling, simulation.

The tomato is the most important vegetable worldwide. In Mexico, 70% of the cultivated area under protected conditions corresponds to tomato crop. It is important to have an effective management in intensive agriculture. In order to do so, it is important to understand the factors that determine the production potential of crops. Water use is the most important factor in determining the performance, the second

one is mineral nutrition. It is convenient to use techniques such as mathematical modeling, in order to design strategies that allow for efficient management of water and nutrients in the tomato crop.

Two crop cycles of tomato were developed during the years 2011 and 2012 in order to generate the information needed to calibrate and validate a dynamic growth model. Four plants per week were removed to determine fresh and dry weights of different tomato organs. In order to know the relationship between the different organs of tomato plant correlation analysis and regression were performed between them. The obtained data was used to generate different growth curves for plant structures. The daily water consumption was also measured to determine evapotranspiration and transpiration. Multiple regression equations were fitted to estimate daily evapotranspiration and transpiration. Through instrumentation, several climatic variables were measured. Mineral analyzes were performed during crop development to determine the contents of N, P, K, Ca, Mg and S in the various organs of the plant. With this information, regression equations were generated to mimic the mineral content in plants. Regression models were included in the dynamic model in order to dynamically simulate changes in mineral concentration over time.

It was found that the tomato crop provided an exponential growth phase from transplanting until flowering, and a linear growth phase after flowering. It was shown that a strong correlation exists between the fresh and dry weights of different plant organs ($P \leq 0.01$), and at different stages of growth ($P \leq 0.01$).

Regarding water consumption by tomato plants, regression equations were generated and they presented adjusted R^2 index values greater than 0.90 for both estimated transpiration to estimated evapotranspiration.

Regarding the modeling of tomato growth, the results showed that the model adequately simulates weight of leaves and fruit weight ($EF > 0.95$ and $Index > 0.95$). On the other hand, output for harvested leaves and harvested fruits, the simulation was less accurate ($EF < 0.90$ and $Index < 0.90$). Meanwhile, the simulation of the concentration of minerals was adequate for S, N, P, K, since both the EF index and the *index* showed values higher than 0.95. Simulation of Ca and Mg concentration showed EF values of 0.75 and 0.89 respectively.

Information presented in this work is useful for irrigation management and nutrition, both considered as major factors in greenhouse tomato crop. Using the obtained multiple regression models is possible to estimate water needs of tomato plants under greenhouse conditions from simple variables. The dynamic modeling of tomato growth and mineral concentration is used for crop management planning and to design more suitable nutrition strategies.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	v
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	5
1.1.1 Objetivo General.....	5
1.1.2 Objetivos Particulares.....	5
1.2 HIPOTESIS.....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1 La producción de cultivos en invernadero.....	7
2.1.1 Impacto ambiental de la producción intensiva.....	8
2.2 La producción de tomate (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.).....	9
2.2.1 El riego y la fertilización del tomate.....	10
2.3 Modelos Matemáticos.....	14

2.3.1 Modelos Matemáticos en la Horticultura.....	16
2.3.2 Modelos Sobre Tomate.....	18
2.3.3 Modelos Sobre Pimiento.....	20
2.3.4 Modelos Sobre Pepino.....	21
2.3.5 Modelos Sobre Lechuga.....	22
2.3.6 Otros Modelos.....	23
2.3.7 Análisis de Sensibilidad de Modelos.....	24
2.3.8 Calibración y Validación de Modelos.....	25
III. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO.....	27
IV. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO USANDO MODELOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE.....	48
V. MODELACIÓN DINÁMICA DEL CONTENIDO DE MINERALES EN TOMATE DE INVERNADERO.....	74
VI. CONCLUSIONES GENERALES.....	105
VII. LITERATURA CITADA.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

III. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO

Tabla 1. Correlación entre pesos frescos y secos de las diferentes partes de la planta de tomate.....	36
Tabla 2. Tendencias de crecimiento en base a peso fresco y ecuaciones de regresión para los diferentes órganos de la planta de tomate.....	37
Tabla 3. Matriz de correlaciones entre las diferentes variables de crecimiento evaluadas correspondientes a los pesos frescos del cultivo de tomate.....	40
Tabla 4. Matriz de correlaciones entre las diferentes variables de crecimiento evaluadas correspondientes a los pesos secos del cultivo de tomate.....	42
Tabla 5. Matriz de correlaciones entre las diferentes variables de crecimiento evaluadas durante el ciclo 2012 correspondientes a los pesos secos y frescos del cultivo de tomate considerando 21 semanas.....	43

IV. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO USANDO MODELOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

Tabla 1. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la evapotranspiración del tomate durante el ciclo 2011.....	64
Tabla 2. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la transpiración del tomate durante el ciclo 2011.....	65
Tabla 3. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la evapotranspiración del tomate durante el ciclo 2012.....	66
Tabla 4. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la transpiración del tomate durante el ciclo 2012.....	67
V. MODELACIÓN DINÁMICA DEL CONTENIDO DE MINERALES EN TOMATE DE INVERNADERO	
Tabla 1. Relación de los índices usados para evaluar la eficiencia de simulación del modelo dinámico para las diferentes salidas en el proceso de calibración.....	86
Tabla 2. Descripción de los parámetros del modelo, valor nominal y valor calibrado.....	87
Tabla 3. Relación de los índices usados para evaluar la eficiencia de simulación del modelo dinámico para las diferentes salidas en el proceso de validación.....	90
Tabla 4. Ecuaciones de regresión para la estimación del contenido de minerales en el tomate.....	93
Tabla 5. Relación de los índices usados para evaluar la eficiencia de simulación del modelo dinámico para los minerales.....	95
Tabla 6. Cantidad de veces que se aplicaron los minerales de mayor concentración respecto al medido en las plantas de tomate durante los dos ciclos de cultivo evaluados.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

III. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO

Figura 1. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos frescos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2011..... 32

Figura 2. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos secos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2011..... 33

Figura 3. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos frescos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2012..... 34

Figura 4. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos secos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2012..... 35

IV. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO USANDO MODELOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

Figura 1. Comparación entre la evapotranspiración real vs evapotranspiración estimada por los modelos correspondientes al ciclo 2011..... 68

Figura 2. Comparación entre la transpiración real vs transpiración estimada por los modelos correspondientes al ciclo 2011..... 69

Figura 3. Comparación entre la evapotranspiración real vs evapotranspiración estimada por los modelos correspondientes al ciclo 2012.....	70
Figura 4. Comparación entre la transpiración real vs transpiración estimada por los modelos correspondientes al ciclo 2012.....	71
Figura 5. Comparaciones para el proceso de validación de los modelos obtenidos del ciclo 2011.....	72
Figura 6. Comparaciones para el proceso de validación de los modelos obtenidos del ciclo 2012.....	73
V. MODELACIÓN DINÁMICA DEL CONTENIDO DE MINERALES EN TOMATE DE INVERNADERO	
Figura 1. Diagrama de bloques de los modelos de crecimiento y contenido de minerales de tomate.....	85
Figura 2. Gráficas de calibración de las salidas del modelo. Se comparan los datos reales obtenidos del ciclo 2011 vs los datos simulados.....	89
Figura 3. Gráficas de validación de las salidas del modelo. Se comparan los datos reales obtenidos del ciclo 2012 vs los datos simulados.....	92
Figura 4. Gráficas de calibración de los contenidos de minerales en el tomate...	97
Figura 5. Gráficas de validación de los contenidos de minerales en el tomate....	98

I. INTRODUCCIÓN

En la producción de cultivos en invernaderos se establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima interno óptimo para el crecimiento de los cultivos que permite protegerlo de condiciones adversas (Martínez-Ruiz *et al.*, 2012). Lo anterior se consigue controlando factores como la temperatura, radiación, concentración de CO₂, humedad relativa, etc. En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado rápidamente en los últimos años, los datos más recientes muestran que en 2012 se tenían a 12 000 has de invernaderos, esto sin incluir otras 8000 has que corresponden a malla sombra y macrotúnel (SAGARPA, 2012).

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es el cultivo hortícola más importante del mundo, éste se usa tanto en fresco como producto procesado (Gad y Hassan, 2013; Mehdizadeh *et al.*, 2013; Sepat *et al.*, 2012; Shalaby y El-Banna, 2013). En área producida el tomate es el segundo lugar después de la papa, pero ocupa el primer lugar como cultivo procesado (Mehdizadeh *et al.*, 2013). En los últimos años, su producción mundial se ha incrementado en aproximadamente 10% debido a que para muchos países es una fuente significativa de vitaminas y minerales (Shalaby y El-Banna, 2013). En México, entre los principales cultivos que se

producen en condiciones protegidas, el tomate ocupa el 70%, seguido por pimiento (16%) y pepino (10%) (SAGARPA, 2012). Aunado a esto, México es el principal exportador de tomate a nivel internacional, enviando el producto a Estados Unidos, Canadá y El Salvador; tan sólo en 2011 se produjeron 1872000 toneladas (MEXICOPRODUCE, 2012).

Para propiciar la máxima expresión del potencial productivo del tomate, es importante generar y aplicar prácticas de manejo del cultivo tendientes a aprovechar al máximo los insumos proporcionados (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013). En este sentido y por su relevancia, la disponibilidad del agua está considerada como el factor de producción más importante (Flores *et al.*, 2007, Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013) seguido por la nutrición mineral del cultivo (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013). Un adecuado manejo del agua de riego es fundamental en el rendimiento del cultivo (Flores *et al.*, 2007). Aunque existen técnicas exitosas como el fertirriego, aún hay problemas con la dosificación de fertilizantes que deben aplicarse (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002), ya que pocas veces se sigue un adecuado plan de fertilización acorde a las necesidades reales de consumo de nutrientes del cultivo a lo largo de su ciclo de producción (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013). Entonces, prácticas como la fertilización y el riego deben ser definidas en función de las características propias de crecimiento del cultivo de interés (Fynn *et al.*, 1989; Enriquez-Reyes *et al.*, 2003), para lo que se ha propuesto usar la acumulación de materia seca para cuantificar la demanda nutrimental (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002).

Considerando el actual escenario mundial que enfatiza la necesidad de adoptar prácticas agrícolas amigables con el medio ambiente para la producción sustentable de alimentos (Mehdizadeh *et al.*, 2013), se deben tomar en cuenta cuestiones como el impacto que tiene el uso excesivo de fertilizantes minerales (Basheer y Agrawal, 2013; Sepat *et al.*, 2012), así como el hecho del incremento en el costo de estos y su disponibilidad en el futuro (Basheer y Agrawal, 2013; Gad y Hassan, 2013; Mehdizadeh *et al.*, 2013).

Los avances tecnológicos brindan técnicas novedosas como la simulación de cultivos bajo invernadero. Un modelo de simulación de crecimiento de un cultivo es la aplicación de análisis sistemáticos y de tecnología computacional, la cual integra a investigadores de diferentes disciplinas como la fisiología del cultivo, ecología, agrometeorología y agricultura (Zhang y Wang, 2011). Así, los modelos matemáticos son una herramienta que nos permite mejorar el conocimiento actual sobre un sistema (Marcelis *et al.*, 2006). En la agronomía, y en particular en la horticultura, dichos modelos tienen aplicaciones como la predicción del rendimiento y manejo del cultivo, sistemas de apoyo para la toma de decisiones, control climático del invernadero, ambiente de la raíz, etc. (Marcelis *et al.*, 2006). Los modelos de cultivos proporcionan información cuantitativa a partir de la cual decisiones tales como la calendarización de fechas de siembra, riegos, fertilización, protección del cultivo, control del clima, etc., pueden ser tomadas a nivel de campo (Gary, 1999). En la producción de hortalizas en ambientes protegidos los modelos son necesarios para optimizar la producción (Marcelis *et al.*, 2006). Aunque existen diversos estudios que involucran la modelación del crecimiento de tomate bajo invernadero (De Gelder *et*

al., 2005; Marcelis *et al.*, 2009), estos modelos no consideran las relaciones nutricionales para el manejo eficiente de la nutrición mineral de este cultivo, o se basan en las variaciones de la concentración de los minerales en la solución nutritiva recirculante o en el drenaje (Massa *et al.*, 2011).

En cuanto al riego, existen diferentes estudios para determinar las necesidades hídricas del tomate en invernadero, algunos de ellos basados en métodos como el de Prietsley-Taylor el cual es una versión simplificada de la combinación del método aerodinámico y el de balance de energía con la particularidad de usarse para grandes superficies de evaporación (Valdés-Gómez *et al.*, 2009), Penman-Monteith (Rojas *et al.*, 2003; Harmanto *et al.*, 2005), o bien en metodologías fundamentadas en balances de energía (Boulard y Wang, 2000). Dichos métodos, sin embargo, requieren de equipos sofisticados para obtener las variables necesarias para su operación. En otros estudios se determinaron los requerimientos diarios de agua mediante lisímetros de drenaje, incluso considerando las diferentes etapas fenológicas del tomate (Flores *et al.*, 2007). También se han utilizado modelos basados en mediciones del diámetro de tallo con el uso de dendrómetros para generar predicciones de transpiración (Lee y Shin, 1998), este último si bien efectivo, resultó difícil de implementar por las características de crecimiento del tallo de tomate. Por otra parte, Baptista *et al.* (2005) utilizaron lisímetros para medir la evapotranspiración y transpiración del tomate, con esos datos obtuvieron modelos de regresión para los que solamente utilizaron la radiación solar y el déficit de presión de vapor. Los modelos fueron efectivos pero los autores recomendaron incluir otras variables de influencia debido a que estos se aplican sólo a las condiciones del estudio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

- Desarrollar técnicas de modelación matemática que nos permitan definir el consumo del agua y nutrientes necesarios para el crecimiento del cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero.

1.1.2 Objetivos Particulares

- Realizar un análisis de crecimiento del cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero para obtener la información necesaria para la calibración y validación de un modelo dinámico de crecimiento de tomate.
- Realizar un análisis del consumo hídrico diario de las plantas de tomate para crear modelos de regresión de los procesos de transpiración y evapotranspiración por el cultivo de tomate.
- Determinar el contenido de los minerales de mayor concentración a través del tiempo y en los diferentes órganos de la planta, y a partir de esta información crear modelos de regresión para incorporarlos en el modelo dinámico de crecimiento.

1.2 HIPOTESIS

- Es posible desarrollar modelos matemáticos que permitan definir con mucha precisión (>90%) el consumo de agua y nutrientes por las plantas de tomate desarrolladas bajo condiciones de invernadero.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La producción de cultivos en invernadero

La producción de cultivos en invernaderos es de suma importancia ya que nos da una ventaja sobre la producción a cielo abierto, dado que se establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima interno óptimo para el crecimiento de los cultivos que permite protegerlo de condiciones adversas (Martínez-Ruiz *et al.*, 2012) y controlar factores como la temperatura, radiación, concentración de CO₂, humedad relativa, etc.

En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado rápidamente en los últimos años. En 1999 se estimó una superficie de sólo 721 has, la cual aumentó a 3,200 has en 2005 (Ocaña-Romo, 2008). Para el año 2009 la superficie estimada fue de alrededor de 10,000 has (Perea, 2009).

Los datos más recientes muestran que en 2012 se llegó a 12,000 has de invernaderos, esto sin incluir otras 8,000 has que corresponden a malla sombra y macrotúnel (SAGARPA, 2012).

En México, existen pocas investigaciones sobre transpiración de cultivos en invernadero y se han realizado aún menos en los invernaderos ubicados en zonas

áridas o semiáridas (Rivera *et al.*, 2013). Además, de que uno de los problemas que más frecuentemente se presenta en la producción de invernaderos es el desconocimiento preciso del consumo de agua por el cultivo, lo que genera no tener un buen manejo del riego (Martínez-Ruiz *et al.*, 2012) y en consecuencia de la aplicación de fertilizantes. Considerando que la fertilización es un factor de manejo con alto impacto económico, no debieran ser aceptables desbalances nutricionales en la industria de producción en invernaderos tecnificados (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013).

2.1.1 Impacto ambiental de la producción intensiva

El actual escenario mundial enfatiza la necesidad de adoptar prácticas agrícolas amigables con el medio ambiente para la producción sustentable de alimentos (Mehdizadeh *et al.*, 2013), entonces, deben tomarse en cuenta cuestiones como el impacto que tiene el uso excesivo de fertilizantes minerales (Basheer y Agrawal, 2013; Sepat *et al.*, 2012), así como el hecho del incremento en el costo de éstos y su disponibilidad en el futuro (Basheer y Agrawal, 2013; Gad y Hassan, 2013; Mehdizadeh *et al.*, 2013). Además, se sabe que la propia manufactura de estos fertilizantes sintéticos genera una contaminación ambiental adicional (Basheer y Agrawal, 2013). Aunado a esto se sabe que algunos factores del suelo afectan la disponibilidad de los fertilizantes minerales, lo que resulta en pérdidas por fijación o lixiviación, volatilización en suelos con estructura pobre y condiciones de inundación (Gad y Hassan, 2013).

El cultivo de tomate en particular es atacado por un gran número de plagas, y dado que el control químico es el medio más común, gran cantidad de insecticidas

químicos son aplicados los cuales generan residuos tóxicos (Shah *et al.*, 2013). Además, los problemas asociados con el uso de químicos riesgosos para la protección del cultivo, control de malezas y fertilidad del suelo están recibiendo atención creciente alrededor del mundo debido a que las plagas, enfermedades y malezas se están volviendo resistentes a los pesticidas químicos, con el consecuente riesgo de ocurrir contaminación ambiental y desbalances ecológicos (Mehdizadeh *et al.*, 2013).

En cuanto a los fertilizantes químicos, se sabe que su uso excesivo afecta adversamente el medio ambiente del suelo, llevando a la disminución de la productividad del cultivo y la producción de alimentos potencialmente nocivos y peligrosos para el consumo humano (Chaturvedi y Kumar, 2012).

2.2 La producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

El tomate silvestre es nativo del oeste de Sudamérica y se distribuye desde Ecuador hasta el norte de Chile, y cuenta con dos especies endémicas en las islas Galápagos. Esta especie es una de las más investigadas tanto en estudios genéticos como genómicos (Hazra *et al.*, 2013).

El tomate es el cultivo hortícola más importante del mundo. Éste se usa tanto en fresco como producto procesado (Chatterjee *et al.*, 2013; Gad y Hassan, 2013; Mehdizadeh *et al.*, 2013; Sepat *et al.*, 2012; Shalaby y El-Banna, 2013). Este fruto es uno de los vegetales más consumidos y cultivados casi en cualquier lugar del mundo (Chatterjee *et al.*, 2013; Hazra *et al.*, 2013). En términos del área producida el tomate ocupa el segundo lugar después de la papa, sin embargo, como cultivo procesado

tiene el primer lugar (Mehdizadeh *et al.*, 2013). Este cultivo ha ganado importancia económica desde los inicios del siglo 21 (Hazra *et al.*, 2013). En este sentido, el valor nutricional y la calidad del fruto son los factores dominantes para la aceptación por el consumidor (Chatterjee *et al.*, 2013). En los últimos años, su producción mundial se ha incrementado en aproximadamente 10% debido a que para muchos países es una fuente significativa de vitaminas y minerales (Shalaby y El-Banna, 2013).

La producción de tomate es considerada una actividad de alto riesgo debido a la gran variedad de ambientes y sistemas en los que se desarrolla, la alta susceptibilidad a enfermedades y plagas así como la gran demanda de insumos y servicios, lo cual lleva a una fuerte inversión económica por unidad de superficie (Monte *et al.*, 2013).

En México, de los principales cultivos que se producen en condiciones protegidas, el tomate ocupa el 70%, seguido por pimiento (16%) y pepino (10%) (SAGARPA, 2012). Aunado a esto, México es el principal exportador a nivel internacional, enviando el producto a Estados Unidos, Canadá y El Salvador, tan sólo en 2011 se produjeron 1872000 toneladas (MEXICOPRODUCE, 2012).

2.2.1 El riego y la fertilización del tomate

Para propiciar la máxima expresión del potencial productivo del tomate, es importante generar y aplicar prácticas de manejo del cultivo tendientes a aprovechar al máximo los insumos proporcionados (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013). En este sentido y por su relevancia, a la disponibilidad del agua se le considera como el factor de producción más importante (Flores *et al.*, 2007, Quesada-Roldán y Bertsh-

Hernández, 2013) seguido por la nutrición mineral del cultivo (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013).

Se sabe que la calidad de los frutos de tomate están influenciados principalmente por el genotipo, pero también el estatus nutrimental del suelo juega un papel significativo, así, la aplicación de cantidades balanceadas de nutrientes en forma de fertilizantes inorgánicos y orgánicos pueden favorecer su producción y calidad (Chatterjee *et al.*, 2013).

El manejo de la nutrición de las plantas es un aspecto crucial desde el punto de vista fisiológico y económico, pues en la producción agrícola bajo condiciones protegidas aprovechar al máximo toda la expresión del potencial genético es mandatorio. Además se sabe que la absorción de nutrientes en el cultivo del tomate oscila entre rangos muy amplios, ya que depende de las condiciones agroecológicas del sistema de producción, del manejo de la plantación y de las características propias de la variedad seleccionada (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013). Por ejemplo, el nitrógeno tiene un efecto pronunciado sobre el crecimiento y desarrollo del tomate, promueve tanto el crecimiento vegetativo como reproductivo e impacta en características como el color verde de las hojas (Oyinlola y Jinadu, 2012). Entonces la aplicación óptima de fertilizantes nitrogenados al suelo genera alta producción de tomate y mejora la calidad del fruto, pero la excesiva aplicación lleva a un desarrollo excesivo de las partes vegetativas de la planta a expensas del crecimiento reproductivo (Oyinlola y Jinadu, 2012).

El riego es responsable del agua disponible en la zona radical (Blanco y Folegatti, 2003), por lo que la correcta aplicación de éste determina el rendimiento del cultivo (Flores *et al.*, 2007). La práctica de riego entonces debe ajustarse en función del crecimiento y de las demandas de evapotranspiración del cultivo de interés (Fynn *et al.*, 1989; Enriquez-Reyes *et al.*, 2003) para evitar periodos de déficit o superávit de humedad que afecten negativamente la productividad del cultivo y el uso eficiente tanto de agua como de los fertilizantes (Flores *et al.*, 2007). La evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua se transfiere del suelo y/o la capa vegetal a la atmósfera. La transpiración (TR) por su parte, es el flujo de agua de la capa vegetal hacia la atmósfera (Alkaeed *et al.*, 2007; Verstraeten *et al.*, 2008), siendo un proceso fisiológico que utiliza casi toda el agua absorbida por las plantas (Rivera *et al.*, 2013). En zonas áridas o semiáridas la transpiración, siendo el mecanismo más importante de disipación de energía y determinante de las condiciones térmicas del cultivo, puede cobrar una mayor relevancia (Rivera *et al.*, 2013). El conocimiento de dichos procesos es fundamental para el manejo de agua, permitiendo el adecuado suministro del agua de riego o la calendarización del mismo (Stöckle *et al.*, 2004; Alkaeed *et al.*, 2007; Verstraeten *et al.*, 2008).

En la producción en hidroponía, debido a la poca capacidad de retención de agua de los sustratos empleados, se requiere tener una buena predicción de la transpiración del cultivo en periodos cortos (Rivera *et al.*, 2013).

Aunque existen técnicas exitosas como el fertirriego, aún hay problemas con la dosificación de fertilizantes que deben aplicarse (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002), ya que pocas veces se sigue un adecuado plan de fertilización que sea acorde a las

necesidades reales de consumo de nutrientes del cultivo a lo largo de su ciclo de producción (Quesada-Roldán y Bertsh-Hernández, 2013). Entonces, prácticas como la fertilización y el riego deben ser definidas en función de las características propias de crecimiento del cultivo de interés (Fynn *et al.*, 1989; Enriquez-Reyes *et al.*, 2003), para lo que se ha propuesto usar la acumulación de materia seca para cuantificar la demanda nutrimental (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002).

En cuanto al riego, existen diferentes estudios para determinar las necesidades hídricas para el tomate en invernadero, algunos de ellos basados en métodos como el de Prietsley-Taylor el cual es una versión simplificada de la combinación del método aerodinámico y el de balance de energía con la particularidad de usarse para grandes superficies de evaporación (Valdés-Gómez *et al.*, 2009), Penman-Monteith (Rojas *et al.*, 2003; Harmanto *et al.*, 2005), o bien en metodologías fundamentadas en balances de energía (Boulard y Wang, 2000). Dichos métodos, sin embargo, requieren de equipos sofisticados para obtener las variables necesarias para su operación. En otros estudios se determinaron los requerimientos diarios de agua mediante lisímetros de drenaje, incluso considerando las diferentes etapas fenológicas del tomate (Flores *et al.*, 2007). También se han utilizado modelos basados en mediciones del diámetro de tallo para generar predicciones de transpiración (Lee y Shin, 1998), este último si bien efectivo, resultó dificultoso de implementar. Baptista *et al.* (2005) utilizaron lisímetros para medir la evapotranspiración y transpiración del tomate, con esos datos obtuvieron modelos de regresión para los que utilizaron solamente la radiación solar y el déficit de presión de vapor. Los modelos fueron efectivos pero los autores

recomiendan incluir otras variables de influencia debido a que estos se aplican sólo a las condiciones del estudio.

2.3 Modelos matemáticos

Los avances tecnológicos brindan técnicas novedosas como la simulación de cultivos bajo invernadero. Un modelo de simulación de crecimiento de un cultivo es la aplicación de análisis sistemáticos y tecnología computacional, la cual integra a investigadores de diferentes disciplinas como la fisiología del cultivo, ecología, agrometeorología y agricultura (Zhang y Wang, 2011).

Los modelos matemáticos son herramientas poderosas para poner a prueba las hipótesis, para sintetizar los conocimientos, para describir y comprender los sistemas complejos y para comparar diferentes escenarios (Marcelis *et al.*, 2006). Los modelos en la agricultura son un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan las reacciones que ocurren dentro de la planta así como las interacciones entre la planta y su ambiente (Cheeroo-Nayamuth, 1999). Por lo tanto, los modelos de crecimiento y desarrollo son herramientas que sirven para obtener información básica de la planta y sus interacciones con el ambiente, lo cual permite maximizar el uso de los recursos en invernadero, y así mismo facilita un mejor manejo del cultivo (Lopes *et al.*, 2004). Estos modelos pueden ser utilizados como sistemas de apoyo en la toma de decisiones, en el control climático del invernadero y en la predicción y planificación de la producción (Marcelis *et al.*, 2006). La modelación puede facilitar la integración de conocimiento de diferentes campos, tales como la fisiología del cultivo, física del

medio ambiente y entomología, útil para proporcionar herramientas para la investigación y aplicación en el control y toma de decisiones (Jones, 1998).

Generalmente, los modelos matemáticos se dividen en tres tipos: modelos empíricos, modelos mecanicistas o mecanísticos y modelos teleonómicos. Los modelos empíricos son descripciones directas de datos y proporcionan relaciones observables entre las variables de un sistema o fenómeno, sin proporcionar alguna explicación de los mecanismos subyacentes. Estos modelos son un poderoso medio para describir y resumir los datos. Ejemplos de ellos son los modelos de regresión simple y múltiple, las redes neuronales, los modelos difusos, entre otros. Los modelos teleonómicos son aplicables a comportamientos dirigidos por objetivos y se formulan en términos de metas. Los modelos explicativos o mecanicistas son modelos determinísticos. Normalmente, un modelo mecanicista es definido mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales describen el comportamiento de las variables de estado del sistema, aquellas variables que representan las propiedades relevantes o atributos del sistema considerado. Los modelos explicativos son más apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionan así una descripción cuantitativa y una explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema biológico. Este enfoque se ha aplicado exitosamente durante los últimos años en la modelación de procesos de crecimiento de cultivos (Thornley y Johnson, 2000).

El desarrollo de un modelo matemático mecanicista requiere de suficiente comprensión de los procesos biológicos, fisiológicos, químicos y físicos de un

sistema biológico. Por lo que el uso de un modelo mecanicista demanda análisis, calibración y validación adecuados (López-Cruz *et al.*, 2005).

Según López-Cruz (2003); López-Cruz *et al.* (2005), un modelo de crecimiento de un cultivo bajo condiciones de invernadero se define mediante una ecuación diferencial no-lineal de la siguiente forma:

$$\dot{x} = f(x, u, p), \quad x(t_0) = \beta$$

Donde $x \in R^n$, $u \in R^m$, $p \in R^q$ y $\beta \in R^n$.

El vector de estados (x) contiene las variables que caracterizan el cultivo como peso seco, número de frutos, área foliar, etc., el vector de las entradas (u) contiene variables tales como temperatura, CO₂ y radiación fotosintéticamente activa. El vector (p) representa los parámetros o constantes físicas del modelo. El conjunto de ecuaciones dinámicas está definido por ecuaciones ordinarias de primer grado. Dado que f es un vector de funciones no-lineales, el modelo de crecimiento no tiene solución analítica y debe ser resuelto mediante integración numérica o simulación digital.

2.3.1 Modelos matemáticos en la horticultura

En la agronomía, y en particular en la horticultura, estos modelos de cultivos tienen aplicaciones como la predicción del rendimiento y manejo del cultivo, sistemas de apoyo para la toma de decisiones, control climático del invernadero, ambiente de la raíz, etc. (Marcelis *et al.*, 2006). Los modelos de cultivos proporcionan información cuantitativa a partir de la cual decisiones tales como la calendarización

de las fechas de siembra de cultivos, riegos, fertilización, protección del cultivo, control del clima, etc., pueden ser tomadas a nivel de campo (Gary, 1999).

En la práctica de la horticultura, los modelos matemáticos permiten evaluar estrategias sobre el posible manejo de cultivos en invernadero, sin la necesidad de realizar experimentos costosos. En la producción de hortalizas en ambientes protegidos los modelos son necesarios para optimizar la producción (Marcelis *et al.*, 2006). Por ejemplo, para tratar de controlar el clima de un invernadero o el ambiente de la raíz del cultivo se requieren modelos matemáticos de ambos procesos (Gary, 1999).

A partir de los 80's, la modelación de cultivos se ha convertido en una importante herramienta de investigación en la horticultura, así como en otras áreas de la producción vegetal; una de las razones es la versatilidad de esta técnica. La horticultura es un ámbito en el que la predicción del rendimiento, evaluación de políticas, o la optimización de los procesos pueden ser muy importantes; ésta se caracteriza por una gran cantidad de sistemas de cultivo, así como gran diversidad de especies frutales, hortalizas y ornamentales (Gary *et al.*, 1998).

Los modelos de hortalizas más estudiados han tenido el objetivo no solo de sintetizar el conocimiento del sistema e incrementarlo, sino mediante una simplificación del modelo original se han aplicado los modelos en estudios de control óptimo de la producción en invernaderos. Sin embargo se requieren modelos más simples para que sea posible no solamente una solución analítica de un problema de

optimización dinámica, sino que además se obtenga una solución numérica en un tiempo razonable de computación (López-Cruz *et al.*, 2005).

Algunas aplicaciones para los modelos de crecimiento de hortalizas en invernadero son: investigación científica, educación y manejo de cultivos. Es en la educación e investigación en donde estos modelos han tenido el mayor impacto de aplicación, mientras que en la toma de decisiones se espera mayor desarrollo, conocimiento y confianza de los usuarios para que sean ampliamente utilizados (López-Cruz *et al.*, 2005).

2.3.2 Modelos sobre tomate

En lo que se refiere al cultivo de tomate se han desarrollado varios modelos de crecimiento a lo largo de los años, que van desde algunos muy simples hasta muy complejos.

Un modelo determinístico de crecimiento de tomates de invernadero escrito en lenguaje Pascal fue desarrollado basado en un modelo de asimilación de la hoja, más una teoría de respiración y una teoría del rango de fotosíntesis, lo cual es controlado por las condiciones ambientales y los contenidos de carbohidratos en las hojas. El modelo fue aplicado para estimar el efecto del enriquecimiento de CO₂ sobre la producción de frutos de tomate (Kano y Van Bavel, 1988).

En cuanto a la distribución de materia seca entre hojas, tallo, raíz y frutos de las plantas Heuvelink y Marcelis (1989), desarrollaron un modelo dinámico. Los resultados de su simulación de la distribución de materia seca entre las hojas, tallos y

frutos de tomate correspondieron razonablemente bien con los datos medidos en el experimento.

El modelo TOMGRO para el cultivo de tomate fue usado para calcular la fotosíntesis neta del cultivo, el cual integra el modelo Acock para el cálculo de la misma. Los resultados muestran que el modelo es inadecuado para describir el balance de CO₂ del agrosistema del invernadero, sin embargo, se determinó que puede ser usado en un modelo más complejo para describir el crecimiento y desarrollo (Zekki *et al.*, 1999).

Existen otros modelos para el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, uno de ellos es el TOMPOUSSE, que predice la producción para los cultivos de tomate (Abreu y Meneses, 2000). Además, Dai *et al.*, (2006), desarrollaron un modelo relativamente simple para predecir la producción de biomasa del dosel y cosecha de frutos para tres cultivos en invernadero incluido el tomate. Los resultados muestran que el modelo predice satisfactoriamente la producción de biomasa del dosel y la cosecha de los frutos para los tres cultivos.

Por otra parte, Dimokas *et al.* (2008), proponen un nuevo modelo modificado del modelo original TOMGRO. El modelo fue validado y calibrado en el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero, ya que se observó una buena relación entre los datos medidos y simulados tomando en cuenta el desarrollo del cultivo, la biomasa y la producción de frutos. Tal experimento fue desarrollado para las condiciones del mediterráneo, en el este de Grecia.

2.3.3 Modelos sobre pimiento (*Capsicum annuum L.*)

Ngouajio *et al.* (2003), desarrollaron un modelo simple con estimaciones no destructivas de los frutos para la predicción de la cosecha en el cultivo de pimiento. El modelo fue derivado de la fórmula del volumen de una esfera como punto de partida, relacionando el largo y ancho del fruto de pimiento a su volumen. Los resultados muestran que la exactitud del modelo es comparable con la de otros modelos desarrollados anteriormente, además de que es simple y fácil de usar en campo.

Por otro lado, Verlinden *et al.* (2005), desarrollaron un modelo para predecir la época de cosecha en el cultivo de pimiento basándose en el color y condiciones climáticas como la radiación solar y temperatura del invernadero. Realizaron predicciones de cosecha con éxito en tiempos de una o dos semanas.

Marcelis *et al.* (2005), desarrollaron un modelo de cómo las relaciones planta-nutriente pueden ser utilizadas en un modelo para cultivos de invernadero tomando como ejemplo el cultivo de pimiento. A partir de datos del clima, el modelo simula el desarrollo de órganos de la planta, transpiración, y asimilación de agua y nutrientes.

Marcelis *et al.* (2006), describen un modelo mecanicista para el cultivo de pimiento donde trabajan con cuestiones como la expansión del área foliar, partición de materia seca y la validación del mismo. La validación del modelo fue en base a seis experimentos realizados en los Países Bajos y en Francia. La simulación de la materia seca así como su reparto en diferentes órganos se mostró acertada al

comparar los resultados del modelo y los datos medidos de los diferentes experimentos.

2.3.4 Modelos sobre pepino (*Cucumis sativus* L.)

En cuanto al cultivo de pepino, se han desarrollado varios trabajos de modelación con características propias. Nederhoff *et al.* (1989), describen un trabajo en el que validaron el submodelo de fotosíntesis en el cultivo de pepino en invernadero. Además Heuvelink y Marcelis (1989) y Marcelis (1994), simularon dinámicamente la distribución de materia seca entre hojas, tallo, raíz y frutos de las plantas, incluyendo la distribución para frutos individuales en el caso de pepino. En la simulación encontraron resultados aceptables para la distribución de materia seca entre los diferentes órganos comparados con los datos medidos en el experimento. Adicionalmente, determinaron que la distribución de materia seca entre los diferentes órganos como hojas, tallos y raíz es independiente de la carga del fruto.

Liebig (1989), generó un modelo para predecir la producción semanal del número de frutos en el cultivo de pepino usando ecuaciones derivadas de análisis de regresión múltiple. Chamont (1993), propuso un modelo simple de la distribución de carbono para la simulación del desarrollo de la raíz en el cultivo de pepino. Marcelis y Gijzen (1998), desarrollaron un modelo conocido como KOSI para predecir semanalmente el peso fresco de cosecha de los frutos de pepino así como su calidad. Los resultados presentados fueron satisfactorios, ya que los datos simulados comparados contra los datos medidos fueron aceptables.

También se han utilizado sistemas lineales para la modelación del cultivo de pepino, ya que al modelar la arquitectura de la planta con sistemas lineales puede ser de gran ayuda para seleccionar adecuadamente los cultivares y las técnicas de manejo del cultivo (Higashide *et al.*, 2000; Kahlen, 2006) y son sistemas relativamente fáciles de usar.

2.3.5 Modelos sobre lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Existen diferentes modelos propuestos para predecir el crecimiento del cultivo de lechuga, que por ser un cultivo de manejo relativamente sencillo, se ha utilizado ampliamente en estudios de optimización y control (López-Cruz, 2003).

Van Henten (1994), propuso un modelo de crecimiento de lechuga para estudios de optimización de control de clima en invernadero. El modelo describe la dinámica de comportamiento de dos variables de estado: peso seco no estructural y peso seco estructural, los que son afectados por la radiación fotosintéticamente activa, la concentración de dióxido de carbono y la temperatura dentro del invernadero. Este modelo fue validado comparando las simulaciones con datos obtenidos de dos experimentos. Así mismo, Van Henten y Van Straten (1994), realizaron un análisis de sensibilidad del mismo. Además, Pearson *et al.* (1997), Zhang *et al.* (2004), han trabajado en modelación dinámica. En general, obtuvieron buenos resultados con simulaciones efectivas con aproximadamente un 90% de confiabilidad.

En cuanto al manejo de fertilización, Willcutts *et al.* (1998), desarrollaron una comparación de tres modelos matemáticos para determinar el óptimo de los rangos de fertilización de nitrógeno en diferentes variedades del cultivo de lechuga. Por su

parte, (Zhang *et al.*, 2008), modelaron la cinética de la absorción de nutrientes en el cultivo de lechuga, especialmente nitrógeno. En ambos trabajos, calibraron y validaron sus respectivos modelos logrando buena eficiencia de simulación.

Además se han utilizado las redes neuronales artificiales (ANN por sus siglas en inglés) en la modelación del crecimiento y desarrollo en el cultivo de lechuga. Estos modelos pueden predecir la producción del cultivo de lechuga en invernadero con gran exactitud, tomando en cuenta el peso fresco y el desarrollo de la planta (Lin, 2002). Aunque por otra parte, Cordova y Yu (2009), nos dicen que las redes neuronales no pueden igualar sistemas no lineales exactamente, sin embargo, con algunas modificaciones se pueden aplicar satisfactoriamente en la modelación del crecimiento de lechuga en invernadero.

2.3.6 Otros modelos

Se han realizado modelos para la fotosíntesis del dosel de varios cultivos como tomate pepino y pimiento, comparando los mismos entre sí, teniendo aplicaciones prácticas en la horticultura (Nederhoff y Vegter, 1994).

El modelo HORTISIM para la producción de cultivos y clima en invernadero contiene siete submodelos (clima, clima del invernadero, suelo, cultivo, manejo del invernadero, manejo del suelo, manejo del cultivo) y además un manejador de los procesos de simulación (el motor). Con este modelo se realizaron diversos estudios sobre los diferentes campos de simulación con diferentes cultivos; se mostraron buenos resultados de las simulaciones con respecto a los datos obtenidos de los diferentes experimentos realizados en diferentes lugares (Gijzen *et al.*, 1998).

También se han desarrollado modelos para determinar la evapotranspiración en el cultivo de lechuga. El modelo calcula la transpiración del cultivo y evaporación del suelo, y también el desarrollo de la cobertura del suelo y la radiación diaria interceptada por el dosel. Los resultados obtenidos del modelo son muy buenos comparados con los medidos directamente de campo (Gallardo *et al.*, 1996).

Hyun *et al.* (2003), usaron la ecuación expolinear del crecimiento para modelar el cultivo de crisantemo (*Chrysanthemum morifolium* Ramat.) a lo largo de un año. Obtuvieron resultados adecuados, concluyendo que la ecuación expolinear de crecimiento es una herramienta útil.

Lin (2004), modeló los procesos de maduración del cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) en invernadero, ya que la cosecha de los mismos es irregular, causando dificultades para los operadores del invernadero en la cosecha y empaclado para el envío.

Otro cultivo en el que se han realizado trabajos sobre modelación y simulación recientemente es en algodón (*Gossypium hisutum*) en el sur de Texas. Las investigaciones se enfocaron en la obtención de parámetros para el desarrollo de modelos de cultivos (Ko *et al.*, 2009).

2.3.7 Análisis de sensibilidad de modelos

Para los modelos matemáticos se realizan procesos denominados análisis de sensibilidad que sirven para evaluar el efecto de los parámetros y entradas del modelo sobre las salidas. Dichos procesos no se aplican para todo el periodo de crecimiento del cultivo (Heuvelink, 1999).

Van Straten *et al.* (1999) realizaron trabajos experimentales para calibrar y realizar un análisis de sensibilidad de un modelo dinámico para el control de nitrato en lechuga.

En un análisis de sensibilidad llevado a cabo para el modelo NICOLET B3, que es una modificación del modelo NICOLET, usaron como variables de entrada datos del clima dentro de un invernadero localizado en Chapingo, México, así como valores no correlacionados (independientes) de las variables de entrada usando ruido blanco. Los resultados de dicho análisis mostraron que tres parámetros afectan en mayor medida el comportamiento de dicho modelo, y que algunos parámetros no tienen tal relevancia por lo que pueden continuar con sus valores originales, dando como resultante una simplificación de la estructura del modelo original (López-Cruz *et al.*, 2004).

2.3.8 Calibración y validación de modelos

La calibración de un modelo matemático es el proceso de modificación de los valores de los parámetros del modelo para obtener un mejor ajuste entre la predicción (simulación) y los datos observados. Generalmente, los parámetros sujetos de calibración son aquellos que presentan incertidumbre, que afectan el comportamiento del modelo en forma más sensible, y que afectan el comportamiento del modelo en forma tal que se obtiene mejor ajuste entre las mediciones y datos simulados; de forma práctica son los parámetros que un análisis de sensibilidad mostró como más importantes para los estados y/o salidas del modelo (López-Cruz, 2004). En forma general, calibración es cualquier procedimiento que permite extraer información

cuantitativa con respecto a los parámetros del modelo a partir de observaciones o mediciones usando un modelo de simulación completo (Metselaar, 1999).

Por su parte, el proceso de validación de un modelo se puede definir como un procedimiento para establecer la utilidad de éste para una aplicación (Metselaar, 1999). Metselaar (1999) sugiere los criterios usados en la calibración de un modelo para evaluar su calidad de predicción, ya que, lo que se desea es lograr una identidad $M_i=P_i$ entre mediciones (M_i) y predicciones (P_i), donde el subíndice denota la *i-ésima* instancia. La utilidad de un modelo se puede definir en términos de la calidad predictiva relativa. Así mismo existen varias medidas de la calidad predictiva de un modelo (López-Cruz, 2004).

Hussain *et al.* (2008), validaron un modelo mecanístico en el cultivo de zanahoria usando el coeficiente de correlación ajustado R^2 , el cual también fue usado por Zekki *et al.* (1999). De la misma forma, también se han utilizado los intervalos de confianza para validar modelos como lo describen Van Henten y Van Straten (1994).

III. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE TOMATE EN INVERNADERO

GROWTH ANALYSIS OF GREENHOUSE TOMATO CROP

Antonio Juárez-Maldonado¹, Karim de Alba Romenus¹, Alejandro Zermeño González²,
Homero Ramírez¹, Adalberto Benavides Mendoza^{1*}

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Buenavista,
Saltillo, Coahuila, México, CP 25315.

* Autor para correspondencia (abenmen@gmail.com).

² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Riego y Drenaje,
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México CP 25315.

RESUMEN

En México el cultivo del tomate es de gran importancia, el 70% de los cultivos que se producen bajo condiciones protegidas corresponde al tomate. Por esto es importante realizar un manejo eficiente en la agricultura intensiva para lo que se requieren conocer los factores que condicionan el potencial de producción de los cultivos. El objetivo de éste trabajo fue realizar un análisis de crecimiento de tomate en invernadero. Se desarrollaron dos ciclos de cultivo de tomate durante los años 2011 y 2012. Se cosecharon cuatro plantas por semana en las que se determinó el peso fresco y seco de los diferentes órganos. Se realizaron análisis de correlación y de regresión entre los diferentes órganos de la planta de tomate, y una prueba de t-Student entre las variables climáticas de ambos ciclos. Con los datos obtenidos se generaron

curvas de crecimiento de los diferentes órganos de la planta. Se encontró que el cultivo de tomate presentó una etapa de crecimiento exponencial y otra lineal. Se demostró que existe una fuerte correlación entre los pesos frescos y secos de los diferentes órganos de la planta ($P \leq 0.01$), y en las diferentes etapas de crecimiento ($P \leq 0.01$). También se observó que la generación y acumulación de biomasa por las plantas de tomate se afectó por las condiciones climáticas internas del invernadero, ya que fueron diferentes en ambos ciclos ($P \leq 0.05$). La información presentada es útil para diferentes factores del cultivo de tomate en invernadero.

Palabras clave: curvas de crecimiento, correlación, regresión lineal, *Lycopersicon esculentum*.

INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos en invernaderos es de suma importancia y tiene la ventaja sobre la producción a cielo abierto de establecer una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima interno que permite proteger el cultivo de condiciones adversas (viento, granizo, plagas, etc.) y controlar factores como la temperatura, radiación, concentración de CO₂, humedad relativa, etc. En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado rápidamente, de 721 has en 1999 a 3200 has en 2005 (Ocaña-Romo, 2008), la cual en 2009 se extendió a una superficie de 10000 has (Perea, 2009).

Los datos más recientes muestran que en 2012 se llegó a 12000 has de invernaderos, esto sin incluir otras 8 000 has que corresponden a malla sombra y macrotúnel (SAGARPA, 2012). En México el cultivo del tomate es muy importante, ya que de los principales cultivos que se producen en condiciones protegidas éste ocupa el 70%, seguido por pimiento (16%) y pepino (10%) (SAGARPA, 2012). Aunado a esto, México es el principal exportador de tomate a nivel internacional, enviando el producto a Estados Unidos, Canadá y El Salvador, tan sólo en 2011 se produjeron 1872000 toneladas (MÉXICOPRODUCE, 2012).

Considerando el factor de importancia que tiene el cultivo del tomate es importante realizar un manejo eficiente en la agricultura intensiva por lo que se requieren conocer los factores que condicionan el potencial de producción de los cultivos.

En este sentido, la correcta aplicación de riego es uno de los principales factores que afecta el rendimiento del cultivo (Flores *et al.*, 2007), entendiendo que el rendimiento está determinado por la capacidad de acumular materia seca en los órganos destinados a la cosecha (Casierra-Posada *et al.*, 2007). Además, aunque existen técnicas exitosas como el fertirriego, aún hay problemas con la dosificación de fertilizantes que deben aplicarse, por lo que se ha propuesto usar la acumulación de materia seca para cuantificar la demanda nutrimental (Bugarín-Montoya *et al.*, 2002). Por esta razón, prácticas como la fertilización y el riego deben ser definidas en función de las características propias de crecimiento del cultivo de interés (Fynn *et al.*, 1989; Enriquez-Reyes *et al.*, 2003).

Aunado a lo anterior, los avances tecnológicos brindan técnicas novedosas como la simulación de cultivos bajo invernadero, principalmente en el tomate (Heuvelink y Marcelis, 1989; Marcelis *et al.*, 1989; Heuvelink, 1995; Heuvelink y Buiskool, 1995; Heuvelink, 1996; Heuvelink, 1999; Marcelis y Heuvelink, 1999; de Gelder *et al.*, 2005; Marcelis *et al.*, 2009). La simulación de cultivos trata de imitar el crecimiento de éstos mediante ecuaciones matemáticas. Para estos modelos de simulación es de vital importancia conocer a fondo el crecimiento y distribución de materia seca entre los diferentes órganos de la planta.

En este sentido y debido a la importancia económica del cultivo de tomate en México, el objetivo del presente estudio fue realizar un análisis de crecimiento bajo condiciones de invernadero, el cual nos permita entender de mejor manera el comportamiento de este cultivo para determinar un manejo eficiente de los recursos tanto de agua como fertilizantes, así como proveer de información para la generación de modelos de crecimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo del cultivo de tomate

Se estableció un experimento con plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) con el fin de conocer la dinámica de crecimiento del cultivo bajo condiciones de invernadero en la región norte de México. Para ello se realizaron dos repeticiones del cultivo durante los años 2011 y 2012, del 3 julio al 30 de octubre y del 6 de mayo al 23 de septiembre respectivamente. La semilla utilizada fue el híbrido “Caimán” de hábito de crecimiento indeterminado y de tipo bola. El invernadero en el que se estableció el experimento es de tipo capilla con cubierta de policarbonato, además de contar con un sistema automático para el control de las temperaturas en su interior.

Las plantas fueron establecidas en macetas plásticas de 19 L y con una densidad de 3 plantas m⁻²; se usó un sistema de cultivo sin suelo utilizando como sustrato una mezcla de perlita y *peat moss* en proporción 1:1. Se utilizó un sistema de riego dirigido con microtubín y goteros tipo estaca de alto flujo para cada maceta. Además se instalaron temporizadores automáticos para realizar cuatro riegos por día a diferentes horarios (8:00, 12:00, 16:00 y 20:00 hrs.). La cantidad de riego aplicada fue diferente para cada etapa fenológica aplicando alrededor de 2.4 L por planta por día en las etapas de mayor consumo. La nutrición del cultivo se dio con la aplicación de solución Steiner (Steiner, 1961) y manejando diferentes concentraciones de acuerdo a la etapa fenológica. El cultivo se trabajó a un tallo, y buscando que los racimos en la medida de lo posible fueran de cinco frutos, por lo que en la mayor parte del tiempo se realizaron aclareos de fruto. Las plantas se limitaron en su crecimiento eliminando la parte apical a las 13 semanas después del trasplante (SDT) alcanzando un promedio de 10 racimos por planta y una altura aproximada de 3.5 m.

Para determinar el crecimiento del cultivo se realizaron muestreos destructivos semanales de cuatro plantas de tomate; éstas se separaron en hojas, tallo y frutos y se obtuvieron sus pesos frescos. Después de secar en horno de secado a 80°C durante 4 días se

obtuvo el peso seco de las diferentes partes de la planta. Así mismo, se cuantificó el total de poda realizada a cada planta y el total de frutos cosechados, de los que se obtuvo también peso fresco y seco. Con estos datos se determinó a su vez el peso de la parte aérea que considera la suma de hojas, tallo y frutos tanto del peso fresco como del peso seco. También se obtuvo la biomasa acumulada total que considera la suma de la parte aérea más la hoja podada y el fruto cosechado, tanto de peso fresco como de peso seco. La suma de fruto en la planta más el fruto cosechado fue otra variable que se obtuvo para peso el fresco y seco.

Análisis estadísticos

El diseño del experimento fue completamente al azar y la obtención de las muestras fue de manera aleatoria. Para determinar el grado de correlación existente entre los diferentes órganos de la planta evaluados, se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson. Para dicho proceso se utilizó el complemento EZAnalyze© para Excel. Con esto se obtuvieron matrices de correlación entre las diferentes variables evaluadas, así como la correlación existente entre el peso fresco y seco de los diferentes órganos de la planta. Finalmente, para determinar las tendencias de crecimiento a lo largo de ambos ciclos de cultivo, se realizaron análisis de regresión simple y para verificar el ajuste de los mismos se usó el coeficiente de determinación (R^2), este proceso se realizó en el complemento Regress© para Excel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de concluir los procesos experimentales se generaron curvas de crecimiento de los diferentes órganos de las plantas de tomate. En las Figuras 1 y 2 se presentan las curvas correspondientes al ciclo 2011 para los pesos frescos y secos respectivamente, mientras que las curvas correspondientes al ciclo 2012 se muestran en las Figuras 3 y 4. Dichas curvas muestran el comportamiento del cultivo de tomate con respecto al tiempo por lo que se pueden utilizar en la planeación de las labores culturales (Casierra-Posada, 2007).

En las Figuras 1 y 2 puede observarse que las tendencias de crecimiento tanto en peso fresco como seco son muy similares, corroborándose lo anterior en el ciclo 2012 (Figuras 3 y 4).

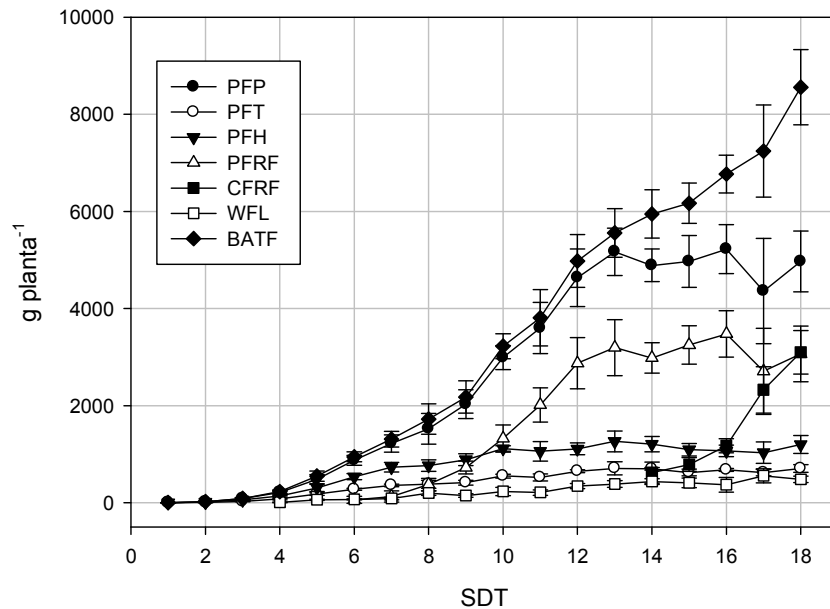


Figura 1. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos frescos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2011. PFP: Peso fresco de parte aérea. PFT: Peso fresco de tallo. PFH: Peso fresco de hojas. PFRF: Peso fresco de fruto. CFRF: Peso fresco de fruto cosechado. WFL: Peso fresco de hoja podada. BATF: Peso fresco de biomasa acumulada total.

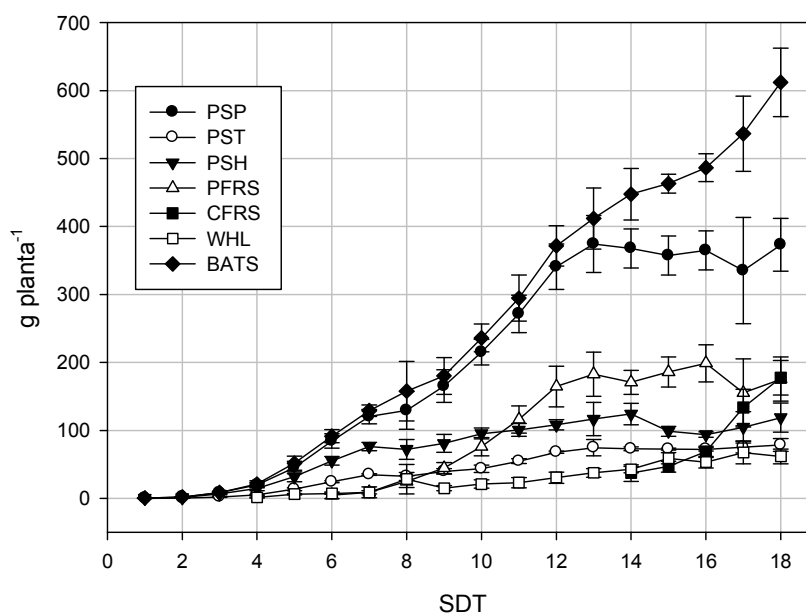


Figura 2. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos secos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2011. PSP: Peso seco de parte aérea. PST: Peso seco de tallo. PSH: Peso seco de hojas. PFRS: Peso seco de fruto. CFRS: Peso seco de fruto cosechado. WHL: Peso seco de hoja podada. BATS: Peso seco de biomasa acumulada total.

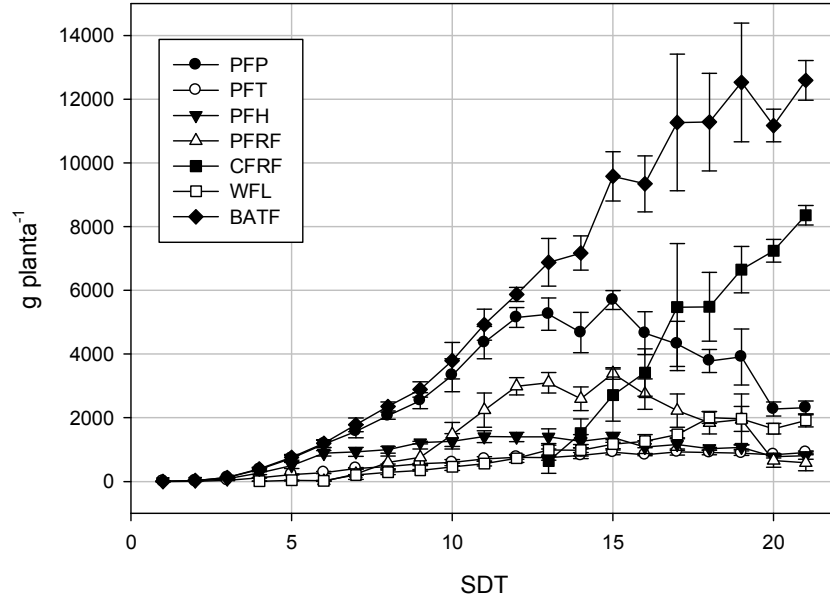


Figura 3. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos frescos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2012. PFP: Peso fresco de parte aérea. PFT: Peso fresco de tallo. PFH: Peso fresco de hojas. PFRF: Peso fresco de fruto. CFRF: Peso fresco de fruto cosechado. WFL: Peso fresco de hoja podada. BATF: Peso fresco de biomasa acumulada total.

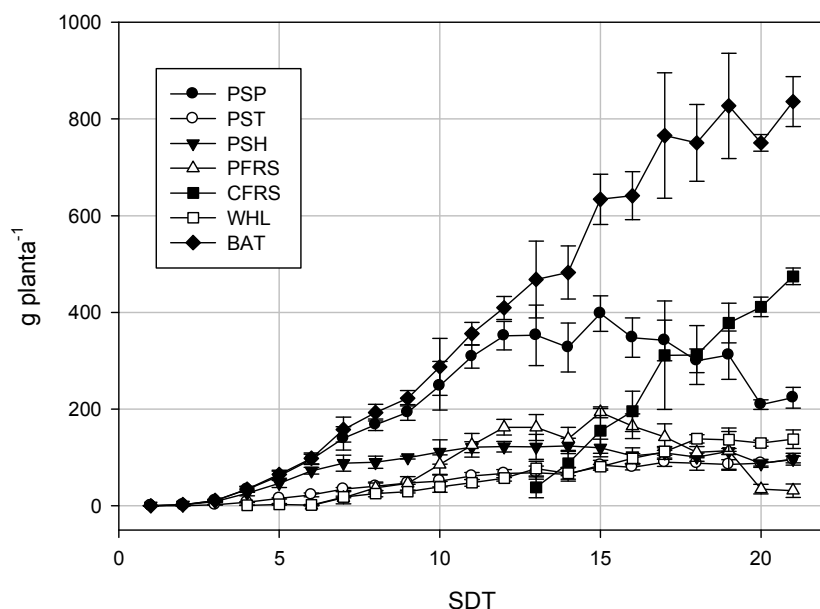


Figura 4. Curvas de crecimiento obtenidas con los pesos secos de los diferentes órganos de la planta de tomate correspondientes al ciclo 2012. PSP: Peso seco de parte aérea. PST: Peso seco de tallo. PSH: Peso seco de hojas. PFRS: Peso seco de fruto. CFRS: Peso seco de fruto cosechado. WHL: Peso seco de hoja podada. BATS: Peso seco de biomasa acumulada total.

Por otra parte, en el Cuadro 1 se presentan las correlaciones obtenidas entre los pesos frescos y secos de los diferentes órganos de la planta, además se muestran las ecuaciones de regresión generadas y su correspondiente R^2 . La similitud mostrada entre las curvas de crecimiento en peso fresco y seco, se debe a que el peso fresco está directamente correlacionado con el peso seco (Heuvelink y Marcelis, 1989), demostrándose esto con los coeficientes de correlación obtenidos entre los diferentes órganos de la planta, ya que todos fueron mayores a 0.97 (Pearson, $P \leq 0.01$) (Cuadro 1). Considerando estos resultados, es posible entonces estimar el peso seco a partir del peso fresco de cualquier parte de la planta de tomate con gran exactitud utilizando las ecuaciones de regresión generadas, ya que el R^2

para casi todos los casos fue mayor que 0.94, con excepción del correspondiente a hoja podada en 2011 ($R^2=0.8056$) pero en este caso puede emplearse la ecuación correspondiente al ciclo 2012 que fue significativamente mayor ($R^2=0.9813$) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Correlación entre pesos frescos y secos de las diferentes partes de la planta de tomate.

	Pearson	Significancia	Ecuación de regresión	R^2
Parte aérea ¹	.995	≤ 0.01	$y = 0.0716x + 11.108$	0.9900
Peso de tallo ¹	.979	≤ 0.01	$y = 0.1103x - 3.3336$	0.9587
Peso de hoja ¹	.988	≤ 0.01	$y = 0.0911x + 3.0564$	0.9764
Peso de fruto ¹	1.000	≤ 0.01	$y = 0.0565x + 2.2191$	0.9996
Hoja podada ¹	.898	≤ 0.01	$y = 0.1161x - 0.066$	0.8056
Parte aérea ²	.984	≤ 0.01	$y = 0.0693x + 18.466$	0.9679
Peso de tallo ²	.985	≤ 0.01	$y = 0.0989x - 4.164$	0.9697
Peso de hoja ²	.973	≤ 0.01	$y = 0.0877x + 5.0599$	0.9471
Peso de fruto ²	.989	≤ 0.01	$y = 0.055x + 3.7822$	0.9786
Hoja podada ²	.991	≤ 0.01	$y = 0.07x + 4.232$	0.9813

¹Corresponde al año 2011. ²Corresponde al año 2012. El término x representa el peso fresco en la ecuación de regresión.

Tanto en el ciclo 2011 como en el 2012 se aprecian algunas tendencias de crecimiento presentadas en etapas específicas. En el Cuadro 2, se muestran las ecuaciones obtenidas mediante análisis de regresión junto con su correspondiente R^2 , además, se incluye el periodo de tiempo del que se tomaron los datos para realizar dicho análisis. En ambos ciclos se presenta un crecimiento exponencial en el tallo, hojas, parte aérea y BAT correspondiente a las primeras 4 SDT, esto sin importar si es peso fresco o seco. Esto se constata con las ecuaciones exponenciales obtenidas y sus correspondientes R^2 que para todos los casos fue mayor que 0.97 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tendencias de crecimiento en base a peso fresco y ecuaciones de regresión para los diferentes órganos de la planta de tomate.

	Periodo considerado (SDT)	Ecuación de regresión	R^2
Parte aérea ¹	1-4	$y = 1.6238e^{1.262x}$	0.9766
	5-13	$y = 604.1x - 2932.2$	0.9306
Peso de tallo ¹	1-4	$y = 0.5547e^{1.2667x}$	0.9780
	5-13	$y = 62.35x - 110.73$	0.8685
Peso de hoja ¹	1-4	$y = 1.0686e^{1.2594x}$	0.9750
	5-13	$y = 109.38x - 119.59$	0.8134
Peso de fruto ¹	5-13	$y = 490.23x - 3319.2$	0.8925
Hoja podada ¹	4-18	$y = 37.054x - 139.28$	0.8148

Fruto cosechado ¹	14-18	$y = 620.98x - 8391$	0.8008
	1-4	$y = 1.5839e^{1.2776x}$	0.9786
BATF ¹	5-13	$y = 644.09x - 3097.9$	0.9342
	5-18	$y = 611.27x - 2833$	0.9557
	1-4	$y = 1.0373e^{1.5216x}$	0.9767
Parte aérea ²	5-13	$y = 614.29x - 2620.3$	0.9452
	15-21	$y = -542.5x + 13598$	0.7864
Peso de tallo ²	1-4	$y = 0.3399e^{1.4905x}$	0.9813
	5-13	$y = 71.231x - 112.69$	0.9020
	1-4	$y = 0.6913e^{1.5374x}$	0.9717
Peso de hoja ²	5-13	$y = 105.84x + 159.38$	0.7248
	14-21	$y = -75.386x + 2391$	0.5806
Peso de fruto ²	6-13	$y = 488.74x - 3216.4$	0.9099
	14-21	$y = -361.33x + 8305.1$	0.7017
	4-21	$y = 127.98x - 705.72$	0.9160
Fruto cosechado ²	13-21	$y = 966.94x - 11807$	0.9035
	1-4	$y = 1.5839e^{1.2776x}$	0.9786
BATF ²	5-13	$y = 644.09x - 3097.9$	0.9342
	5-21	$y = 611.27x - 2833$	0.9557

¹Corresponde al año 2011. ²Corresponde al año 2012. El término x representa el tiempo en la ecuación de regresión. BATF: Peso fresco de biomasa acumulada total.

Así mismo se observó que entre las semanas 5-13 el crecimiento cambia su comportamiento y se vuelve lineal para todos los órganos de la planta incluso en el fruto, parte aérea y BAT (Cuadro 2). Este comportamiento concuerda con el reportado por Enriquez-Reyes *et al.* (2003), al mencionar que el tomate de crecimiento indeterminado presenta dos etapas bien definidas, a las que denominan una de crecimiento juvenil y la otra de reproducción. También considerando sólo la BAT, la tendencia es similar a los resultados presentados en otros estudios (Heuvelink, 1995; Heuvelink y Buiskool, 1995; Heuvelink, 1999; Xiao *et al.*, 2004; de Gelder *et al.*, 2005; Marcelis *et al.*, 2009). Aunque las ecuaciones de regresión obtenidas mostraron valores del R^2 más bajos que en el crecimiento exponencial, sólo el de las hojas del ciclo 2012 mostró un $R^2=0.7248$ mientras que el resto de los órganos presentó valores superiores a 0.80 (Cuadro 2). Este hecho puede explicarse debido a que constantemente se realizó poda de hojas lo que generó variabilidad en los datos de esta variable en particular, tal como lo indica Heuvelink (1999).

Debido a que en el ciclo 2011 el cultivo del tomate se trabajó sólo por 18 SDT, solamente en el ciclo 2012 fue posible determinar una tendencia clara posterior a la semana 14 después del trasplante, ya que en este ciclo se trabajó 21 SDT. En dicho ciclo, la parte aérea, hojas y frutos mostraron una tendencia lineal decreciente entre las semanas 15-21, aunque los R^2 estuvieron entre 0.58 y 0.78 (Cuadro 2) esto fue debido posiblemente a la gran variabilidad de los datos. En las Figuras 3 y 4 se puede apreciar el comportamiento decreciente antes mencionado, éste se debió a que la planta se limitó en su crecimiento en la semana 13 después del trasplante, y a que la poda de hojas y cosecha de frutos se mantuvieron hasta el final del cultivo. A diferencia de lo anterior, la BAT se mantuvo con una tendencia de crecimiento lineal desde la 5^{ta} SDT hasta el final del cultivo para ambos ciclos, esto se confirma ya que el R^2 para ambos casos fue mayor que 0.95 (Cuadro 2). Esta tendencia es importante ya que a diferencia de otros estudios en los que se presenta solamente el crecimiento lineal de tomate (Heuvelink, 1995; Heuvelink y Buiskool, 1995; Heuvelink,

1999; Xiao *et al.*, 2004; de Gelder *et al.*, 2005; Marcelis *et al.*, 2009), el conocer el comportamiento de este cultivo después de que se limita su crecimiento es útil para determinar de mejor manera el manejo tanto cultural como la aplicación de riego y nutrientes en esa etapa específica. Además, es posible estimar de manera más adecuada el tiempo de cosecha esperado cuando se trabaja el cultivo de tomate en ciclos cortos con el objetivo de concentrar la producción en periodos de demanda específicos tal y como lo resaltan Flores *et al.* (2007).

En los Cuadros 3 y 4, se presentan las matrices de correlación obtenidas para las diferentes variables evaluadas. En éstas, se detalla el grado de correlación, el ciclo de cultivo al que corresponde (2011 o 2012) y adicionalmente se muestra el número de SDT (13 ó 18) empleado para realizar dicho análisis. En el Cuadro 5 se muestra la correlación obtenida 21 SDT y correspondiente solamente a los datos del ciclo 2012 debido a las fechas en que se trabajó dicho cultivo como ya se explicó anteriormente. En el Cuadro 3, se puede observar que sólo la variable fruto fresco cosechado no presenta alguna correlación clara con el resto, todas las demás presentan correlación altamente significativa (Pearson, $P \leq 0.01$). Esto se puede atribuir a las fechas en que se inicia la cosecha ya que en 2011 comenzó en la 14^{va} SDT mientras que en 2012 inició en la 13^{va} SDT y las correlaciones mostradas abarcan sólo hasta la semana 18.

Cuadro 3. Matriz de correlaciones entre las diferentes variables de crecimiento evaluadas correspondientes a los pesos frescos del cultivo de tomate.

	PFP		PFT		PFH		PFRF		CFRF		FR+CF		WFL		BATF	
	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12
PFP	13	1	1													
	18	1	1													

PFT	13	.942	.963	1	1												
	18	.942	.944	1	1												
PFH	13	.911	.898	.985	.964	1	1										
	18	.867	.884	.955	.876	1	1										
PFRF	13	.989	.988	.869	.908	.779	.708	1	1								
	18	.974	.989	.784	.814	.485	.606	1	1								
CFRF	13	-	.379	-	.236	-	-	-	-	.804							
	18										.317						
FR+CF	13	-	.970	-	.881	-	.676	-	.987	-	.958						
	18	.887	.688	.752	.883	.470	.180	.899	.686	.806	.954	1	1				
WFL	13	.896	.930	.906	.891	.853	.816	.814	.876	-	-	-	.880	1	1		
	18														.714		
BATF	13	1.000	.995	.946	.948	.914	.879	.986	.981	-	.580	-	.983	.910	.953	1	1
	18	.961	.858	.906	.926	.822	.675	.899	.722	.877	.945	.983	.993	.875	.949	1	1

11 y 12 corresponden a los ciclos de cultivo de tomate (ciclos 2011 y 2012 respectivamente).

13 y 18 corresponden a número de semanas utilizadas para realizar las correlaciones. Los coeficientes de correlación altamente significativos se muestran en negrita (Pearson, $P \leq 0.01$). – Correlación no disponible. PFP: Peso fresco de parte aérea. PFT: Peso fresco de tallo. PFH: Peso fresco de hojas. PFRF: Peso fresco de fruto. CFRF: Peso fresco de fruto cosechado. FR+CF: Peso fresco de fruto más fruto cosechado. WFL: Peso fresco de hoja podada. BATF: Peso fresco de biomasa acumulada total.

Cuadro 4. Matriz de correlaciones entre las diferentes variables de crecimiento evaluadas correspondientes a los pesos secos del cultivo de tomate.

	PSP		PST		PSH		PFRS		CFRS		FR+CS		WHL		BATS		
	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	11	12	
PSP	13	1	1														
	18	1	1														
PST	13	.984	.986	1	1												
	18	.977	.961	1	1												
PSH	13	.935	.936	.970	.960	1	1										
	18	.909	.921	.951	.880	1	1										
PFRS	13	.984	.978	.931	.918	.803	.758	1	1								
	18	.948	.975	.812	.817	.515	.675	1	1								
CFRS	13	-	.192	-	.108	-	-	-	.524								
							.135										
	18	.004	-	.151	.612	.068	-	-	-	1	1						
FR+CS	13	-	.956	-	.895	-	.723	-	.984	-	.842						
	18	.886	.743	.825	.888	.527	.350	.898	.721	.806	.960	1	1				
WHL	13	.768	.943	.790	.922	.748	.838	.625	.899	-	-	-	.906	1	1		
										.447							
	18	.787	.802	.854	.914	.691	.589	.626	.688	.349	.788	.770	.930	1	1		
BATS	13	.998	.995	.985	.977	.937	.916	.977	.973	-	.336	-	.974	.810	.967	1	1
	18	.970	.902	.963	.957	.870	.756	.876	.771	.874	.934	.967	.988	.885	.966	1	1

11 y 12 corresponden a los ciclos de cultivo de tomate (ciclos 2011 y 2012 respectivamente).

13 y 18 corresponden a número de semanas utilizadas para realizar las correlaciones. Los

coeficientes de correlación altamente significativos se muestran en negrita (Pearson, $P \leq 0.01$). – Correlación no disponible. PSP: Peso seco de parte aérea. PST: Peso seco de tallo. PSH: Peso seco de hojas. PFRS: Peso seco de fruto. CFRS: Peso seco de fruto cosechado. FR+CS: Peso seco de fruto más fruto cosechado. WHL: Peso seco de hoja podada. BATS: Peso seco de biomasa acumulada total.

Cuando se consideró mayor tiempo de evaluación lo anterior cambió, ya que a las 21 SDT el fruto fresco cosechado mostró correlaciones altamente significativas (Pearson, $P \leq 0.01$), siendo positivas con respecto al peso fresco de tallo y negativas con respecto al peso fresco de la parte aérea, peso fresco de hojas y al peso fresco del fruto en la planta (Cuadro 5). En el Cuadro 4 correspondiente a los pesos secos se observa prácticamente lo mismo que en el Cuadro 3, lo cual se esperaba debido a la alta correlación existente entre el peso fresco y seco (Cuadro 1) (Heuvelink y Marcelis, 1989).

Cuadro 5. Matriz de correlaciones entre las diferentes variables de crecimiento evaluadas durante el ciclo 2012 correspondientes a los pesos secos y frescos del cultivo de tomate considerando 21 semanas.

	FR								FR								
	PS	PS	PS	PF	CF	+C	W	BA		PF	PF	PF	PF	CF	+C	WF	BA
	P	T	H	RS	RS	S	HL	TS		P	T	H	RF	RF	F	L	TF
PSP	1								PFP	1							
PST	.888	1							PFT	.866	1						
PSH	.919	.830	1						PFH	.880	.800	1					
PFRS	.957	.500	.681	1					PFRF	.989	.602	.652	1				
CFRS	-	.645	-	-	1				CFRF	-	.471	-	-	1			

	.599	.502	.710					.739	.710	.756							
FR+C								FR+C		-							
S	.503	.900	.169	.347	.939	1		F	.356	.867	.175	.330	.944	1			
WHL	.629	.917	.469	.312	.851	.953	1	WFL	.493	.861	.222	.287	.786	.940	1		
BATS	.793	.956	.689	.405	.914	.991	.975	1	BATF	.696	.914	.534	.385	.918	.995	.965	1

Los coeficientes de correlación altamente significativos se muestran en negrita (Pearson, $P \leq$

0.01). – Correlación no disponible. PSP: Peso seco de parte aérea. PST: Peso seco de tallo.

PSH: Peso seco de hojas. PFRS: Peso seco de fruto. CFRS: Peso seco de fruto cosechado.

FR+CS: Peso seco de fruto más fruto cosechado. WHL: Peso seco de hoja podada. BATS:

Peso seco de biomasa acumulada total. PFP: Peso fresco de parte aérea. PFT: Peso fresco de

tallo. PFH: Peso fresco de hojas. PFRF: Peso fresco de fruto. CFRF: Peso fresco de fruto

cosechado. FR+CF: Peso fresco de fruto más fruto cosechado. WFL: Peso fresco de hoja

podada. BATF: Peso fresco de biomasa acumulada total.

Considerando lo mostrado en los Cuadros 3, 4 y 5, se puede afirmar que existe una distribución estable de la biomasa total generada entre los diferentes órganos de la planta en la etapa de crecimiento exponencial y en la de crecimiento lineal la cual puede variar principalmente por efecto de la temperatura (Heuvelink y Marcelis, 1989; Heuvelink, 1999; Enriquez-Reyes *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004). Aunque es importante recalcar que la proporción de biomasa distribuida cambia de acuerdo con la etapa fenológica (Marcelis *et al.*, 1989), lo cual se entiende ya que la aparición de frutos se da hasta después de la 4^{ta} SDT (Figuras 1-4). Dicha distribución se puede mantener siempre y cuando se mantenga en crecimiento la planta, ya que al momento en que se detiene el crecimiento cambia el comportamiento (Cuadro 2, Figuras 1-4) y por consecuencia la distribución de biomasa.

CONCLUSIONES

En éste trabajo se presentó un análisis de crecimiento de tomate en invernadero en el que se generaron las curvas de crecimiento de los diferentes órganos de la planta. El cultivo de tomate presentó dos etapas de crecimiento bien definidas, una exponencial en las primeras cuatro semanas después del trasplante y la otra lineal a partir de la cuarta semana. Adicionalmente, cuando se detiene el crecimiento del cultivo se presenta una etapa más con tendencia decreciente en frutos y hojas.

Se demostró que existe una fuerte correlación entre los pesos frescos y secos de los diferentes órganos de la planta. Además se encontró también correlación entre los diferentes órganos de la planta en las etapas de crecimiento exponencial y lineal.

La información presentada aquí puede ser útil en la planeación de los requerimientos de agua y nutrientes a lo largo de un ciclo de cultivo. También se puede utilizar para definir épocas de producción para aprovechar los mejores precios del mercado. Además, se puede aplicar en áreas poco exploradas como la modelación y simulación de tomate cultivado en invernadero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Forestal de la UAAAN por facilitar el espacio necesario para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

Bugarín-Montoya, R.; A. Galvis-Spinola; P. Sánchez-García and D. García-Paredes. 2002. Daily accumulation of aboveground dry matter and potassium in tomato. *TERRA LATINOAMERICANA*. 20(4):401-409.

- Casierra-Posada, F.; M.C. Cardozo and J.F. Cárdenas-Hernández. 2007. Growth analysis of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivated in greenhouse. *Agronomía Colombiana*. 25(2):299-305.
- De Gelder, A.; E. Heuvelink and J.J.G. Opdam. 2005. Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouses. *Acta Horticulturae*. 691:549-552.
- Enriquez-Reyes, S.A.; G. Alcántar-González; J.Z. Castellanos-Ramos; E.A. Suárez; D. González-Eguiarte and I. Lazcano-Ferrat. 2003. NUMAC-N Tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 1. Model description and parameters adjust. *TERRA LATINOAMERICANA*. 21(2):167-175.
- Flores, J.; W. Ojeda-Bustamante; I. López; A. Rojano and I. Salazar. 2007. Water requirements for greenhouse tomato. *TERRA LATINOAMERICANA*. 25(2):127-134.
- Fynn, R.P.; W.L. Roller and H.M. Keener. 1989. A decision model for nutrition management in controlled environment agriculture. *Agricultural Systems*. 31:35-53.
- Heuvelink, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: Measurements and simulation. *Annals of Botany*. 75:369-379.
- Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany*. 77:71-80.
- Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany*. 83:413-422.
- Heuvelink, E. and L.F.M. Marcelis. 1989. Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Horticulturae*. 260:149-157.
- Heuvelink, E. and R.P.M. Buischool. 1995. Influence of sink-source interaction on dry matter production in tomato. *Annals of Botany*. 75:381-389.
- Marcelis, L.F.M. and E. Heuvelink. 1999. Modelling fruit set, fruit growth and dry matter partitioning. *Acta Horticulturae*. 499:39-49.

- Marcelis, L.F.M.; E. Heuvelink and A.N.M. de Koning. 1989. Dynamic simulation of dry matter distribution in greenhouse crops. *Acta Horticulturae*. 248:269-276.
- Marcelis, L.F.M.; A. Elings; P.H.B. de Visser and E. Heuvelink. 2009. Simulating growth and development of tomato crop. *Acta Horticulturae*. 821:101-110.
- MÉXICOPRODUCE. 2012. Productos: Jitomate. <http://www.mexicoproduce.mx/productos.html#jitomate> Acceso 26 de enero de 2013.
- Ocaña-Romo, C.R. 2008. En crecimiento. Desarrollo de Invernaderos en México. www.hortalizas.com. Acceso 23 de octubre de 2010.
- Perea, 2009. Invernaderos y Riego. Aun con crisis seguirá creciendo superficie de invernadero. La Imagen Agropecuaria Num. 1. Domingo 24 de Mayo. www.imagenagropecuaria.com. Acceso 23 de octubre de 2010.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2012. Agricultura Protegida 2012. <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx> Acceso 26 de enero de 2013.
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*. 15:134-154.
- Xiao, S.; A. van der Ploeg; M. Bakker and E. Heuvelink. 2004. Two instead of three leaves between tomato trusses: Measured and simulated effects on partitioning and yield. *Acta Horticulturae*. 654:303-308.

**IV. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE
TOMATE EN INVERNADERO USANDO MODELOS DE REGRESIÓN
MÚLTIPLE**

**ESTIMATION OF THE WATER REQUIREMENTS OF GREENHOUSE
TOMATO CROP USING MULTIPLE REGRESSION MODELS**

**A. Juárez-Maldonado¹, A. Benavides-Mendoza^{1*}, K. de-Alba-Romenus¹, A.
Morales-Díaz², M. I. Ramírez-Sosa-Morán³**

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura,
Saltillo, Coahuila, México.

*Corresponding author: abenmen@uaaan.mx

²CINVESTAV Saltillo, Robótica y Manufactura Avanzada, Ramos Arizpe, Coahuila,
México.

³Instituto Tecnológico de Nuevo León, División de Estudios de Posgrado e
Investigación, Guadalupe, Nuevo León, México.

Resumen

En México la producción de tomate es la de mayor importancia entre los cultivos bajo invernadero y casa sombra, ocupando el 70 % de la superficie protegida del país. El uso del agua por los cultivos bajo invernadero se encuentra entre los factores de mayor importancia para determinar el rendimiento. El objetivo de este trabajo fue generar modelos de regresión para determinar los requerimientos hídricos del cultivo de tomate en invernadero. Se determinaron los consumos de agua diarios por plantas de tomate para determinar la evapotranspiración y la transpiración reales. Mediante instrumentación se midieron las variables climáticas. El peso fresco y seco de las plantas fue determinado semanalmente. Usando regresión múltiple se obtuvieron modelos para estimar la evapotranspiración y la transpiración diaria por la planta de tomate. Los mejores modelos para estimar la ET presentaron valores del R^2 ajustado mayores a 0.9. Los mejores modelos para estimar la TR también presentaron valores de R^2 ajustado superiores a 0.9. Con los modelos de regresión múltiple obtenidos es posible estimar las necesidades de agua de las plantas de tomate bajo condiciones de invernadero a partir de variables de fácil obtención.

Palabras Clave: modelos de regresión; agua de riego; evapotranspiración; transpiración; condiciones climáticas.

INTRODUCCIÓN

En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado de forma sustancial. En el año 2012 se contabilizó una superficie de 12,000 has de invernaderos, esto sin incluir 8,000 has que corresponden a malla

sombra y macro túnel (SAGARPA, 2012). La producción de cultivos bajo invernaderos nos da una ventaja sobre la producción a cielo abierto, ya que se establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima interno que permite proteger el cultivo de condiciones adversas (viento, granizo, plagas, etc.) y controlar factores como la temperatura, radiación, concentración de CO₂, humedad relativa, etc. En México el cultivo de tomate ocupa el 70% de la superficie protegida (SAGARPA, 2012), siendo México el principal exportador a nivel internacional, enviando el producto a Estados Unidos, Canadá y El Salvador (MEXICOPRODUCE, 2012).

Considerando la importancia que tiene el cultivo de tomate, es necesario lograr un manejo eficiente del mismo. En particular el uso de agua por parte de los cultivos bajo invernadero es uno de los factores de mayor importancia, ya que el riego es responsable del agua disponible en la zona radical (Blanco & Folegatti, 2003), por lo que la correcta aplicación de éste determina el rendimiento del cultivo (Flores *et al.*, 2007). La práctica de riego debe ajustarse en función del crecimiento y de las demandas de evapotranspiración del cultivo de interés (Fynn *et al.*, 1989; Enriquez-Reyes *et al.*, 2003) para evitar periodos de déficit o superávit de humedad que afecten negativamente la productividad del cultivo y el uso eficiente tanto de agua como de los fertilizantes (Flores *et al.*, 2007). La evapotranspiración (ET) es el proceso por el cual el agua se transfiere del suelo y/o la capa vegetal a la atmósfera. La transpiración (TR) por su parte, es el flujo de agua de la capa vegetal hacia la atmósfera (Alkaeed *et al.*, 2007; Verstraeten *et al.*, 2008). El conocimiento de dichos procesos es fundamental para el manejo de agua, permitiendo el adecuado suministro del agua de

riego o la calendarización del mismo (Stöckle *et al.*, 2004; Alkaeed *et al.*, 2007; Verstraeten *et al.*, 2008).

Existen diferentes estudios para determinar las necesidades hídricas para el tomate en invernadero, algunos de ellos basados en métodos como el de Priestley-Taylor el cual es una versión simplificada de la combinación del método aerodinámico y el de balance de energía con la particularidad de usarse para grandes superficies de evaporación (Valdés-Gómez *et al.*, 2009), Penman-Monteith (Rojas *et al.*, 2003; Harmanto *et al.*, 2005), o bien en metodologías fundamentadas en balances de energía (Boulard & Wang, 2000). Dichos métodos, sin embargo, requieren de equipos sofisticados para obtener las variables necesarias para su operación. En otros estudios se determinaron los requerimientos diarios de agua mediante lisímetros de drenaje, incluso considerando las diferentes etapas fenológicas del tomate (Flores *et al.*, 2007). También se han utilizado modelos basados en mediciones del diámetro de tallo para generar predicciones de transpiración (Lee & Shin, 1998), este último si bien efectivo, resultó difícil de implementar. Baptista *et al.* (2005) utilizaron lisímetros para medir la evapotranspiración y transpiración del tomate, con esos datos obtuvieron modelos de regresión para los que utilizaron solamente la radiación solar y el déficit de presión de vapor. Los modelos fueron efectivos pero los autores recomendaron incluir otras variables de influencia debido a que estos se aplican sólo a las condiciones del estudio.

Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo fue generar modelos de regresión múltiple para estimar la evapotranspiración y transpiración de tomate bajo condiciones de invernadero y así determinar los requerimientos hídricos diarios, con

la particularidad de utilizar variables de fácil medición como la radiación total, radiación fotosintéticamente activa, humedad relativa, temperatura del aire y del suelo, y peso fresco de hojas y parte aérea.

MATERIALES Y MÉTODOS

Desarrollo del cultivo de tomate

Se cultivó tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), del híbrido “Caimán” de Enza Zaden® con fruto tipo bola y crecimiento indeterminado, bajo un invernadero de tipo capilla con cubierta de policarbonato y control automático de temperatura. Esto se llevó a cabo durante los años 2011 y 2012, del 3 julio al 30 de octubre y del 6 de mayo al 23 de septiembre respectivamente, en la región norte de México. El cultivo se estableció en macetas de plástico de 19 L con una densidad de 3 plantas m⁻², y en un sistema de cultivo sin suelo usando como sustrato una mezcla de perlita y *peat moss* en proporción 1:1. Se utilizó un sistema de riego dirigido con microtubín y goteros tipo estaca de alto flujo para cada maceta. Además se instalaron temporizadores automáticos para realizar cuatro riegos por día a diferentes horarios (8:00, 12:00, 16:00 y 20:00 hrs.). La cantidad de riego aplicada fue diferente para cada etapa fenológica aplicando 2.4 L por planta por día en las etapas de mayor consumo. La nutrición del cultivo se dio con la aplicación de solución Steiner (Steiner, 1961) y manejando diferentes concentraciones de acuerdo a la etapa fenológica. El cultivo se trabajó a un tallo y las plantas se limitaron en su crecimiento eliminando la yema apical a las 13 semanas después del trasplante (SDT). El arreglo

experimental fue completamente al azar con 5 repeticiones, considerando una planta como unidad experimental.

Para determinar el consumo de agua por planta de tomate se utilizaron 10 macetas elegidas al azar las cuales se colocaron sobre un contenedor para la colecta del agua drenada. Para evitar la evaporación del agua colectada, los contenedores junto con la parte inferior de la maceta se cubrieron con polietileno color negro. Además en cinco de estas plantas se colocó una cubierta de guata color blanco en la parte superior de la maceta para evitar la evaporación en la misma, permitiendo únicamente la transpiración por la planta. Para conocer el volumen de riego aplicado se usó un recipiente conectado al sistema de riego en donde se colectó el agua que recibía una maceta. Diariamente, después de la aplicación del primer riego a las 8:00 hrs., se midió el agua drenada y el agua de riego total acumulada de los riegos de las 12:00, 16:00 y 20:00 hrs. del día anterior. Para determinar el agua evapotranspirada por cada planta se restó el volumen de agua drenada por las plantas en las macetas sin la cubierta de guata al volumen total de agua aplicada en el riego. Así mismo, para determinar el agua transpirada se restó el volumen de agua drenada por las plantas en las macetas con la cubierta de guata al volumen total de agua aplicada en el riego.

Además se midieron las variables climáticas dentro del invernadero durante el desarrollo de los cultivos, para lo que se usó un sensor de radiación fotosintéticamente activa (LI-190), un sensor de radiación total (LI-200), un sensor de temperatura del aire (1400-101) y un sensor de temperatura del suelo (1400-103) conectados a un *datalogger* LI-1400 de LI-COR Inc. Se utilizó un sensor para medir la humedad relativa en el ambiente, el cual se encuentra incluido en un *datalogger* K-

33 ELG de CO2meter©. La medición de los datos se realizó cada 15 min y se almacenaron automáticamente en ambos *dataloggers* para su posterior descarga. Con estos datos se determinaron los promedios diurnos y en algunos casos nocturnos correspondientes a las diferentes semanas de desarrollo de ambos cultivos. También se realizaron muestreos destructivos de 4 plantas cada semana en las que se determinó el peso fresco promedio de la parte aérea por planta y el peso fresco promedio de hojas por planta.

Análisis estadísticos

Para generar los modelos, se utilizaron seis modelos de regresión múltiple: 1) lineal sin interacción, 2) lineal con interacción, 3) cuadrática con interacción, 4) cúbica con interacción, 5) cuadrática sin interacción, y 6) cúbica sin interacción. Como variables de entrada se usaron la radiación fotosintéticamente activa promedio por día (PAR, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), la radiación total promedio por día (RT, W m^{-2}), temperatura del aire promedio de día (TAD, °C) y de noche (TAN, °C), temperatura del suelo promedio de día (TSD, °C) y de noche (TSN, °C), humedad relativa promedio de día (RHD, %) y de noche (RHN, %), peso fresco de hojas (PFH, g) y peso fresco de parte aérea (PFP, g) (suma de hojas+tallo+frutos), y como variables de respuesta la evapotranspiración (ml día^{-1}) y transpiración (ml día^{-1}). Un día completo considero los datos comprendidos entre las 8:01 hrs. y 8:00 hrs. del día siguiente. Para diferenciar entre día y noche el criterio fue en base a la RT, se consideró como día cuando la RT fue $\geq 1.0 \text{ W m}^{-2}$ y como noche cuando la RT fue menor que 1.0 W m^{-2} . Todo el proceso de generación de modelos se realizó en el complemento Regress© para Excel. Para cada tipo de regresión se seleccionó el mejor modelo en

base a los índices coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj.) y error estándar (SE), obteniendo 6 modelos para evapotranspiración y 6 para transpiración para cada ciclo de cultivo, totalizando en 24 modelos.

Para determinar la viabilidad del uso de estos modelos en la práctica, se evaluaron el mejor y el peor modelo obtenidos del ciclo 2011 para cada variable de respuesta con los datos del ciclo 2012, y viceversa. En ellos se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (R) y el error estándar.

RESULTADOS

En la Tabla 1 y 2, se presentan los modelos de regresión múltiple obtenidos a partir de los datos correspondientes al ciclo 2011. Los modelos de la Tabla 1 se generaron para estimar la evapotranspiración, mientras que los de transpiración se presentan en la Tabla 2. Así mismo en las Tablas 3 y 4, se muestran los modelos para evapotranspiración y transpiración, respectivamente, correspondientes al ciclo 2012. En las Tablas 1-4 antes mencionadas, además del modelo generado se muestran los índices con los que se realizó su evaluación (R^2 ajustado y error estándar). También se presentan los modelos asignándoles una clave numérica, correspondiendo cada uno a un modelo específico de regresión múltiple y siguiendo el orden que se presentó en la metodología.

En las Figuras 1 y 2 se muestra una comparación entre los datos reales obtenidos durante el ciclo 2011 y los estimados por el mejor y peor modelo, seleccionados en base a los índices antes mencionados. La selección de estos modelos

fue sólo para hacer una comparación visual de los resultados, ya que los siete modelos generados para cada variable presentan eficacia muy similar entre sí según los índices considerados (Tablas 3 y 4). En la Figura 1 se presenta la comparación correspondiente a los modelos de evapotranspiración. Por su parte, en la Figura 2 se presenta la comparación de los modelos de transpiración.

De igual forma, en las Figuras 3 y 4 se muestran las comparaciones entre los datos reales y los estimados por los diferentes modelos generados en el ciclo 2012. Se presentan los correspondientes a la evapotranspiración en la Figura 3, y los de transpiración en la Figura 4.

Finalmente, derivado de los procesos de verificación para los modelos antes seleccionados, en las Figuras 5 y 6 se muestran las comparaciones realizadas entre los datos reales y los datos estimados por los modelos, pero en este caso de manera cruzada. Los modelos generados a partir del ciclo 2011 se probaron con los datos reales del ciclo 2012 (Figura 5) mientras que los modelos generados a partir de los datos del ciclo 2012 se probaron con los datos reales del ciclo 2011 (Figura 6). En ambos casos se muestran tanto los modelos de evapotranspiración como los de transpiración de tomate.

DISCUSIÓN

En las Tablas 1 y 3 se presentan los modelos generados para estimar la ET por la planta de tomate durante los dos ciclos de cultivo. Es notorio que en el ciclo 2012 (Tabla 3) los modelos obtenidos fueron mejores para estimar la ET que los obtenidos

del ciclo 2011 (Tabla 1), esto según los índices utilizados para evaluar la eficacia. En este caso el mejor modelo de 2012 presentó un R^2 ajustado de 0.920 y un error estándar de $138.1 \text{ ml día}^{-1}$ comparado contra el mejor modelo de 2011 que presentó un R^2 ajustado de 0.864 y un error estándar de $141.66 \text{ ml día}^{-1}$. Además en las Figuras 1 y 3, se presenta la comparación entre los datos reales y los estimados para la ET, lo que corrobora de manera gráfica la mayor eficacia de los modelos obtenidos en 2012. La menor capacidad predictiva mostrada por los modelos obtenidos en 2011 se puede atribuir a que se presentó en algunos momentos falta de uniformidad en el riego, originando diferencias en la cantidad de agua aplicada a cada maceta. Principalmente en los datos de ET es donde se mostró mayor variabilidad. Cabe mencionar que dicho error se presentó durante todo el desarrollo del cultivo. Dichos problemas no se presentaron en el ciclo 2012, por lo que en este ciclo se dio un mejor ajuste entre lo observado y lo estimado.

En cuanto a la TR de la planta de tomate, en las Tablas 2 y 4 se presentan los modelos obtenidos para dicha variable. Se observa de manera general que también los modelos correspondientes al ciclo 2012 fueron mejores que los del 2011, pero en este caso, la diferencia no fue tan grande como en la ET. Por ejemplo, el mejor modelo de 2012 presentó un R^2 ajustado de 0.907 y un error estándar de $146.62 \text{ ml día}^{-1}$ comparado con un R^2 ajustado de 0.891 y un error estándar de $138.3 \text{ ml día}^{-1}$ pertenecientes al mejor modelo de 2011. Estos resultados nos muestran que como ya se mencionó, los errores experimentales cometidos en 2011 afectaron de manera más pronunciada a los datos de ET, generando en esta variable mayor error que en la TR. En las Figuras 2 y 4 se presenta la comparación gráfica entre lo observado y lo

estimado, demostrando de manera visual lo anterior, ya que en las figuras se aprecia claramente que en ambos casos los datos estimados son muy similares a los datos observados. En este trabajo se generaron modelos (Tablas 1-4) para estimar la ET y la TR a diferencia de Lee & Shin (1998), que consideraron solamente un modelo para TR, además de que sólo consideran 15 días para calibrar y validar su modelo mientras que los modelos presentados aquí abarcan todas las etapas fenológicas del cultivo y consideran más de 100 días de evaluación. En comparación con Baptista *et al.* (2005), ellos muestran modelos de regresión tanto para ET como para TR con R^2 de 0.72 y 0.77 respectivamente, comparados con 0.925 y 0.912 obtenidos con los mejores modelos de ET y TR en este trabajo. Aunque Ortega-Farias *et al.* (2000), utilizaron el modelo Penman-Monteith para estimar la ET diaria con gran precisión (4.2% de error relativo), lo aplicaron en campo abierto y no en condiciones de invernadero. Boulard & Wang (2000), también estimaron la TR con gran precisión y bajo condiciones de invernadero pero existe la limitante de la dificultad de medición de las variables climáticas necesarias para el modelo así como la complejidad del mismo. Misma situación se presenta en Valdés-Gómez *et al.* (2009), que utilizaron el método Priestley-Taylor.

En los modelos de regresión múltiple obtenidos se puede apreciar que sistemáticamente los modelos que presentaron menos eficacia en la predicción fueron los generados a partir de regresión lineal sin interacción. Por el contrario, los modelos que presentaron la mayor eficacia en la predicción fueron los generados a partir de regresión cuadrática con interacción y cúbica con interacción (Tablas 1-4). Estos resultados indican que para generar modelos de regresión múltiple con mayor

capacidad predictiva deben ser de mayor orden y además deben considerar la interacción entre variables, lo que implica que serán relativamente más complejos e incluirán más variables de entrada.

En las Figuras 5 y 6 se muestra la comparación cruzada entre los datos reales y los estimados por los modelos. Al igual que en las Figuras (1-4) anteriores, en este caso se presentan el mejor y el peor modelo. En la Figura 5, correspondiente a las estimaciones por los modelos del 2011 se observa que los modelos para estimar la ET lo hacen de una manera no adecuada presentando un SE de 349.99 ml día⁻¹ y 689.98 ml día⁻¹ los modelos 6 y 1 respectivamente (Figuras 5A y 5B), mientras que los modelos para estimar la TR lo hacen de una manera más aceptable presentando un SE de 385.07 ml día⁻¹ y 189.94 ml día⁻¹ correspondientes a los modelos 4 y 1 respectivamente (Figuras 5C y 5D). Estos resultados nuevamente demuestran que los errores experimentales afectaron de manera más significativa a los datos de ET. En la Figura 6 se muestran las estimaciones por los modelos del 2012, observándose que tanto para la ET como para la TR, estos modelos resultaron más adecuados que los del 2011. Los modelos 4 y 1 para estimar la ET presentaron un SE de 257.91 ml día⁻¹ y 212.51 ml día⁻¹ respectivamente (Figuras 6A y 6B), mientras que los modelos 4 y 1 para estimar la TR presentaron un SE de 159.02 y 189.30 respectivamente (Figuras 6C y 6D). Aunque se observan diferencias entre lo estimado y lo observado en 2011, se debe considerar que los datos correspondientes a este ciclo se generaron con error experimental lo que puede justificar tales diferencias (Figura 6).

Es importante considerar el hecho de que todos los modelos son relativamente simples de utilizar por la naturaleza de las variables de entrada, y que el número y

disponibilidad de las mismas será crucial para definir el uso potencial de cada uno, a diferencia de otros modelos que requieren variables climáticas difíciles de obtener o por sí mismos son muy complejos para aplicarse (Ortega-Farías *et al.*, 2000; Harmanto *et al.*, 2005; Valdés-Gómez *et al.*, 2009). Otro factor de importancia es que son más precisos que otros modelos que son fáciles de usar como los presentados por Lee & Shin (1998), o Baptista *et al.* (2005). Además, se observa que la única variable que se requiere en todos los modelos obtenidos es el PFH (Tablas 1-4), y en el caso de los modelos correspondientes a 2012 las variables PFH y RT (Tablas 3-4). Estos resultados demuestran la importancia de estas dos variables en ambos procesos, tanto en la ET como en la TR de las plantas de tomate concordando con Flores *et al.* (2007), ya que ellos en su trabajo utilizan la radiación total para determinar las necesidades hídricas por la planta de tomate de manera muy efectiva. Otra ventaja de los modelos generados en este trabajo es que utilizan directamente el PFH o PFP y no otras variables como el índice de área foliar que son más difíciles de medir o deben ser estimadas (Lee & Shin, 1998; Baptista *et al.*, 2005; Harmanto *et al.*, 2005; Valdés-Gómez *et al.*, 2009).

En este trabajo se generaron modelos de regresión múltiple para estimar la evapotranspiración y transpiración de las plantas de tomate bajo condiciones de invernadero. Estos modelos son fáciles de utilizar por la naturaleza de las variables climáticas que se usan como entradas de los mismos. Por dicha razón, los modelos obtenidos permiten la estimación de la ET como de la TR a partir de diferentes variables y no del total de variables evaluadas, proporcionando herramientas útiles aplicables en diferentes escenarios.

La eficacia mostrada por los modelos generados permite determinar los requerimientos hídricos diarios por las plantas de tomate, por lo que pueden ser usados para diferentes fines como calendarizar los riegos, hacer más eficiente el uso del agua en el cultivo de tomate, evitar excesos de aplicación de agua de riego lo que disminuirá el riesgo de incidencia de enfermedades, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Forestal de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por facilitar el espacio necesario para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

Alkaeed OA, Jinno K, Tsutsumi A, 2007. Estimation of evapotranspiration in Itoshima area Japan by the FAO56-PM method. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University* 67(2): 53-64.

Baptista FJ, Bailey BJ, Meneses JF, 2005. Measuring and modeling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a Mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae* 691: 313-320.

Blanco FF, Folegatti MV, 2003. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7(2): 285-291.

Boulard T, Wang S, 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 25-34.

Enriquez-Reyes SA, Alcántar-González G, Castellanos-Ramos JZ, Suárez EA, González-Eguiarte D, Lazcano-Ferrat I, 2003. NUMAC-N Tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 1. Model description and parameters adjust. *TERRA LATINOAMERICANA* 21(2): 167-175.

Flores J, Ojeda-Bustamante W, López I, Rojano A, Salazar I, 2007. Water requirements for greenhouse tomato. *TERRA LATINOAMERICANA* 25(2): 127-134.

Fynn RP, Roller WL, Keener HM, 1989. A decision model for nutrition management in controlled environment agriculture. *Agricultural Systems* 31: 35-53.

Harmanto, Salokhe VM, Babel MS, Tantau HJ, 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management* 71: 225-242.

Lee BW, Shin JH, 1998. Optimal irrigation management system of greenhouse tomato based on stem diameter and transpiration monitoring. *Agricultural Information Technology in Asia and Oceania* 87-90.

MÉXICOPRODUCE, 2012. Productos: Jitomate. Available in <http://www.mexicoproduce.mx/productos.html#jitomate> [26 January 2013].

Ortega-Farías SO, Calderón R, Acevedo C, Fuentes S, 2000. Estimation of daily tomato evapotranspiration using the Penman-Monteith equation. *Ciencia e Investigación Agraria* 27(2): 91-96.

Rojas A, Noriega A, Herrera G, Chaparro R, 2003. Sistema de riego para invernaderos hidropónicos basado en la evapotranspiración del cultivo. *Naturaleza y Desarrollo* 1(1): 23-29.

SAGARPA, 2012. Agricultura Protegida 2012. Available in <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx> [26 January 2013].

Steiner AA, 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.

Stöckle CO, Kjelgaard J, Bellocchi G, 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation Science* 23: 39-46.

Valdés-Gómez H, Ortega-Farías S, Argote M, 2009. Evaluation of water requirements for a greenhouse tomato crop using the Priestley-Taylor method. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(1): 3-11.

Verstraeten WW, Veroustraete F, Feyen J, 2008. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. *Sensors* 8: 70-117.

TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la evapotranspiración (ET) del tomate durante el ciclo 2011.

Modelo	R ² adj.	SE
$ET_1 = (-6.856e+02) + (0.6322*PFH) + (1.4349*PAR) + (35.657*TAD)$	0.667	221.48
$ET_2 = (-1.024e+02) + (1.5657e-03*PAR*PFH) + (3.377e-02*PAR*TAD) + (-3.7901e-04*PFH^2) + (0.66823*PFP) + (-2.315e-03*RHN*PFP) + (0.22637*TSN*RHN)$	0.764	186.60
$ET_3 = (2.503e+03) + (-2.3757e-03*PFH^2) + (-1.2471e-02*TAD*PFP) + (-11.06*RHD) + (0.13312*TSD*PFH) + (1.1398e-02*PAR*RHN) + (-1.056e+02*TSD) + (5.2087e-04*PFH*PFP) + (-1.5734e-03*RHN*PFP) + (1.1286*TAD^2)$	0.853	147.43
$ET_4 = (1.037e+03) + (9.156e-05*PAR*TSD*PFH) + (-9.5615e-05*TSD*PFH^2) + (0.11474*TSD*PFH) + (-13.28*RHD) + (1.3843e-07*PFH^2*PFP) + (-1.3870e-06*PAR*PFH^2) + (9.9898e-06*RT^3)$	0.852	147.64
$ET_5 = (2.702e+02) + (3.1453*PFH) + (0.58727*PAR) + (-1.8336e-03*PFH^2) + (-14.44*RHD) + (5.4620e-05*PFP^2) + (32.522*TSD) + (-0.27896*PFP)$	0.824	161.33
$ET_6 = (9.99e+02) + (4.4396*PFH) + (-5.8158e-03*PFH^2) + (-11.83*RHD) + (2.1197e-06*PFH^3) + (39.297*TSD) + (0.13085*RT^2) + (-21.13*RT) + (-2.3969e-04*RT^3) + (0.12354*PFP)$	0.864	141.66

PAR: Radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). **RT:** Radiación total (W m^{-2}). **PFP:** Peso fresco de parte aérea (g). **PFH:** Peso fresco de hojas (g). **TAD:** Temperatura del aire diurna ($^{\circ}\text{C}$). **RHD:** Humedad relativa diurna (%). **TSD:** Temperatura del sustrato diurna ($^{\circ}\text{C}$). **RHN:** Humedad relativa nocturna (%). **TSN:** Temperatura del sustrato nocturna ($^{\circ}\text{C}$). **R² adj.:** Coeficiente de determinación ajustado. **SE:** Error estándar (ml día^{-1}). Nota: el subíndice mostrado después de cada ET corresponde a un modelo específico de regresión múltiple y sigue el orden que se presentó en la metodología.

Tabla 2. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la transpiración (TR) del tomate durante el ciclo 2011.

Modelo	R ² adj.	SE
$TR_1 = (-8.727e+02) + (1.023*PFH) + (1.3473*PAR) + (39.221*TAD) + (-6.613e-02*PFP)$	0.727	218.37
$TR_2 = (3.9163e+03) + (6.6738e-02*PAR*TAD) + (0.27117*TSD*PFH) + (-4.068e+02*TSD) + (7.008*TSD*TAD) + (-0.1337*TAD*PFH) + (3.5952e-04*RT*PFP) + (-3.2965e-02*RHD*PFH) + (26.134*RHD) + (-9.7497e-04*PAR*PFH)$	0.866	152.83
$TR_3 = (5.4405e+02) + (-4.9039e-05*TSD*PFH^2) + (8.4386e-02*TAD*PFH) + (1.1551e-03*TSD^2*PFP) + (-7.3665e-04*TAD*TSN*PFP) + (-1.8089e-02*TAD^2*RHD) + (-1.8671e-02*RT*TSD^2) + (5.1855e-04*RT*TSN*PFH) + (7.8775e-03*PAR*TSD*TAD) + (1.4619e-07*PFH^2*PFP) + (-4.0073e-06*PAR*PFH^2) + (1.2003e-02*TSD*TSN*RHN) + (-2.0328e-07*RHN*PFP^2) + (-2.2996e-03*TAD*TSN*PFH)$	0.891	138.30
$TR_4 = (5.4405e+02) + (-4.9039e-05*TSD*PFH^2) + (8.4386e-02*TAD*PFH) + (1.1551e-03*TSD^2*PFP) + (-7.3665e-04*TAD*TSN*PFP) + (-1.8089e-02*TAD^2*RHD) + (-1.8671e-02*RT*TSD^2) + (5.1855e-04*RT*TSN*PFH) + (7.8775e-03*PAR*TSD*TAD) + (1.4619e-07*PFH^2*PFP) + (-4.0073e-06*PAR*PFH^2) + (1.2003e-02*TSD*TSN*RHN) + (-2.0328e-07*RHN*PFP^2) + (-2.2996e-03*TAD*TSN*PFH)$	0.891	138.30
$TR_5 = (-1.718e+03) + (2.5801*PFH) + (1.7044e-03*PFH^2) + (4.6503e-03*RT^2) + (1.6448e-05*PFP^2) + (-10.92*RHD) + (2.3222e+02*TSD) + (-5.35*TSD^2)$	0.852	160.70
$TR_6 = (-1.096e+03) + (4.1801*PFH) + (-6.3703e-03*PFH^2) + (3.4838e-03*RT^2) + (2.4739e-06*PFH^3) + (0.41114*PFP) + (-11.03*RHD) + (1.2188e+02*TSD) + (-8.2529e-02*TSD^3) + (-3.719e-05*PFP^2)$	0.883	142.99

PAR: Radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). **RT:** Radiación total (W m^{-2}). **PFP:** Peso fresco de parte aérea (g). **PFH:** Peso fresco de hojas (g). **TAD:** Temperatura del aire diurna ($^{\circ}\text{C}$). **RHD:** Humedad relativa diurna (%). **TSD:** Temperatura del sustrato diurna ($^{\circ}\text{C}$). **RHN:** Humedad relativa nocturna (%). **TSN:** Temperatura del sustrato nocturna ($^{\circ}\text{C}$). **R² adj.:** Coeficiente de determinación ajustado. **SE:** Error estándar (ml día^{-1}). Nota: el subíndice mostrado después de cada TR corresponde a un modelo específico de regresión múltiple y sigue el orden que se presentó en la metodología.

Tabla 3. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la evapotranspiración (ET) del tomate durante el ciclo 2012.

Modelo	R ² adj.	SE
$ET_1 = (-1.387e+03) + (0.8373*PFH) + (2.12*RT) + (49.37*TAD) + (51.03*TAN) + (-0.0368*PFP) + (-35.86*TSN)$	0.897	156.55
$ET_2 = (482.83) + (1.06*TAD*TAN) + (4.3913e-02*TAD*PFH) + (-1.019e-03*RHN*PFP) + (1.72*RT)$	0.903	151.71
$ET_3 = (79.58) + (1.3706e-04*RT*TAN*PFH) + (1.0203e-03*TAD^2*PFH) + (-3.8441e-06*RT*PFH^2) + (-7.2104e-04*TSD^2*PFP) + (6.168e-02*RT*TAN) + (6.8707e-04*PFH^2) + (7.7454e-05*RT*TSD*PFP) + (-1.7629e-06*RT^2*PFP)$	0.914	142.62
$ET_4 = (157.62) + (2.461e-04*RT*TAN*PFH) + (4.684e-04*TAD^2*PFH) + (-4.7763e-06*RT*PFH^2) + (3.6029e-02*RT*TAN) + (4.8125e-07*PFH^3) + (1.5274e-03*RT*PFP) + (-3.7216e-06*TAN*PFP^2) + (-1.8517e-06*RT^2*PFP) + (-4.9778e-05*TSD*RHN*PFP) + (1.729e-06*TAD*PFP^2)$	0.920	138.31
$ET_5 = (-2267.68) + (93.6049e-02*PFH) + (1.74*RT) + (93.2263e-02*TAD^2) + (78.8126e-02*TAN^2) + (-6.5805e-06*PFP^2) + (-29.8924e-02*RHN^2) + (42.11*RHN)$	0.902	152.58
$ET_6 = (9521.33) + (75.4705e-02*PFH) + (1.65*RT) + (18.308e-03*TAD^3) + (712.954e-03*TAN^2) + (-2.1975e-09*PFP^3) + (-30.798e-07*RHN^3) + (6.47*RHN^2) + (-445.33*RHN) + (79.545e-03*PFP)$	0.910	146.60

RT: Radiación total (W m⁻²). **PFP:** Peso fresco de parte aérea (g). **PFH:** Peso fresco de hojas (g). **TAD:** Temperatura del aire diurna (°C). **TSD:** Temperatura del sustrato diurna (°C). **TAN:** Temperatura del aire nocturna (°C). **RHN:** Humedad relativa nocturna (%). **TSN:** Temperatura del sustrato nocturna (°C). **R² adj.:** Coeficiente de determinación ajustado. **SE:** Error estándar (ml día⁻¹). Nota: el subíndice mostrado después de cada ET corresponde a un modelo específico de regresión múltiple y sigue el orden que se presentó en la metodología.

Tabla 4. Modelos obtenidos a partir de regresión lineal múltiple para estimar la transpiración (TR) del tomate durante el ciclo 2012.

Modelo	R ² adj.	SE
$TR_1 = (-2.046e+03) + (46.37*TAD) + (983.959e-03*PFH) + (2.13*RT) + (40.44*TAN) + (-67.355e-03*PFP)$	0.877	168.62
$TR_2 = (581.56) + (2.20*TAD*TAN) + (42.758e-03*TSN*PFH) + (376.375e-03*RT*TSD) + (-1.003e-03*RHD*PFP) + (-3.70*TSD*TSN) + (-5.91*RT)$	0.896	155.06
$TR_3 = (-67.32) + (1.7992e-04*RT*TAN*PFH) + (7.6717e-04*TAD^2*PFH) + (-4.0229e-06*RT*PFH^2) + (1.2410e-03*RT*RHD*TAN) + (6.7933e-04*PFH^2) + (4.9100e-04*RT*PFP) + (-1.3111e-04*RHD*TAN*PFP)$	0.905	148.37
$TR_4 = (211.44) + (3.4140e-04*RT*TAN*PFH) + (-5.5810e-06*RT*PFH^2) + (8.3544e-07*PFH^3) + (7.6931e-06*RT*RHD*PFP) + (-2.0869e-04*RHD*TAN*PFP) + (-4.2611e-06*RHD*PFP*PFH) + (2.3334e-04*TAD*RHD*PFP)$	0.907	146.62
$TR_5 = (1798.21) + (-263.26*TAD) + (938.238e-03*PFH) + (2.13*RT) + (47.45*TAN) + (-8.1015e-06*PFP^2) + (5.86*TAD^2)$	0.888	161.28
$TR_6 = (1776.14) + (-259.75*TAD) + (912.75e-03*PFH) + (2.16*RT) + (47.22*TAN) + (-1.2938e-09*PFP^3) + (5.74*TAD^2)$	0.888	161.11

RT: Radiación total ($W m^{-2}$). **PFP:** Peso fresco de parte aérea (g). **PFH:** Peso fresco de hojas (g). **TAD:** Temperatura del aire diurna (°C). **RHD:** Humedad relativa diurna (%). **TSD:** Temperatura del sustrato diurna (°C). **TAN:** Temperatura del aire nocturna (°C). **TSN:** Temperatura del sustrato nocturna (°C). **R² adj.:** Coeficiente de determinación ajustado. **SE:** Error estándar ($ml día^{-1}$). Nota: el subíndice mostrado después de cada TR corresponde a un modelo específico de regresión múltiple y sigue el orden que se presentó en la metodología.

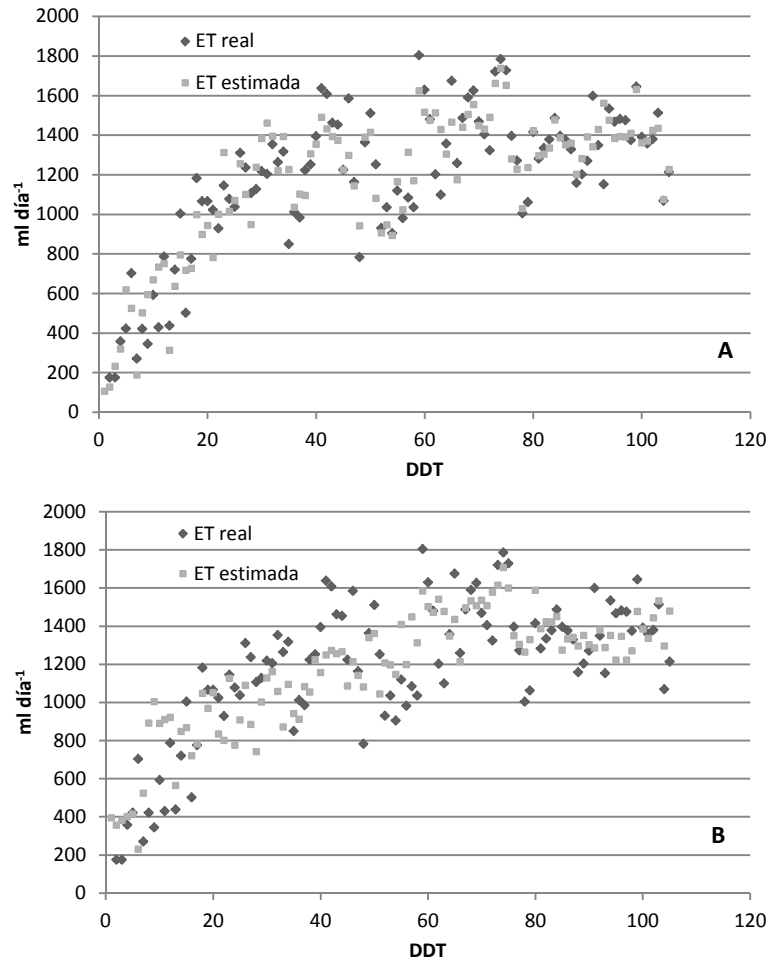


Figura 1. Comparación entre la evapotranspiración real (ET real) vs evapotranspiración estimada (ET estimada) por los modelos 6 (A) (R^2 adj.=0.864, SE=141.66) y 1 (B) (R^2 adj.=0.667, SE=221.48), correspondientes al ciclo 2011. DDT: Días después del trasplante.

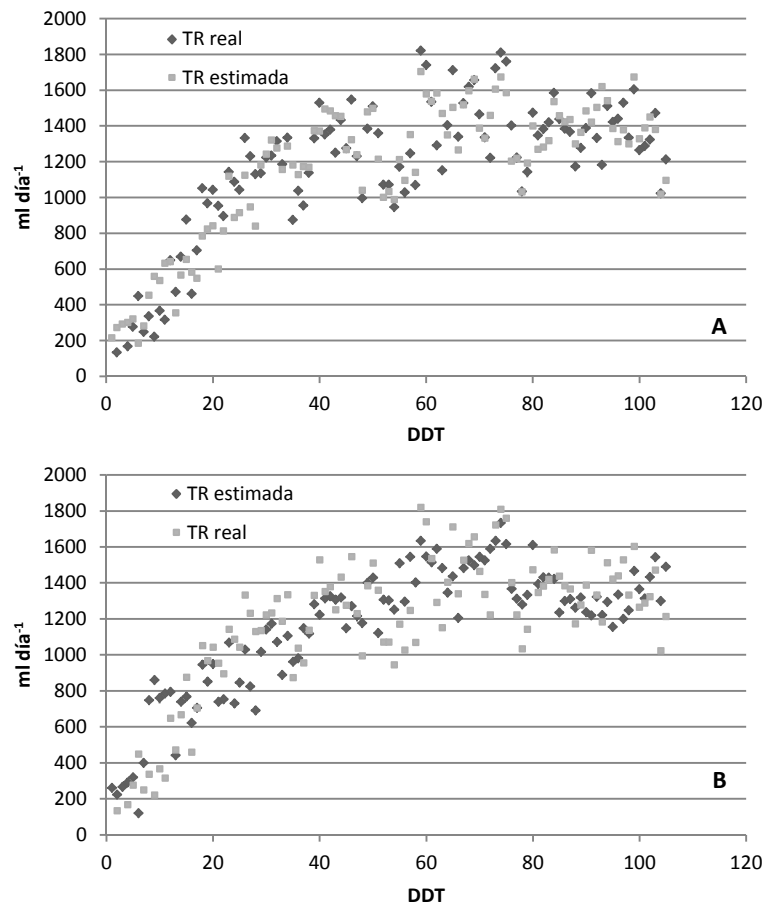


Figura 2. Comparación entre la transpiración real (TR real) vs transpiración estimada (TR estimada) por los modelos 4 (A) (R^2 adj.=0.891, SE=138.30) y 1 (B) (R^2 adj.=0.727, SE=218.37), correspondientes al ciclo 2011. DDT: Días después del trasplante.

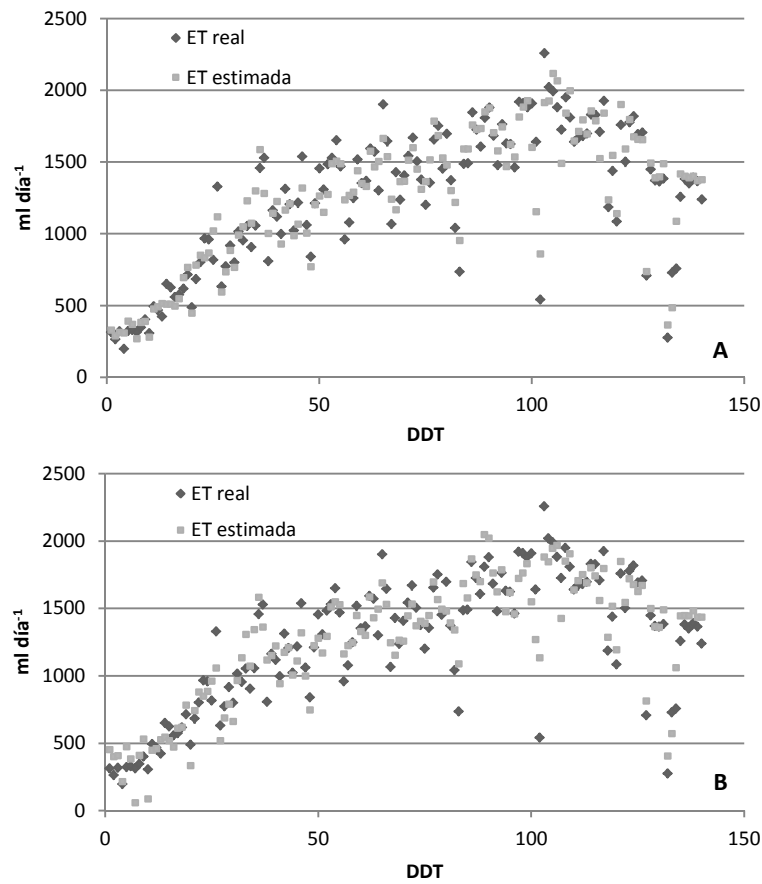


Figura 3. Comparación entre la evapotranspiración real (ET real) vs evapotranspiración estimada (ET estimada) por los modelos 4 (A) (R^2 adj.=0.920, SE=138.31) y 1 (B) (R^2 adj.=0.897, SE=156.55), correspondientes al ciclo 2012. DDT: Días después del trasplante.

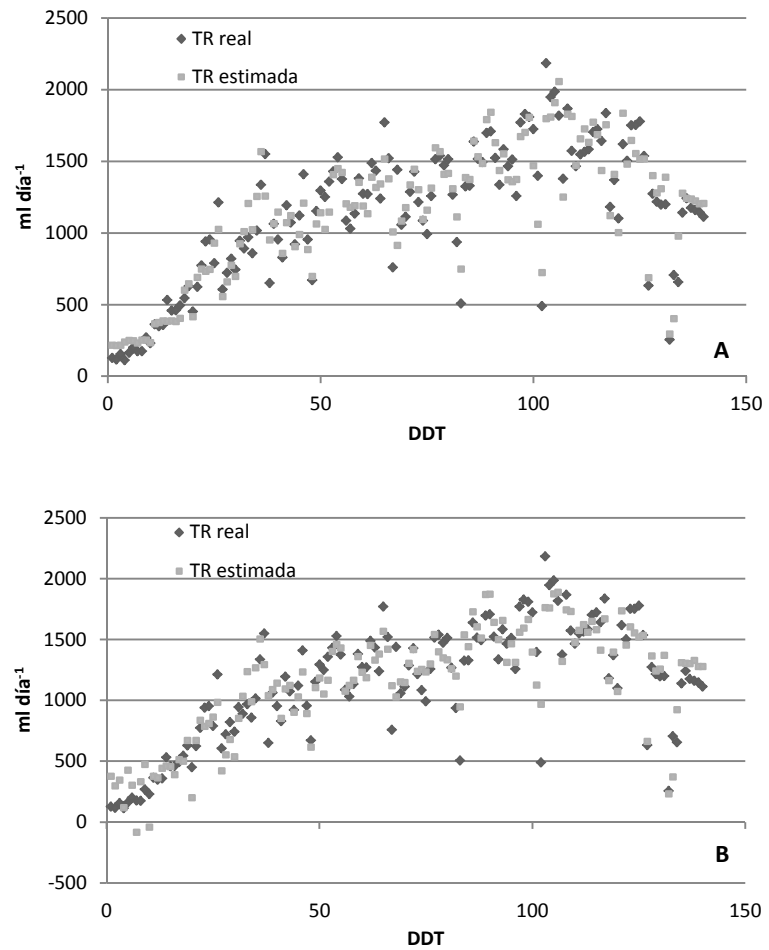


Figura 4. Comparación entre la transpiración real (TR real) vs transpiración estimada (TR estimada) por los modelos 4 (A) (R^2 adj.=0.907, SE=146.62) y 1 (B) (R^2 adj.=0.877, SE=168.62), correspondientes al ciclo 2012. DDT: Días después del trasplante.

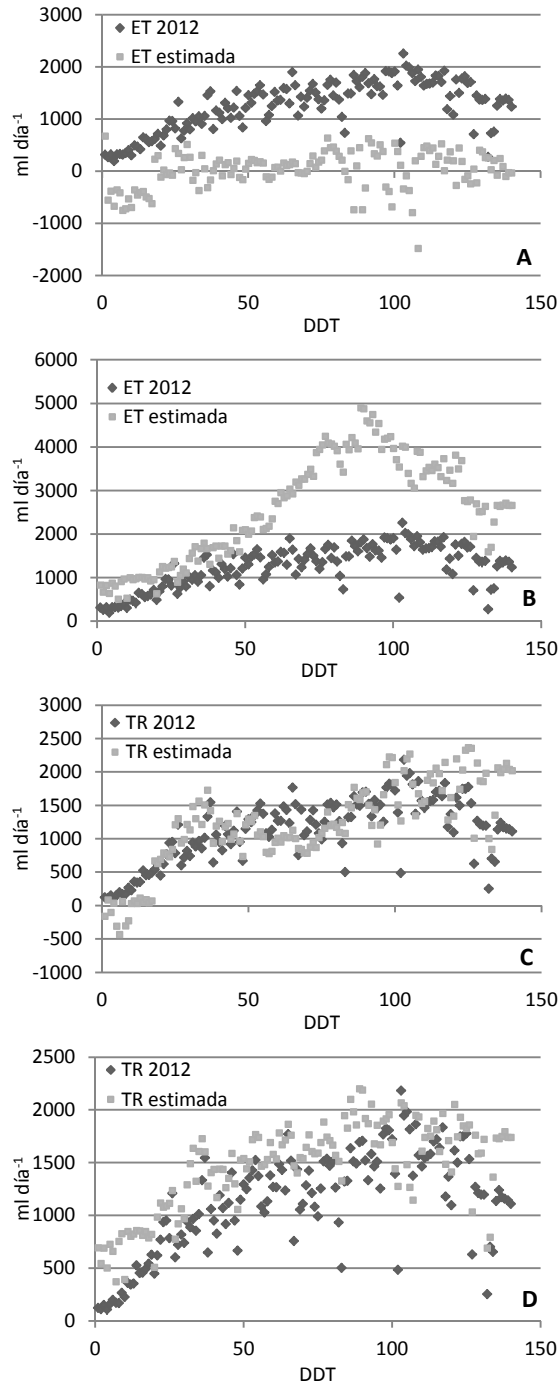


Figura 5. Comparaciones para el proceso de validación de los modelos obtenidos del ciclo 2011. Evapotranspiración real del ciclo 2012 (ET 2012) vs evapotranspiración estimada (ET estimada) por los modelos 6 (A) ($R=0.238$, $SE=349.99$) y 1 (B) ($R=0.819$, $SE=689.98$). Transpiración real del ciclo 2012 (TR 2012) vs transpiración estimada (TR estimada) por los modelos 4 (C) ($R=0.803$, $SE=385.07$) y 1 (D) ($R=0.895$, $SE=189.94$).

DDT: Días después del trasplante.

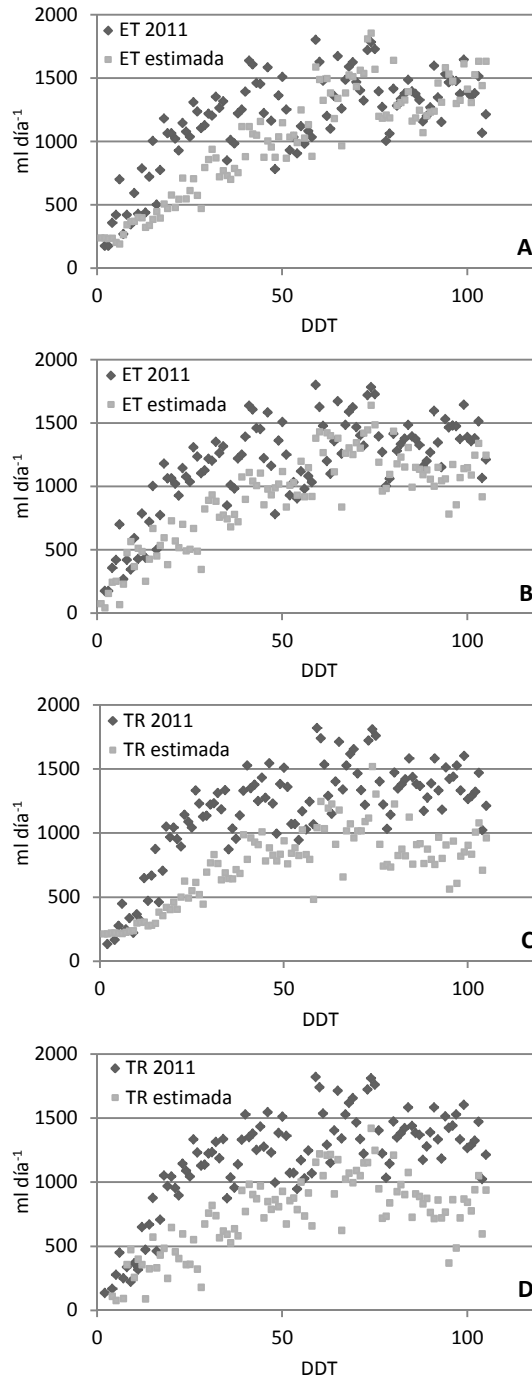


Figura 6. Comparaciones para el proceso de validación de los modelos obtenidos del ciclo 2012. Evapotranspiración real del ciclo 2011 (ET 2011) vs evapotranspiración estimada (ET estimada) por los modelos 4 (A) ($R=0.810$, $SE=257.91$) y 1 (B) ($R=0.811$, $SE=212.51$). Transpiración real del ciclo 2011 (TR 2011) vs transpiración estimada (TR estimada) por los modelos 4 (C) ($R=0.840$, $SE=159.02$) y 1 (D) ($R=0.822$, $SE=189.30$).

DDT: Días después del trasplante.

**V. MODELACIÓN DINÁMICA DEL CONTENIDO DE MINERALES EN
TOMATE DE INVERNADERO**

**DYNAMIC MODELING OF MINERAL CONTENTS IN GREENHOUSE
TOMATO CROP**

Antonio Juárez-Maldonado¹, Adalberto Benavides-Mendoza¹, América B. Morales-Díaz², Karim de-Alba-Romenus^{1*}

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Saltillo, Coahuila, México.

*Corresponding author: kdealba@uaaan.mx

²CINVESTAV Saltillo, Robótica y Manufactura Avanzada, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

ABSTRACT

El tomate es la hortaliza más importante a nivel mundial, y la nutrición mineral de este cultivo se considera el segundo factor más importante después de la disponibilidad del agua. Por esta razón se deben utilizar técnicas como la

modelación matemática, que nos permitan diseñar estrategias para su manejo. Se desarrollaron dos ciclos de tomate con el fin de generar la información necesaria para validar y calibrar un modelo dinámico de crecimiento. Así mismo, durante el desarrollo del cultivo se realizaron análisis minerales para determinar el comportamiento de N, P, K, Ca, Mg y S en los diferentes órganos de la planta. Con esta información se generaron modelos de regresión para imitar el comportamiento de los minerales en las plantas de tomate. Los modelos de regresión se incluyeron en el modelo dinámico con el fin de simular dinámicamente el comportamiento de los minerales. Los resultados mostraron que el modelo de crecimiento simula adecuadamente las salidas peso de hojas y peso de frutos ($EF > 0.95$ e $Index > 0.95$), para las salidas hojas cosechadas y frutos cosechados la simulación fue menos eficiente ($EF < 0.90$ e $Index < 0.90$). La simulación de los minerales fue adecuada para N, P, K, y S ya que tanto el EF como el $index$ presentaron valores superiores a 0.95. En el caso del Ca y Mg las simulaciones presentaron índices menores a 0.90. Estos modelos pueden ser usados para la planificación del manejo del cultivo así como para diseñar estrategias de fertilización más adecuadas.

Keywords: *Lycopersicon esculentum*; mathematical modeling; simulation; crop growth; nutrition management.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de cultivos en invernaderos es de suma importancia ya que nos da una ventaja sobre la producción a cielo abierto considerando que se establece una barrera entre el ambiente externo y el cultivo, creando un microclima interno óptimo para el crecimiento de los cultivos que permite protegerlo de condiciones adversas [1], permitiendo controlar factores como la temperatura, radiación, concentración de CO₂, humedad relativa, etc. En México, el uso de invernaderos para la producción de hortalizas ha aumentado rápidamente en los últimos años, los datos más recientes muestran que en 2012 se llegó a 12000 ha de invernaderos, esto sin incluir otras 8 000 ha que corresponden a malla sombra y macrotúnel [2].

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es el cultivo hortícola más importante del mundo, éste se usa tanto en fresco como producto procesado [3,4,5,6]. En términos del área bajo producción el tomate va en segundo lugar después de la papa, pero ocupa el primer lugar como cultivo procesado [5]. En los últimos años, su producción mundial se ha incrementado en aproximadamente 10% debido a que para muchos países es una fuente significativa de vitaminas y minerales [6]. En México, de los principales cultivos que se producen en condiciones protegidas, el tomate ocupa el 70%, seguido por pimiento (16%) y pepino (10%) [2]. Aunado a esto, México es el principal exportador a nivel internacional, enviando el producto a Estados Unidos, Canadá y El Salvador, tan sólo en 2011 se produjeron 1872000 toneladas [7].

Para propiciar la máxima expresión del potencial productivo del tomate, es importante generar y aplicar prácticas de manejo del cultivo tendientes a aprovechar al máximo los insumos proporcionados [8]. En este sentido, a la nutrición mineral se le considera como el factor de producción más importante después de la disponibilidad del agua [8]. Aunque existen técnicas exitosas como el fertirriego, aún hay problemas con la dosificación de fertilizantes que deben aplicarse [9], ya que pocas veces se sigue un adecuado plan de fertilización que sea acorde a las necesidades reales de consumo de nutrientes del cultivo a lo largo de su ciclo de producción [8]. Entonces, prácticas como la fertilización deben ser definidas en función de las características propias de crecimiento del cultivo de interés [10], para lo que se ha propuesto usar la acumulación de materia seca para cuantificar la demanda nutrimental [9].

Considerando el actual escenario mundial que enfatiza la necesidad de adoptar prácticas agrícolas amigables con el medio ambiente para la producción sustentable de alimentos [5], se deben tomar en cuenta cuestiones como el impacto que tiene el uso excesivo de fertilizantes minerales [3,11], así como el hecho del incremento en el costo de estos y su disponibilidad en el futuro [4,5,11].

Los avances tecnológicos brindan técnicas novedosas como la simulación de cultivos bajo invernadero. Un modelo de simulación de crecimiento de un cultivo es la aplicación de análisis sistemáticos y tecnología computacional, la cual integra a investigadores de diferentes disciplinas como la fisiología del cultivo, ecología, agrometeorología y agricultura [12]. Así, los modelos matemáticos son una herramienta que nos permite mejorar el conocimiento actual sobre un sistema [13].

En la agronomía, y en particular en la horticultura, estos modelos de cultivos tienen aplicaciones como la predicción del rendimiento y manejo del cultivo, sistemas de apoyo para la toma de decisiones, control climático del invernadero, ambiente de la raíz, etc. [13]. Los modelos de cultivos proporcionan información cuantitativa a partir de la cual decisiones tales como el calendario de cultivos, riegos, fertilización, protección del cultivo, control del clima, etc., pueden ser tomadas a nivel de campo [14]. En la producción de hortalizas en ambientes protegidos los modelos son necesarios si uno desea realizar alguna optimización en la producción [14]. Aunque existen diversos estudios que involucran la modelación del crecimiento de tomate bajo invernadero [15,16], estos modelos no consideran las relaciones nutricionales para el manejo eficiente de la nutrición mineral de este cultivo, o se basan en las variaciones de la concentración de los minerales en la solución nutritiva recirculante o en el drenaje [17].

El objetivo del presente trabajo fue incorporar modelos del comportamiento de los nutrientes de mayor concentración a un modelo dinámico de crecimiento de tomate para estimar los requerimientos minerales por este cultivo que permitan manejar de forma más eficiente la aplicación de fertilización para disminuir los costos de producción además del impacto ambiental por el uso excesivo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Desarrollo del cultivo de tomate

Se cultivó tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), del híbrido “Caimán” de Enza Zaden® de fruto tipo bola y de hábito de crecimiento indeterminado, bajo un invernadero de tipo capilla con cubierta de policarbonato y control automático de temperatura. Esto se llevó a cabo durante los años 2011 y 2012, del 3 julio al 30 de octubre y del 6 de mayo al 23 de septiembre respectivamente, en la región norte de México. El cultivo se estableció en macetas de plástico de 19 L con una densidad de 3 plantas m⁻², en un sistema de cultivo sin suelo usando como sustrato una mezcla de perlita y *peat moss* en proporción 1:1. Se utilizó un sistema de riego dirigido con microtubín y goteros tipo estaca de alto flujo para cada maceta. Además se instalaron temporizadores automáticos para realizar cuatro riegos por día a diferentes horarios (8:00, 12:00, 16:00 y 20:00 hrs.). La cantidad de riego aplicada fue diferente para cada etapa fenológica aplicando 2.2 L por planta por día en las etapas de mayor consumo. La nutrición del cultivo se dio con la aplicación de solución Steiner [18] y manejando diferentes concentraciones de acuerdo a la etapa fenológica (25% al trasplante, 75% a partir de floración y 100% a partir de cuajado de fruto). El cultivo se manejó a un tallo y las plantas se limitaron en su crecimiento eliminando la yema apical a las 13 semanas después del trasplante (SDT). El arreglo experimental fue completamente al azar, considerando una planta como unidad experimental.

Considerando la cantidad de riego aplicada a las plantas en conjunto con la concentración de la solución Steiner para cada etapa fenológica, se determinó la aplicación total de los minerales de mayor concentración (N, P, K, Ca, Mg y S) durante el periodo de tiempo en que se desarrolló cada cultivo.

Se midieron las variables climáticas dentro del invernadero durante el desarrollo de ambos cultivos, para lo cual se usó un sensor de radiación fotosintéticamente activa (PAR) (LI-190) y un sensor de temperatura del aire (1400-101) conectados a un *datalogger* LI-1400 de LI-COR Inc. Además, para medir la concentración de CO₂ en el aire se utilizó un sensor incluido en un *datalogger* K-33 ELG de CO2meter©. La medición por los sensores se realizó cada 15 min y se almacenaron automáticamente en ambos *dataloggers* para su posterior descarga en una laptop.

Para determinar el crecimiento del cultivo se realizaron muestreos destructivos semanales de cuatro plantas de tomate; éstas se separaron en hojas, tallo y frutos y para cada una de esas partes se obtuvieron el peso fresco. Después de secar en horno de secado a 80°C durante 4 días se obtuvo el peso seco de las diferentes partes de la planta. Asimismo, se cuantificó el peso de todas las estructuras que fueron sujetas a poda en cada planta, así como el total de frutos cosechados, de los que se obtuvo también el peso fresco y seco.

Los minerales de mayor concentración (N, P, K, Ca, Mg y S) en el tomate se determinaron en los diferentes órganos de la planta (hoja, tallo, fruto y raíz) y en diferentes etapas de desarrollo de la planta. Para la determinación del nitrógeno se utilizó el método macro Kjeldhal y para el resto de los minerales se utilizó espectrofotometría conforme a las técnicas estándar [19].

2.2 Descripción del modelo de crecimiento de tomate

Se usó el modelo dinámico de crecimiento de tomate propuesto por [20], el cual inicia a partir de la floración del cultivo y consta de seis variables de estado: balance de masas para el búfer de asimilados (B), peso seco de fruto (W_F), peso seco de hoja (W_L), etapa de desarrollo de la planta (D_p), peso seco de frutos cosechados (W_{HF}) y peso seco de hojas cosechadas (W_{HL}). Las ecuaciones correspondientes se describen a continuación:

$$\frac{dB}{dt} = P_g - b \left(f g_F W_F + v g_L \frac{W_L}{z} \right) - bR \quad (1)$$

$$\frac{dW_F}{dt} = b g_F W_F - (1 - b)r_F W_F - h_F W_F \quad (2)$$

$$\frac{dW_L}{dt} = b g_L W_L - (1 - b)r_L W_L - h_L W_L \quad (3)$$

$$\frac{dD_p}{dt} = d_1 + d_2 \ln \left(\frac{T_g}{d_3} \right) - d_4 t - h \quad (4)$$

$$\frac{dW_{HF}}{dt} = h_F W_F \quad (5)$$

$$\frac{dW_{HL}}{dt} = h_L W_L \quad (6)$$

En donde P_g es la fotosíntesis del cultivo, b es la función del buffer de cambio, g_F tasa de crecimiento relativo del fruto, g_L es la tasa de crecimiento relativo de hojas, R es la respiración del cultivo, r_F es la tasa de respiración del fruto, h_F es el coeficiente de cosecha del fruto, r_L es la tasa de respiración de las hojas, y h_L es el coeficiente de cosecha de las hojas.

Como entradas del modelo se utilizaron las variables climáticas medidas dentro del invernadero (temperatura, radiación fotosintéticamente activa (PAR) y

CO₂). Las salidas del modelo se expresan en peso por unidad de superficie sembrada y son: peso seco de hojas (g m⁻²), peso seco de frutos (g m⁻²), peso seco de hojas cosechadas (g m⁻²) y peso seco de frutos cosechados (g m⁻²). La descripción completa del modelo se presenta en [20] (**Figura 1**).

2.3 Calibración y validación del modelo de crecimiento de tomate

La calibración del modelo consistió en modificar los valores nominales de un subconjunto de parámetros. Estos parámetros son aquéllos resultantes de un análisis de sensibilidad y cuya modificación de valores afectará de manera más significativa el funcionamiento del modelo. La forma de hacer el ajuste es modificar los valores nominales de los parámetros del modelo y simular tomando como entradas el clima medido dentro del invernadero en el primer ciclo de cultivo hasta encontrar los valores que den el mejor ajuste entre las salidas simuladas vs. las observadas. Se seleccionaron varios parámetros que de acuerdo al análisis de sensibilidad realizado por [20] son los que afectan de manera más significativa al modelo, además de algunos que influyen en diversas características propias de cada variedad de tomate [8]. Para éstos se probaron diferentes valores hasta que se encontraron los que proporcionaron los resultados más adecuados comparando las salidas del modelo con los datos reales obtenidos del primer ciclo de cultivo (2011) de tomate.

Para la validación del modelo se tomaron los datos climáticos del segundo ciclo de cultivo como entradas del modelo. Las salidas del mismo se compararon con los datos reales obtenidos del segundo ciclo de cultivo (2012). Para conocer la eficiencia de la simulación tanto de la calibración como de la validación se emplearon

los índices “*EF*” e “*Index*” propuestos por [21], éstos varían entre 0-1, donde una eficiencia perfecta es igual a 1.

2.4 Modelación del contenido de minerales en el tomate

La demanda de nutrientes depende principalmente de la tasa de crecimiento de los diferentes órganos de la planta, por lo que los requerimientos máximos son equivalentes a los que presenta la planta cuando se desarrolla en un ambiente donde no existe limitación en la disponibilidad de nutrientes [22]. En este sentido, se consideraron como requerimientos máximos los valores determinados en el primer ciclo de cultivo del tomate. Para generar los modelos de la acumulación de los diferentes minerales evaluados en la planta de tomate se usaron técnicas de regresión simple. En estos se consideraron las mediciones reales del contenido de minerales en los diferentes órganos de la planta correspondientes al primer ciclo de cultivo (año 2011), así como el tiempo transcurrido a partir de la floración. Para cada órgano de la planta de tomate se generaron seis modelos de regresión, los cuales corresponden a cada uno de los seis minerales de mayor concentración (N, P, K, Ca, Mg y S). Todo el proceso de generación de modelos se realizó en el complemento Regress© (v. 2.21) para Excel.

Los modelos generados se incorporaron al modelo dinámico de crecimiento de tomate para simular el comportamiento de los minerales de manera dinámica, ya que, cuando no existe limitación en la disponibilidad de nutrientes, la concentración simulada para la planta será igual a su demanda [22]. Esto se hizo de la siguiente manera:

$$OMC = \frac{ODW * regression\ model}{100} \quad (7)$$

donde OMC es el contenido mineral por órgano ($g\ m^{-2}$) y ODW es el peso seco de cada órgano ($g\ m^{-2}$).

Dado que el modelo de crecimiento de tomate no incluye como salidas los pesos secos de tallo y raíz, ni el total de peso seco de hojas y frutos generados por el cultivo, estas se calcularon empleando las siguientes ecuaciones:

$$W_S = 0.3391 * TW_L - 0.5377 \quad (8)$$

$$W_R = TW_L * 0.6 \quad (9)$$

donde W_S es el peso seco de tallo ($g\ m^{-2}$) y W_R es el peso seco de la raíz ($g\ m^{-2}$).

Ambas ecuaciones se obtuvieron aplicando una regresión lineal.

$$TW_L = W_L + W_{HL} \quad (10)$$

$$TW_F = W_F + W_{HF} \quad (11)$$

donde TW_L es el peso seco total de hojas generadas ($g\ m^{-2}$) y TW_F es el peso seco total de frutos generados ($g\ m^{-2}$).

Para cuantificar el contenido total de mineral de la planta sólo se sumaron las cantidades de los diferentes órganos de la planta de tomate.

$$TMC = MCW_S + MCW_R + MCTW_L + MCTW_F \quad (12)$$

en donde TMC es el contenido total de mineral (g m^{-2}), MCW_S es el contenido de mineral en el tallo (g m^{-2}), MCW_R es el contenido de mineral en la raíz (g m^{-2}), $MCTW_L$ es el contenido mineral en las hojas (g m^{-2}), y $MCTW_F$ es el contenido mineral en el fruto (g m^{-2}).

Solamente el TMC fue considerado para la evaluación de las simulaciones de los seis minerales (N, P, K, Ca, Mg y S) (**Figura 1**). De manera análoga a la modelación del crecimiento de las plantas de tomate, para los minerales se usó el primer ciclo de cultivo (año 2011) para la calibración de los modelos y, el segundo ciclo de cultivo (año 2012) para la validación de los mismos. Todo el proceso de programación y simulación dinámica se realizó en Matlab© R2011a.

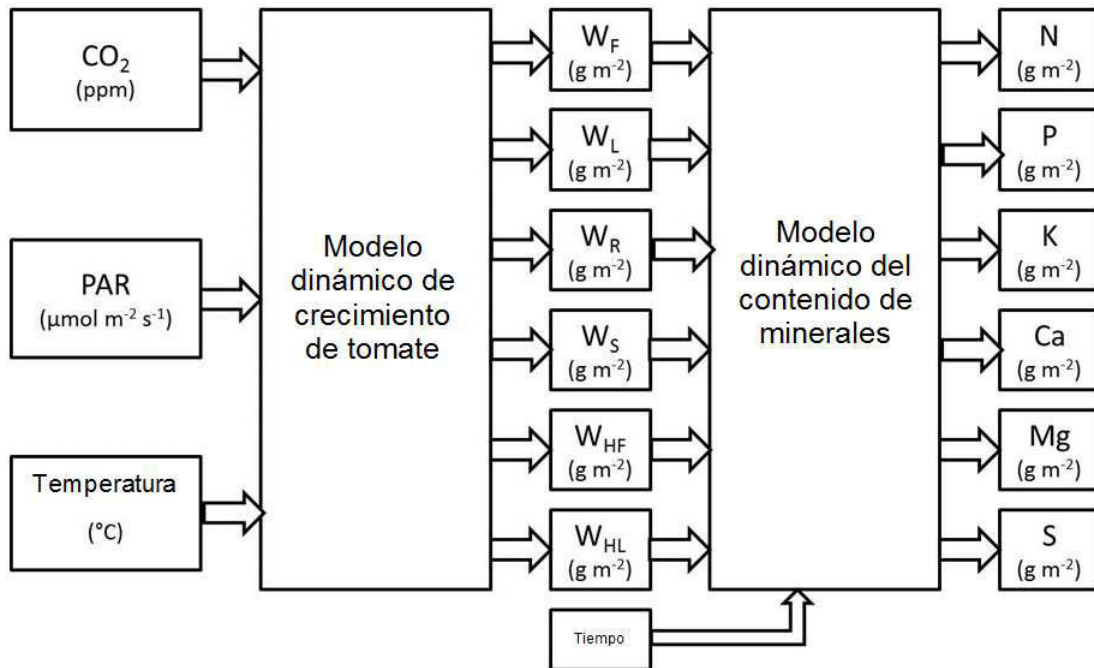


Figura 1. Diagrama de bloques de los modelos de crecimiento y contenido de minerales en tomate.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelación del crecimiento de tomate

Derivado del proceso de calibración se modificaron 11 parámetros del total de 27 con que cuenta el modelo de crecimiento de tomate. En la **Tabla 1** se presenta la evaluación realizada para las diferentes salidas del modelo. Se observó que a los 77 días después del trasplante (DAF) sólo el índice *EF* para la salida hojas cosechadas fue menor que 0.9 (0.8541), el resto de los valores fueron superiores para ambos índices. En general a los 84 y 91 DAF los índices son inferiores que a los 77 DAF, esto se debió a que por cuestiones de manejo, se limitó el crecimiento de las plantas a los 70 DAF, por lo que los valores de crecimiento reales disminuyeron mientras los simulados siguieron creciendo (**Figura 2**). En la **Tabla 2** se presentan los parámetros del modelo con sus valores nominales [20] y los valores generados por el proceso de calibración. Seis de estos parámetros se modificaron ligeramente, y el resto (*yL*, *mF*, *mL*, *f1* y *d4*) sufrieron modificaciones de mayor magnitud (**Tabla 2**). Es importante recalcar que estos parámetros difieren de los utilizados por [20] en su trabajo de calibración y validación. Estas diferencias se deben a dos factores principales: el clima de la región en que se desarrollaron los experimentos y el material vegetal utilizado.

Tabla 1. Relación de los índices usados para evaluar la eficiencia de simulación del modelo dinámico para las diferentes salidas en el proceso de calibración. *Días considerados para realizar la evaluación.

Frutos en planta Hojas en planta Frutos cosechados Hojas cosechadas

DAF*	EF	Index	EF	Index	EF	Index	EF	Index
77	0.9888	0.9971	0.9507	0.9873	0.9978	0.9995	0.8541	0.9671
84	0.9893	0.9972	0.9259	0.9816	0.6358	0.9412	0.8855	0.9714
91	0.9812	0.9950	0.8828	0.9717	0.4647	0.9233	0.9037	0.9775

Tabla 2. Descripción de los parámetros del modelo, valor nominal [20] y valor calibrado.

Parám etros	Valor nominal	Valor calibrado	Unid ades	Descripción
b1	2.7		$m^2 g^{-1}$	Coefficiente de la función del búfer de cambio
d1	2.13e-07		s^{-1}	Parámetro de la tasa de crecimiento
d2	2.47e-07		s^{-1}	Parámetro de la tasa de crecimiento
d3	20		$^{\circ}C$	Parámetro de la tasa de crecimiento
d4	7.50e-11	3.46e-13	-	Parámetro de la tasa de crecimiento
f	1.2		-	Cociente de requerimientos de asimilados del fruto
f1	8.10e-07	8.10e-06	s^{-1}	Coefficiente de tasa de crecimiento del fruto
f2	4.63e-06		s^{-1}	Coefficiente de tasa de crecimiento del fruto
m	2.511		-	Parámetro de la función corrección-LAI
Mf	1.16e-07	9.57e-08	s^{-1}	Coefficiente de respiración de

				mantenimiento del fruto
MI	2.89e-07	2.89e-09	s ⁻¹	Coficiente de respiración de mantenimiento vegetativo
p3	577		W m ⁻²	Parámetro de fotosíntesis neta
p4	221		g s ⁻¹ m ⁻²	Parámetro de fotosíntesis neta
Pm	2.25e-03	3.55e-03	g s ⁻¹ m ⁻²	Fotosíntesis máxima
QG	1		-	Temperatura de la tasa de crecimiento del fruto
QR	2		-	Respiración de mantenimiento
t	86400		S	Tiempo
TG	20		°C	Temperatura de referencia de la tasa de crecimiento
TR	25		°C	Temperatura de referencia para la respiración de mantenimiento
v	1.23	2.23	-	Cociente de requerimientos de asimilados vegetativos
v1	1.3774	0.45	-	Relación de crecimiento fruto vegetativo
v2	-0.168	-0.068	°C ⁻¹	Relación de crecimiento fruto vegetativo
v3	19	20	°C	Relación de crecimiento fruto vegetativo
WR	32.23		g m ⁻²	Parámetro de la función de corrección LAI

Yf	0.5983	1.9183	-	Parámetro del coeficiente de cosecha de fruto
Yl	0.5983	8.70e-08	-	Parámetro del coeficiente de cosecha de hoja
z	0.6081		-	Fracción de hoja del peso seco vegetativo

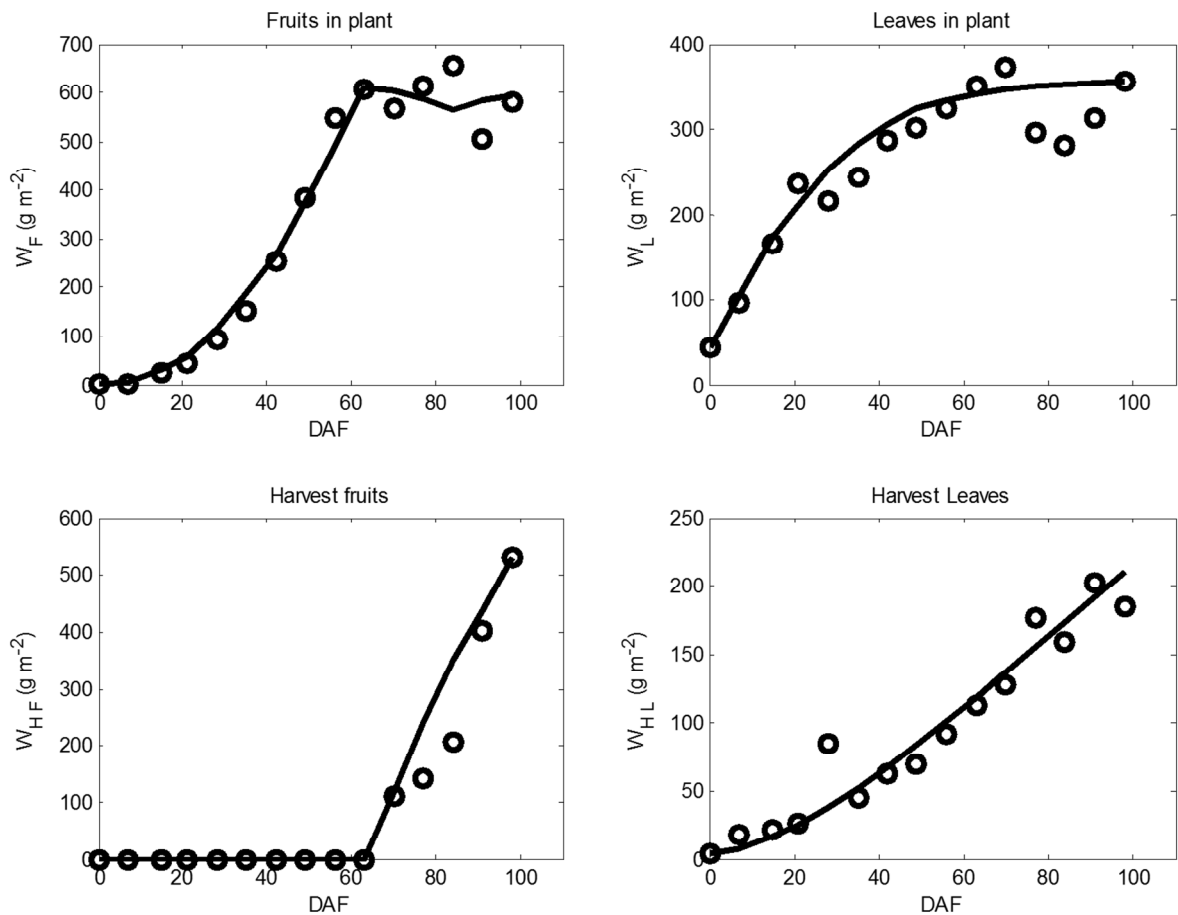


Figura 2. Gráficas de calibración de las salidas del modelo. Se comparan los datos reales obtenidos del ciclo 2011 (o) vs los datos simulados (-).

En la **Figura 2** se muestra la comparación de los datos reales obtenidos del ciclo de cultivo del año 2011 contra los datos resultantes de la simulación obtenida de la calibración. Se observa que el ajuste de las observaciones experimentales con respecto a la simulación es muy bueno, ya que, al realizar la evaluación con los índices “*EF*” e “*Index*” ambos mostraron un valor mayor que 0.95. Además, la salida del modelo W_{HL} presenta valores mayores a cero desde el inicio de la simulación (floración de las plantas de tomate) a diferencia de [20], que consideró el inicio de la poda de hojas del tomate a la par de la cosecha de frutos (**Figura 2**). Estas diferencias se deben al híbrido de tomate usado, ya que como se mencionó, cada material presenta características propias [8].

Para el proceso de validación del modelo de crecimiento de tomate, a diferencia del trabajo realizado por [20], aquí se utilizaron índices para evaluar la calidad de la simulación del modelo y determinar si ésta es aceptable. En el **Tabla 3**, se muestran los resultados obtenidos de dicha evaluación. Se observó que los dos índices usados (*EF* e *Index*) son superiores a 0.94 en las evaluaciones realizadas a los 77 y 84 días después de floración (DAF) para las salidas W_F , W_L y W_{HF} .

Tabla 3. Relación de los índices usados para evaluar la eficiencia de simulación del modelo dinámico para las diferentes salidas en el proceso de validación. *Días considerados para realizar la evaluación.

DAF*	Frutos en planta		Hojas en planta		Frutos cosechados		Hojas cosechadas	
	<i>EF</i>	<i>Index</i>	<i>EF</i>	<i>Index</i>	<i>EF</i>	<i>Index</i>	<i>EF</i>	<i>Index</i>
77	0.9724	0.9929	0.9516	0.9895	0.9917	0.9979	0.6489	0.9031

84	0.9647	0.9904	0.9467	0.9886	0.9593	0.9877	0.6320	0.8771
91	0.9676	0.9912	0.8907	0.9772	0.9679	0.9906	0.6350	0.8779

En la **Figura 3** se presenta la comparación gráfica de las cuatro salidas simuladas por el modelo de tomate contra los datos obtenidos del ciclo de cultivo correspondiente al año 2012. Se aprecia la buena calidad de la simulación hasta los 84 DAF para las salidas W_F , W_L y W_{HF} . La variable de salida W_{HL} , fue subestimada por el modelo, esto fue porque el manejo de las podas en el segundo ciclo de cultivo cambió debido a ciertos factores de estrés, lo que obligó a podar más de lo normal.

En la evaluación realizada a los 91 DAF, los mejores resultados los presentaron las salidas W_F y W_{HF} con valores $EF = 0.9676$, $Index = 0.9912$ y $EF = 0.9679$, $Index = 0.9906$ respectivamente. Caso contrario con las salidas W_L y W_{HL} donde el EF es <0.90 para ambos casos (**Tabla 3**). Estos resultados se deben, como ya se mencionó, a que el crecimiento de las plantas de tomate se limitó a los 70 DAF, generando como consecuencia que tanto la cantidad de hojas en la planta como las eliminadas de la misma disminuyeran a partir de esa fecha (**Figura 3**). Ya que el modelo está diseñado para hábito de crecimiento indeterminado, entonces la simulación obtenida por el mismo mantuvo el crecimiento mientras que los valores reales obtenidos del cultivo disminuyeron (**Figuras 2 y 3**). En el caso de los frutos no se observó la misma tendencia ya que al momento de limitar el crecimiento de la planta aún existían frutos pequeños e incluso flores, por lo que éstos siguieron creciendo con el tiempo y se continuó cosechando (**Figuras 2 y 3**).

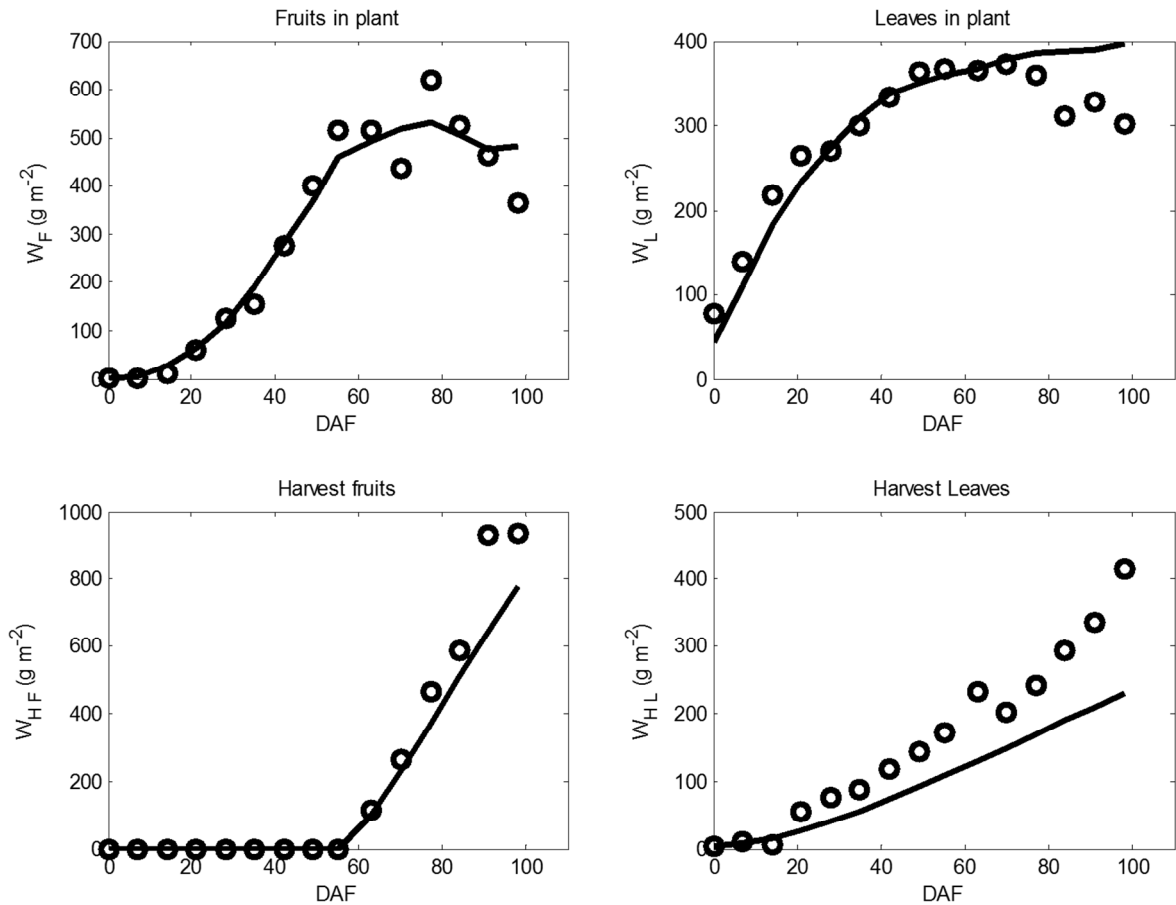


Figura 3. Gráficas de validación de las salidas del modelo. Se comparan los datos reales obtenidos del ciclo 2012 (o) vs los datos simulados (-).

3.2 Modelación de los minerales en las plantas de tomate

Derivado de las técnicas de regresión empleadas se generaron los modelos necesarios para imitar el comportamiento de los minerales en las plantas de tomate a través del tiempo. En la **Tabla 4** se presentan los 24 modelos de regresión generados para los seis minerales de mayor concentración (N, P, K, Ca, Mg y S) y para los cuatro órganos de las plantas de tomate (hoja, tallo, fruto y raíz). Se observó que 11 de los modelos generados son lineales, 10 son cuadráticos, 2 son cúbicos y sólo 1 de cuarto orden (**Tabla 4**). Estos resultados concuerdan con [22], ya que los

concentraciones de los minerales mostraron algún cambio ontogenético. En el caso particular del fruto, se observó que sólo el N presentó cambios en el tiempo, ya que el resto de los minerales (P, K, Ca, Mg y S) se mantuvieron prácticamente constantes (Tabla 4).

Tabla 4. Ecuaciones de regresión para la estimación del contenido de minerales en el tomate.

	Minerales	Modelo de regresión
Hoja	N	$y = 0.0027x^2 - 0.0959x + 2.7678$
	P	$y = -0.015x + 0.5504$
	K	$y = -0.0053x^2 + 0.0854x + 2.0369$
	Ca	$y = -0.0073x^2 + 0.1394x + 2.3713$
	Mg	$y = 0.0071x + 0.7181$
	S	$y = -0.0018x^2 + 0.0795x + 0.7042$
Tallo	N	$y = 0.0016x^3 - 0.0251x^2 + 0.0094x + 1.82$
	P	$y = 0.0003x + 0.4964$
	K	$y = 0.0016x^4 - 0.0396x^3 + 0.2968x^2 - 0.5476x + 2.0415$
	Ca	$y = -0.0023x^2 + 0.0447x + 0.9849$
	Mg	$y = 0.0005x^3 - 0.003x^2 - 0.0273x + 0.4775$
	S	$y = 0.0169x + 0.303$
Fruto	N	$y = -0.0119x^2 + 0.1305x + 1.6867$
	P	$y = -0.0042x + 0.3828$

	K	$y = 0.0023x + 1.9929$
	Ca	$y = 0.004x + 0.0878$
	Mg	$y = 0.0057x + 0.2273$
	S	$y = 0.0029x + 0.1566$
	N	$y = 0.0101x^2 - 0.2082x + 1.9307$
	P	$y = 0.0025x^2 - 0.044x + 0.391$
	K	$y = 0.0122x^2 - 0.2538x + 1.6305$
Raíz	Ca	$y = -0.0081x^2 + 0.1291x + 0.9659$
	Mg	$y = -0.0069x + 0.3373$
	S	$y = -0.0045x + 0.3488$

En la ecuación de regresión “y” representa el contenido del mineral expresado en % en base a peso seco del órgano; “x” representa el tiempo expresado en semanas a partir de la floración.

Después de incorporar los modelos de regresión generados para los minerales en el modelo dinámico de crecimiento de tomate, se realizó la comparación entre los datos simulados y los datos reales obtenidos del ciclo de cultivo correspondiente al año 2011. Los resultados de la eficiencia de simulación se presentan en la **Tabla 5**. Se observa que para todos los minerales ambos índices fueron superiores a 0.95, por lo que la eficiencia de simulación se considera muy buena. Aunque [22] realizaron modelación de nutrientes en pimiento, ellos presentan ningún tipo de índices para evaluar la eficiencia de simulación por su modelo.

Adicionalmente, se incluyeron los datos correspondientes al total de minerales aplicados al cultivo mediante la solución Steiner (**Figura 4**). Se puede observar en las gráficas presentadas en la **Figura 4** el buen ajuste entre los datos simulados por el modelo y los datos reales de los seis minerales en cuestión.

Tabla 5. Relación de los índices usados para evaluar la eficiencia de simulación del modelo dinámico para los minerales. Se presentan para los procesos de calibración y validación.

Minerales	Calibración		Validación	
	<i>EF</i>	<i>Index</i>	<i>EF</i>	<i>Index</i>
N	0.9931	0.9982	0.9991	0.9997
P	0.9549	0.9880	0.9736	0.9923
K	0.9654	0.9908	0.9815	0.9950
Ca	0.9949	0.9986	0.7523	0.9592
Mg	0.9611	0.9899	0.8963	0.9645
S	0.9806	0.9949	0.9695	0.9931

Para la validación de la modelación de los minerales (N, P, K, Ca, Mg y S) en las plantas de tomate se compararon los valores simulados contra los obtenidos del ciclo de cultivo realizado en el año 2012 (**Figura 5**). Los resultados de la eficiencia de simulación se presentan en la **Tabla 5**. En este caso se encontró que las simulaciones correspondientes a N, P, K y S presentaron muy buen ajuste ya que ambos índices empleados fueron superiores a 0.95. Esto se corrobora de manera gráfica en la **Figura 5**. En cuanto al Ca y Mg, el índice *EF* presentó valores de 0.75 y

0.89 respectivamente. Para el Ca, el modelo subestimó el contenido de este mineral, ya que los contenidos medidos en las plantas fueron superiores por aproximadamente 61% a los 98 días después del trasplante (DAT). Por el contrario, el contenido de Mg fue superestimado por el modelo por un 62% en el mismo periodo de tiempo (**Figura 5**). Estos resultados pueden ser debido a errores en la simulación del crecimiento y su reparto, en los diferentes órganos en la planta [22], ya que como se muestra en la **Tabla 3**, la eficiencia de simulación de las hojas cosechadas fue muy baja ($EF = 0.64$).

Aunque se ya se ha reportado el uso de simulación de la absorción de minerales en tomate, esta se basó en las variaciones de la concentración de los minerales en la solución nutritiva recirculante o en el drenaje usando una ecuación de balance de masas basada en el concepto de concentración de extracción de iones [17]. A diferencia de esto, en el presente trabajo se consideraron las concentraciones reales en los diferentes órganos de la planta de tomate.

Con los resultados presentados se pueden hacer ajustes en el manejo de la fertilización de las plantas de tomate en invernadero, ya que una forma de hacerlo es mediante la cuantificación diaria de la demanda nutrimental [9]. Esto nos ayudará a evitar déficit o excesos de nutrientes en las plantas de tomate, lo que a su vez disminuirá los costos de producción sin afectar la producción ni en cantidad ni en calidad. Además, al permitir que la simulación de los minerales esté en función del crecimiento propio del tomate, el cual a su vez depende del clima en que se desarrolla, nos permite diseñar prácticas de manejo que aumenten la productividad minimizando el impacto ambiental ocasionado por la actividad agrícola [10].

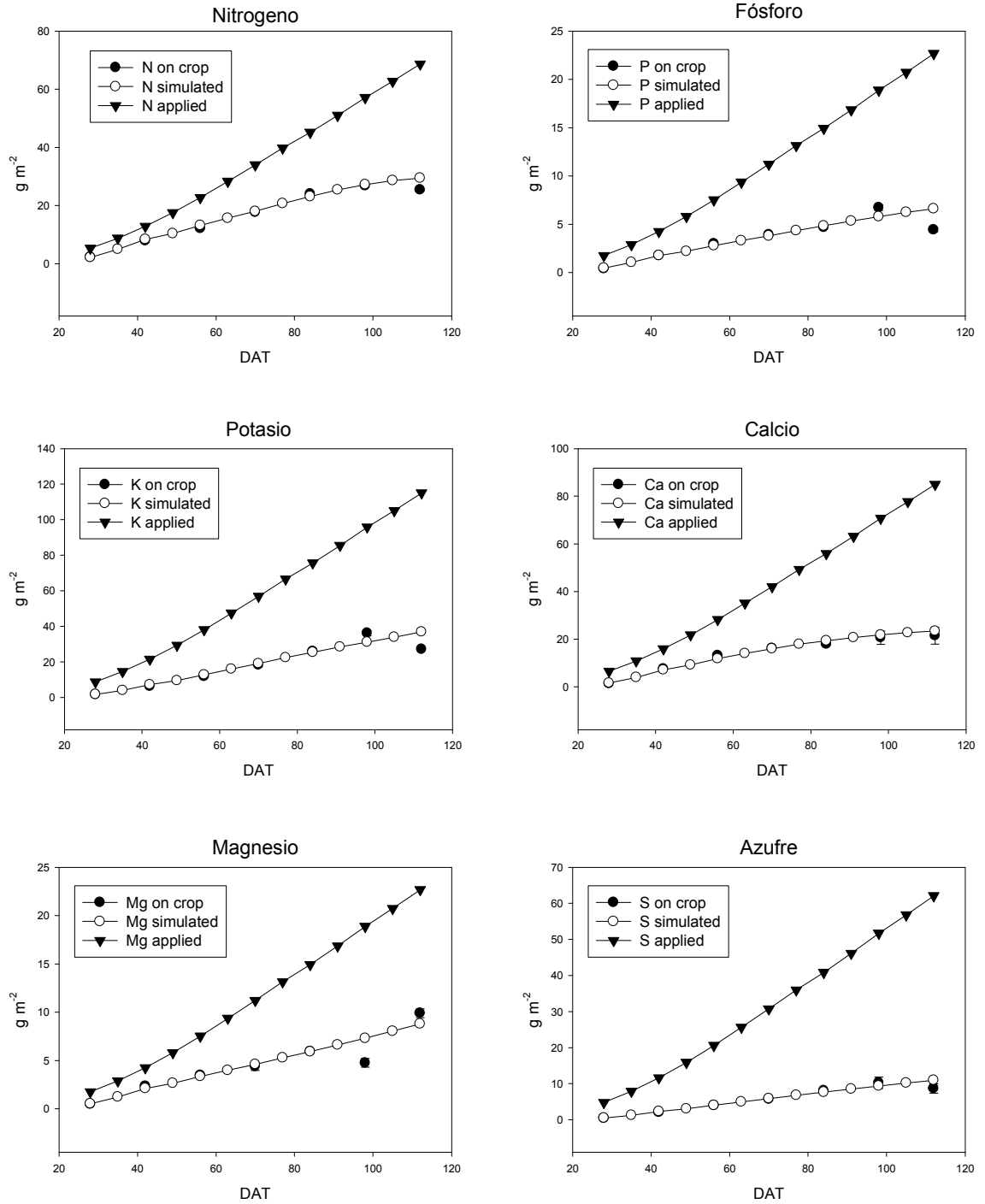


Figura 4. Gráficas de calibración de los contenidos de minerales en el tomate.

Además se incluye la cantidad de minerales reales aplicados mediante la solución

Steiner.

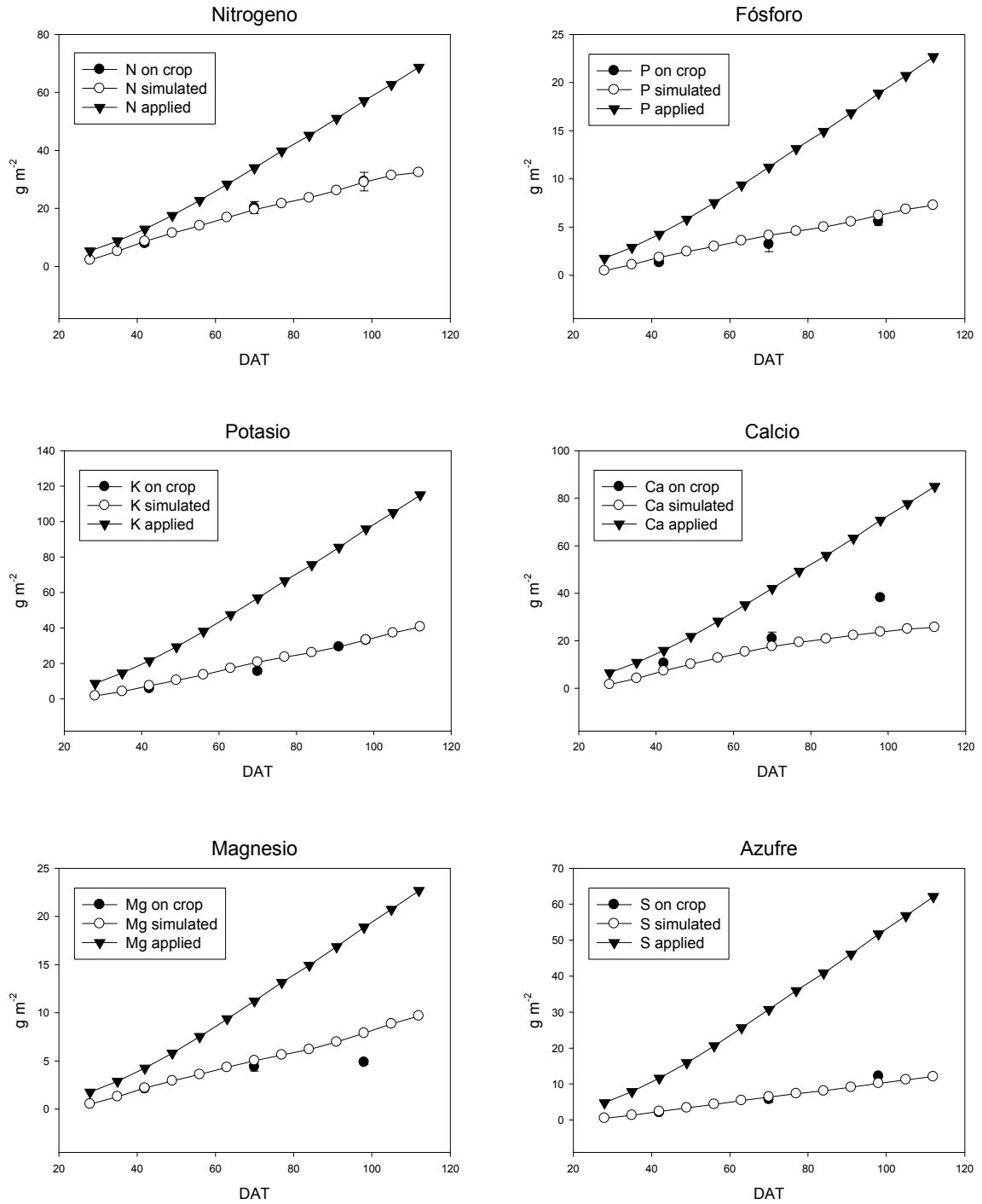


Figura 5. Gráficas de validación de los contenidos de minerales en el tomate.

Además se incluye la cantidad de minerales reales aplicados mediante la solución

Steiner.

En lo correspondiente a la aplicación real de los minerales a las plantas de tomate durante el tiempo en que se desarrollaron los cultivos, en las **Figuras 4 y 5** se presenta la comparación de estos datos contra los datos simulados y medidos en el cultivo. Adicionalmente, en la **Tabla 5** se presenta la relación entre la cantidad de minerales aplicados y el medido en las plantas de tomate durante ambos ciclos de cultivo. Se puede observar que el S es el mineral que más excesivamente se aplicó en ambos ciclos del cultivo de tomate, 7.17 veces en 2011 y 4.25 veces en 2012. El P fue el segundo más aplicado con 5.13 veces en 2011 y 3.39 veces en 2012. El N y Ca fueron los que se aplicaron en menor exceso en el ciclo 2012, con 1.95 y 1.86 veces respectivamente. Se debe considerar que aunque el S es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, se ha documentado que altas aplicaciones de éste disminuyen la concentración de Cu en la planta de tomate, mientras que en el suelo aumenta la salinidad [23].

Tabla 6. Cantidad de veces que se aplicaron los minerales de mayor concentración respecto al medido en las plantas de tomate durante los dos ciclos de cultivo evaluados.

	N	P	K	Ca	Mg	S
2011	2.70	5.13	4.23	3.97	2.29	7.17
2012	1.95	3.39	2.88	1.86	3.89	4.25

Estos resultados nos muestran que debemos considerar varias cuestiones muy importantes para la producción, como el incremento en el costo de los fertilizantes minerales y su disponibilidad en el futuro [4,5,11], así como el impacto en el medio ambiente que tiene el uso excesivo de estos [3,11]. En este sentido, las técnicas de

modelación propuestas en este trabajo pueden servir de apoyo en el manejo de la nutrición de las plantas de tomate. Las curvas de extracción permiten la demanda de nutrimentos de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo, por lo que se pueden usar para establecer programas de fertilización con el fin de maximizar su eficiencia [8]. Esto concuerda con [12], ya que el uso de estos modelos tiene un impacto significativo en los beneficios económicos y ecológicos.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se calibró y validó un modelo dinámico de crecimiento de tomate bajo condiciones de invernadero el cual puede ser empleado para diseñar estrategias más adecuadas para el manejo de este cultivo.

A partir de mediciones de las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y S en los diferentes órganos de las plantas de tomate se generaron modelos de regresión los cuales se incorporaron al modelo dinámico de crecimiento de tomate. Este modelo nos permite simular los requerimientos nutricionales por las plantas de tomate bajo condiciones de invernadero a partir de las condiciones climáticas existentes dentro del mismo. Este modelo puede ser usado como apoyo para el manejo de la fertilización mineral del tomate.

Con el uso de estas técnicas de modelación y simulación podemos minimizar el uso de fertilizantes para el cultivo de tomate en invernadero, ya que nos permiten estimar de manera muy precisa los requerimientos nutricionales del mismo. Esto nos genera como consecuencia una disminución de los costos de producción, además de

reducir el impacto ambiental por la aplicación excesiva de fertilizantes en el cultivo de tomate, todo esto sin afectar la producción y calidad del mismo.

REFERENCIAS

- [1] Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I.L., Ruiz-García, A. and Ramírez-Arias, A. (2012) Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4, 757-766.
- [2] SAGARPA, 2012. Agricultura Protegida 2012. Available in <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx> [26 January 2013].
- [3] Sepat, N.K., Kumar, A., Yadav, J. and Srivastava, R.B. (2012) Effect of integrated nutrient management on growth, yield and quality of tomato in trans Himalayan. Ann. Pl. Soil Res., 14(2), 120-123.
- [4] Gad, N. and Hassan, N.M.K. (2013) Role of cobalt and organic fertilizers amendments on tomato production in the newly reclaimed soil. World Applied Sciences Journal, 22(10), 1527-1533.
- [5] Mehdizadeh, M., Darbandi, E.I., Naseri-Rad, H. and Tobeh, H. (2013) Growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as influenced by different organic fertilizers. International Journal of Agronomy and Plant Production, 4(4), 734-738.

- [6] Shalaby, T.A. and El-Banna, A. (2013) Molecular and horticultural characteristics of *in vitro* induced tomato mutants. *Journal of Agricultural Science*, 5(10), 155-163.
- [7] MÉXICOPRODUCE, 2012. Productos: Jitomate. Available in <http://www.mexicoproduce.mx/productos.html#jitomate> [26 January 2013].
- [8] Quesada-Roldán, G. and Bertsh-Hernández, F. (2013) Obtaining of the absorption curve for the fb-17 tomato hybrid. *TERRA LATINOAMERICANA*, 31(1), 1-7.
- [9] Bugarín-Montoya, R., Galvis-Spinola, A., Sánchez-García, P. and García-Paredes, D. (2002) Daily accumulation of aboveground dry matter and potassium in tomato. *TERRA LATINOAMERICANA*, 20(4), 401-409.
- [10] Enriquez-Reyes, S.A., Alcántar-González, G., Castellanos-Ramos, J.Z., Suárez, E.A., González-Eguiarte, D. and Lazcano-Ferrat I. (2003) NUMAC-N Tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 1. Model description and parameters adjust. *TERRA LATINOAMERICANA*, 21(2), 167-175.
- [11] Basheer, M. and Agrawal, O.P. (2013) Effect of vermicompost on the growth and productivity of tomato plant (*Solanum lycopersicum*) under field conditions. *International Journal of Recent Scientific Research*, 4(3), 247-249.
- [12] Zhang, J. and Wang, S. (2011) Simulation of the canopy photosynthesis model of greenhouse tomato. *Procedia Engineering*, 16, 632-639.
- [13] Marcelis, L.F.M., Elings, A., Bakker, M.J., Brajeul, E., Dieleman, J.A., de Visser, P.H.B. and Heuvelink, E. (2006) Modelling dry matter production and partitioning in sweet pepper. *Acta Horticulturae*, 718, 121-128.

- [14] Gary, C. (1999) Modeling greenhouse crops: state of the art and perspectives. *Acta Horticulturae*, 495, 317-322.
- [15] De Gelder, A., Heuvelink, E. and Opdam, J.J.G. (2005) Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouses. *Acta Horticulturae*, 691, 549-552.
- [16] Marcelis, L.F.M., Elings, A. de Visser, P.H.B. and Heuvelink, E. (2009) Simulating growth and development of tomato crop. *Acta Horticulturae*, 821, 101-110.
- [17] Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Bibbiani, C., Carmassi, G., Malorgio, F. and Pardossi, A. (2011) Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environmental Modelling and Software*, 26, 711-722.
- [18] Steiner, A.A. (1961) A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*, 15, 134-154.
- [19] AOAC (1980) Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemists. Washington DC, USA. 1018 pp.
- [20] Tap, R.F. (2000) Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD. Dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- [21] Wallach, D. (2006) Evaluating crop models. In: Wallach, D., Makowski, D. and Jones, J.W., Working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parameterization and applications, Elsevier, The Netherlands, 11-54.

- [22] Marcelis, L.F.M., Brajeul, E., Elings, A., Garate, A. and Heuvelink, E. (2005) Modelling nutrient uptake of sweet pepper. *Acta Horticulturae*, 691, 285-292.
- [23] Orman, S. (2012) Effects of elemental sulphur and farmyard manure applications to calcareous saline clay loam soil on growth and some nutrient concentrations of tomato plants. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(2), 720-725.

VI. CONCLUSIONES GENERALES

Se presentó un análisis de crecimiento de tomate en invernadero en el que se generaron las curvas de crecimiento de los diferentes órganos de la planta. El cultivo de tomate presentó dos etapas de crecimiento bien definidas, una exponencial en las primeras cuatro semanas después del trasplante y la otra lineal a partir de la cuarta semana. Adicionalmente, cuando se detiene el crecimiento del cultivo, se presenta una etapa más con tendencia decreciente en frutos y hojas.

Se demostró que existe una alta correlación entre los pesos frescos y secos de los diferentes órganos de la planta. Además se encontró también correlación entre los diferentes órganos de la planta en las etapas de crecimiento exponencial y lineal.

Además, se generaron modelos de regresión múltiple para estimar la evapotranspiración y transpiración de las plantas de tomate bajo condiciones de invernadero. Estos modelos son fáciles de utilizar por la naturaleza de las variables climáticas que se usan como entradas de los mismos. Por dicha razón, los modelos obtenidos permiten la estimación de la evapotranspiración y transpiración a partir de diferentes variables y no del total de variables evaluadas, proporcionando herramientas útiles aplicables en diferentes escenarios.

La eficacia mostrada por los modelos de regresión generados permite determinar los requerimientos hídricos diarios por las plantas de tomate, por lo que pueden ser usados para diferentes fines como calendarizar los riegos, eficiencia en el uso del agua en el cultivo de tomate, evitar excesos de aplicación de agua de riego lo que disminuirá a su vez el riesgo de incidencia de enfermedades, entre otros.

Finalmente, en este trabajo se calibró y validó un modelo dinámico de crecimiento de tomate bajo condiciones de invernadero el cual puede ser empleado para diseñar estrategias más adecuadas para el manejo de este cultivo.

A partir de mediciones de las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg y S en los diferentes órganos de las plantas de tomate se generaron modelos de regresión los cuales se incorporaron al modelo dinámico de crecimiento de tomate. Este modelo nos permite simular los requerimientos nutricionales por las plantas de tomate bajo condiciones de invernadero a partir de las condiciones climáticas existentes dentro del mismo. Este modelo puede ser usado como apoyo para el manejo de la fertilización mineral del tomate.

Con el uso de estas técnicas de modelación y simulación podemos minimizar el uso de fertilizantes y agua para el cultivo de tomate en invernadero, ya que nos permiten estimar de manera muy precisa los requerimientos hídricos y nutricionales del mismo. Esto nos genera como consecuencia una disminución de los costos de producción, además de reducir el impacto ambiental por la aplicación excesiva de fertilizantes en el cultivo de tomate, todo esto sin afectar la producción y calidad del mismo.

VII. LITERATURA CITADA

- Abreu, P., y J.F. Meneses. 2000. TOMPOUSSE, a model of yield prediction for tomato crops: calibration study for unheated plastic greenhouses. *Acta Horticulturae* 519: 141-149.
- Alkaeed, O.A, K. Jinno y A. Tsutsumi. 2007. Estimation of evapotranspiration in Itoshima area Japan by the FAO56-PM method. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University* 67(2): 53-64.
- Baptista, F.J., B.J. Bailey y J.F. Meneses. 2005. Measuring and modeling transpiration versus evapotranspiration of a tomato crop grown on soil in a Mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae* 691: 313-320.
- Basheer, M. y O.P. Agrawal. 2013. Effect of vermicompost on the growth and productivity of tomato plant (*Solanum lycopersicum*) under field conditions. *International Journal of Recent Scientific Research* 4(3): 247-249.
- Blanco, F.F. y M.V. Folegatti. 2003. Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 7(2): 285-291.
- Boulard, T. y S. Wang. 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 100: 25-34.

- Bugarín-Montoya, R., A. Galvis-Spinola, P. Sánchez-García y D. García-Paredes. 2002. Daily accumulation of aboveground dry matter and potassium in tomato. *TERRA LATINOAMERICANA* 20(4): 401-409.
- Casierra-Posada, F., M.C. Cardozo y J.F. Cárdenas-Hernández. 2007. Growth analysis of tomato fruits (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivated in greenhouse. *Agronomía Colombiana*. 25(2): 299-305.
- Chamont, S. 1993. Modelling dry matter allocation in cucumber crops competition between fruits and roots. *Acta Horticulturae* 328: 195-203.
- Chatterjee, R., J.C. Jana y P.K. Paul. 2013. Vermicompost substitution influences shelf life and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *American Journal of Agricultural Science and Technology* 1: 69-76.
- Chaturvedi, S. y A. Kumar. 2012. Bio-diesel waste as tailored organic fertilizer for improving yields and nutritive values of *Licopercicum esculatum* (tomato) crop. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 12(4): 801-810.
- Cheeroo-Nayamuth, B.F. 1999. Crop modeling/simulation: an overview. *Proceedings of AMAS* 11-26.
- Cordova, J.J. y W. Yu. 2009. Stable Fourier neural networks with application to modeling lettuce growth. *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks* 591-596.
- Dai, J., W. Luo, Y. Li, C. Yuan, Y. Chen y J. Ni. 2006. A simple model for prediction of biomass production and yield of three greenhouse crops. *Acta Horticulturae* 718: 81-88.

- De Gelder, A., E. Heuvelink y J.J.G. Opdam. 2005. Tomato yield in a closed greenhouse and comparison with simulated yields in closed and conventional greenhouses. *Acta Horticulturae* 691: 549-552.
- Dimokas, G., C. Kittas y M. Tchamitchian. 2008. Validation of a tomato crop simulator for mediterranean greenhouses. *Acta Horticulturae* 797: 247-252.
- Enriquez-Reyes, S.A., G. Alcántar-González, J.Z. Castellanos-Ramos, E.A. Suárez, D. González-Eguiarte e I. Lazcano-Ferrat. 2003. NUMAC-N Tomato: Mineral nutrition fit at growth. The nitrogen nutrition in tomato greenhouse production. 1. Model description and parameters adjust. *TERRA LATINOAMERICANA* 21(2): 167-175.
- Flores, J., W. Ojeda-Bustamante, I. López, A. Rojano e I. Salazar. 2007. Water requirements for greenhouse tomato. *TERRA LATINOAMERICANA* 25(2): 127-134.
- Fynn, R.P., W.L. Roller y H.M. Keener. 1989. A decision model for nutrition management in controlled environment agriculture. *Agricultural Systems* 31: 35-53.
- Gad, N. y N.M.K. Hassan. 2013. Role of cobalt and organic fertilizers amendments on tomato production in the newly reclaimed soil. *World Applied Sciences Journal* 22(10): 1527-1533.
- Gallardo, M., R.L. Snyder, K. Schulbach y L.E. Jackson. 1996. Crop growth and water use model for lettuce. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 354-359.

- Gary, C. 1999. Modeling greenhouse crops: state of the art and perspectives. *Acta Horticulturae* 495: 317-322.
- Gary, C., J.W. Jones y M. Tchamitchian. 1998. Crop modeling in horticulture: state of the art. *Scientia Horticulturae* 74: 3-20.
- Gijzen, H., E. Heuvelink, H. Challa, L.F.M. Marcelis, E. Dayan, S. Cohen y M. Fuchs. 1998. HORTISIM: A model for greenhouse crops and greenhouse climate. *Acta Horticulturae* 456: 441-450.
- Harmanto, V.M. Salokhe, M.S. Babel y H.J. Tantau. 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management* 71: 225-242.
- Hazra, A., K. Deb, S. Kundu, y P. Hazra. 2013. Shape oriented feature selection for tomato plant identification. *International Journal of Computer Applications Technology Research* 2(4): 449-454.
- Heuvelink, E. 1995. Dry matter production in a tomato crop: Measurements and simulation. *Annals of Botany* 75: 369-379.
- Heuvelink, E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany* 77: 71-80.
- Heuvelink, E. 1999. Evaluation of a dynamic simulation model for tomato crop growth and development. *Annals of Botany* 83: 413-422.
- Heuvelink, E. y L.F.M. Marcelis. 1989. Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Horticulturae* 260: 149-157.
- Heuvelink, E. y R.P.M. Buiscool. 1995. Influence of sink-source interaction on dry matter production in tomato. *Annals of Botany* 75: 381-389.

- Higashide, T., M. Takaichi y H. Shimaji. 2000. Modeling of cucumber growth using the L-system. *Acta Horticulturae* 519: 43-51.
- Hussain, S.I., P. Hadley y S. Pearson. 2008. A validated mechanistic model of carrot (*Daucus carota* L.) growth. *Scientia Horticulturae* 117: 26-31.
- Hyun, J.L., J. Goudriaan y H. Challa. 2003. Using the expolinear growth equation for modelling crop growth in year-round cut chrysanthemum. *Annals of botany* 92: 697-708.
- Jones, J.W. 1998. Model integration and simulation tools. *Acta Horticulturae* 456: 411-418.
- Kahlen, K. 2006. 3D architectural modelling of greenhouse cucumber (*Cucumis melo* L.) using L-systems. *Acta Horticulturae* 718: 51-58.
- Kano, A., y C.H.M. Van Bavel. 1988. Design and test of a simulation model of tomato growth and yield in a greenhouse. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 56(4): 408-416.
- Ko, J., G. Piccinni, W. Guo y E. Steglich. 2009. Parameterization of EPIC crop model for simulation of cotton growth in south Texas. *Journal of Agricultural Science* 147: 169-178.
- Lee, B.W. y J.H. Shin. 1998. Optimal irrigation management system of greenhouse tomato based on stem diameter and transpiration monitoring. *Agricultural Information Technology in Asia and Oceania* 87-90.
- Liebig, H.P. 1989. Model of cucumber growth and prediction of yields. *Acta Horticulturae* 248: 187-191.
- Lin, W.C. 2002. Crop modeling and yield prediction for greenhouse-grown lettuce. *Acta Horticulturae* 593: 159-164.

- Lin, W.C. 2004. Modelling the colouration of greenhouse peppers. *Acta Horticulturae* 654: 31-36.
- Lopes, S.J., D.D. Neto, P.A. Manfron y L.R. Jasniewicz. 2004. Models to estimate phytomass accumulation of hydroponic lettuce. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 61(4): 392-400.
- López-Cruz, I.L. 2003. Modelación matemática de hortalizas en invernadero. Curso Internacional de Invernaderos. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo México.
- López-Cruz, I.L. 2004. Introducción a la simulación de crecimiento y desarrollo de cultivos usando Fortran Simulation Translator (FST). Primer Congreso Nacional de Fenología Agrícola y Modelos de Simulación Aplicados a la Agricultura. Chapingo, México.
- López-Cruz, I.L., A. Ramírez-Arias y A. Rojano-Aguilar. 2004. Análisis de sensibilidad de un modelo dinámico de crecimiento para lechugas (*Lactuca sativa* L.) cultivadas en invernadero. *Agrociencia* 38: 613-624.
- López-Cruz, I.L., A. Ramírez-Arias y A. Rojano-Aguilar. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 11(2): 257-267.
- López-Cruz, I.L., L.G. Van Willigenburg y G. Van Straten. 2003. Optimal control of nitrate in lettuce by a hybrid approach: differential evolution and adjustable control weight gradient algorithms. *Computers and Electronics in Agriculture* 40: 179-197.

- Marcelis, L.F.M. 1994. A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany* 74: 43-52.
- Marcelis, L.F.M., A. Elings, M.J. Bakker, E. Brajeul, J.A. Dieleman, P.H.B. de Visser y E. Heuvelink. 2006. Modelling dry matter production and partitioning in sweet pepper. *Acta Horticulturae* 718: 121-128.
- Marcelis, L.F.M., A. Elings, P.H.B. de Visser y E. Heuvelink, E. 2009. Simulating growth and development of tomato crop. *Acta Horticulturae* 821: 101-110.
- Marcelis, L.F.M., E. Brajeul, A. Elings, A. Garate y E. Heuvelink. 2005. Modelling nutrient uptake of sweet pepper. *Acta Horticulturae* 691: 285-292.
- Marcelis, L.F.M., E. Heuvelink y A.N.M. de Koning. 1989. Dynamic simulation of dry matter distribution in greenhouse crops. *Acta Horticulturae* 248: 269-276.
- Marcelis, L.F.M. y E. Heuvelink. 1999. Modelling fruit set, fruit growth and dry matter partitioning. *Acta Horticulturae* 499: 39-49.
- Marcelis, L.F.M. y H. Gijzen. 1998. A model for prediction of yield and quality of cucumber fruits. *Acta Horticulturae* 476: 237-242.
- Martínez-Ruiz, A., I.L. López-Cruz, A. Ruiz-García y Ramírez-Arias. 2012. Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4: 757-766.
- Massa, D., L. Incrocci, R. Maggini, C. Bibbiani, G. Carmassi, F. Malorgio y A. Pardossi. 2011. Simulation of crop water and mineral relations in

greenhouse soilless culture. *Environmental Modelling and Software* 26: 711-722.

Mehdizadeh, M., E.I. Darbandi, H. Naseri-Rad y H. Tobeh. 2013. Growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as influenced by different organic fertilizers. *International Journal of Agronomy and Plant Production* 4(4): 734-738.

Metselaar, K. 1999. Auditing predictive models: a case study in crop growth. Wageningen :proefschrift. En: López-Cruz, I. L. 2004. Introducción a la simulación de crecimiento y desarrollo de cultivos usando Fortran Simulation Translator (FST). Primer Congreso Nacional de Fenología Agrícola y Modelos de Simulación Aplicados a la Agricultura. Chapingo, México.

MÉXICOPRODUCE, 2012. Productos: Jitomate. Available in <http://www.mexicoproduce.mx/productos.html#jitomate> [26 January 2013].

Monte, J.A., D.F. de Carvalho, L.O. Medici, L.D.B. da Silva, y C. Pimentel. 2013. Growth analysis and yield of tomato crop under different irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17(9): 926-931.

Nederhoff, E.M., H. Gijzen y J. Vegter. 1989. A dynamic simulation model for greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.): validation of the submodel for crop photosynthesis. *Acta Horticulturae* 248: 255-263.

- Nederhoff, E.M. y J.G. Vegter. 1994. Canopy photosynthesis of tomato, cucumber and sweet pepper in greenhouses: measurements compared to models. *Annals of Botany* 73: 421-427.
- Ngouajio, M., W. Kirk y R. Goldy. 2003. A simple model for rapid and nondestructive estimation of bell pepper fruit volume. *HortScience* 38(4): 509-511.
- Ocaña-Romo, C.R. 2008. En crecimiento. Desarrollo de Invernaderos en México. www.hortalizas.com. Acceso 23 de octubre de 2010.
- Orman, S. 2012. Effects of elemental sulphur and farmyard manure applications to calcareous saline clay loam soil on growth and some nutrient concentrations of tomato plants. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 10(2): 720-725.
- Ortega-Farias, S.O., R. Calderón, C. Acevedo y S. Fuentes. 2000. Estimation of daily tomato evapotranspiration using the Penman-Monteith equation. *Ciencia e Investigación Agraria* 27(2): 91-96.
- Oyinlola, E.Y. y S.A. Jinadu. 2012. Growth, yield and nutrient concentrations of tomato as affected by soil textures and nitrogen. *Asian Journal of Agricultural Research* 1:7.
- Pearson, S., T.R. Wheeler, P. Hadley y A.E. Wheldon, 1997. A validated model to predict the effects of environment on the growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.): implications for climatic change. *Journal of Horticultural Science* 72(4): 503-517.

- Perea, 2009. Invernaderos y Riego. Aun con crisis seguirá creciendo superficie de invernadero. La Imagen Agropecuaria Num. 1. Domingo 24 de Mayo. www.imagenagropecuaria.com. Acceso 23 de octubre de 2010.
- Quesada-Roldán, G. y F. Bertsh-Hernández. 2013. Obtaining of the absorption curve for the fb-17 tomato hybrid. *TERRA LATINOAMERICANA* 31(1): 1-7.
- Rivera, J.Z., I.L. López-Cruz, J.A. Castillo-Salazar y J.A. Ramírez-Arias. 2013. A comparison of three transpiration models in a tomato crop grown under greenhouse conditions. *TERRA LATINOAMERICANA* 31(1): 9-21.
- Rojas, A, A. Noriega, G. Herrera y R. Chaparro. 2003. Sistema de riego para invernaderos hidropónicos basado en la evapotranspiración del cultivo. *Naturaleza y Desarrollo* 1(1): 23-29.
- SAGARPA, 2012. Agricultura Protegida 2012. Available in <http://www.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx> [26 January 2013].
- Sepat, N.K., A. Kumar, J. Yadav y R.B. Srivastava. 2012. Effect of integrated nutrient management on growth, yield and quality of tomato in trans Himalayan. *Ann. Pl. Soil Res.* 14(2): 120-123.
- Shalaby, T.A. y A. El-Banna. 2013. Molecular and horticultural characteristics of *in vitro* induced tomato mutants. *Journal of Agricultural Science* 5(10): 155-163.
- Shah, J.A., M. Inayatullah, K. Sohail, S.F. Shah, S. Shah, T. Iqbal, y M. Usman. 2013. Efficacy of botanical extracts and a chemical pesticide against tomato fruit worm, *Helicoverpa armigera*. *Sarhad J. Agric.* 29(1): 93-96.

- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil* 15: 134-154.
- Stöckle, C.O., J. Kjelgaard y G. Bellocchi. 2004. Evaluation of estimated weather data for calculating Penan-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation Science* 23: 39-46.
- Tap, R.F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD. Dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Thornley, J.H.M. e I.R. Johnson. 2000. Plant and crop modeling, a mathematical approach to plant and crop physiology. The Blackburn Press
- Willcutts, J.F., A.R. Overman, G.J. Hochmuth, D.J. Cantliffe y P. Soundy. 1998. A comparison of three mathematical models of response to applied nitrogen: a case study using lettuce. *HortScience* 33(5): 833-836.
- Valdés-Gómez, H., S. Ortega-Farías y M. Argote. 2009. Evaluation of water requirements for a greenhouse tomato crop using the Priestley-Taylor method. *Chilean Journal of Agricultural Research* 69(1): 3-11.
- Van Henten, E.J. 1994. Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. *Agricultural Systems* 45: 55-72.
- Van Henten, E.J. y G. Van Straten. 1994. Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce. *J. agric. Engng. Res.* 59: 19-31.
- Van Straten, G., I. Seginer y F. Buwalda. 1999. Calibration and sensitivity analysis of a dynamic model for control of nitrate in lettuce. *Acta Horticulturae* 507: 149-156.

- Verlinden, B.E., B.M. Nicolai, C. Sauviller y W. Baets. 2005. Bell pepper production prediction based on colour development distribution, solar radiation and glass house temperature data. *Acta Horticulturae* 674: 375-380.
- Verstraeten, W.W., F. Veroustraete y J. Feyen. 2008. Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. *Sensors* 8: 70-117.
- Wallach, D. 2006. Evaluating crop models. In: Wallach, D., Makowski, D. and Jones, J.W, Working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parameterization and applications, Elsevier, The Netherlands, 11-54.
- Xiao, S., A. van der Ploeg, M. Bakker y E. Heuvelink. 2004. Two instead of three leaves between tomato trusses: Measured and simulated effects on partitioning and yield. *Acta Horticulturae* 654: 303-308.
- Zekki, H., C. Gary, A. Gosselin y L. Gauthier. 1999. Validation of a photosynthesis model through the use of the CO₂ balance of a greenhouse tomato canopy. *Annals of Botany* 84: 591-598.
- Zhang, K., I.G. Burns, M.R. Broadley y M. Turner. 2004. Developing a dynamic model for glasshouse lettuce growth and nitrate accumulation. *Acta Horticulturae* 654: 63-70.
- Zhang, K., I.G. Burns y M.K. Turner. 2008. Derivation of a dynamic model of the kinetics of the nitrogen uptake throughout the growth of lettuce: calibration and validation. *Journal of Plant Nutrition* 31(8): 1440-1460.
- Zhang, J. y S. Wang. 2011. Simulation of the canopy photosynthesis model of greenhouse tomato. *Procedia Engineering* 16: 632-639.