

Simulación del Modelo VegSyst para Determinar el Crecimiento de la Planta de Jitomate

Mancilla Morales J. Arturo¹, Tornero Campante Mario¹, López Cruz Irineo²,
Ríos Silva Eduardo³ y Regalado López José¹

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Puebla. Postgrado en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional.

² Universidad Autónoma de Chapingo, Postgrado en Ingeniería para el uso Integral del Agua.

³ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica.

Resumen

*Actualmente en México la electrónica y la agricultura son áreas del conocimiento separadas. Un claro ejemplo se presenta en la producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum*) producido en invernadero.*

A pesar de que la producción de este cultivo se hace en un ambiente controlado, existen factores que limitan la producción, como el clima, humedad, temperatura, radiación, factores edáficos, plagas, enfermedades, manejo de cultivo y nutrición. Este último factor cuando se maneja de forma adecuada ayuda a incrementar el rendimiento del cultivar.

Para lograr lo anterior es necesario contar con aparatos electrónicos que puedan determinar con precisión los factores que ocurren durante el crecimiento y desarrollo del mismo.

De esta forma en este trabajo se considera la nutrición del cultivo de jitomate. Para esto se utiliza el modelo VegSyst, el cual fue desarrollado para simular la producción de biomasa del cultivo diario, absorción de Nitrógeno (N) y evapotranspiración del cultivo (ETc). Haciendo uso de este modelo matemático y herramientas de simulación se lograron determinar eventos futuros de la producción, lo cual puede ayudar a corregir errores de producción mediante el control de las variables que puedan influir en el rendimiento.

Palabras clave: Jitomate, modelos, parámetros, evapotranspiración, Nitrógeno, biomasa.

1. Introducción

El desarrollo de la ciencia y tecnología implica una constante retroalimentación entre diferentes áreas y disciplinas. Por ejemplo, actualmente los avances de la mecatrónica en México se usan más en el área industrial pero es de considerar que existen aspectos de esta ciencia que pueden servir para el desarrollo del sector rural sobre todo en la producción de ciertos cultivos bajo condiciones más idóneas para el control de los principales factores que limitan la producción y rentabilidad de los mismos.

Una forma para lograr lo anterior es mediante la simulación computarizada de modelos matemáticos, la cual permite reducir tiempo, esfuerzo y recursos. Con estas herramientas se puede estimar y predecir el rendimiento de cultivos, permitiendo analizar la respuesta a distintas variaciones [1].

Un cultivo que se ha estudiado utilizando la simulación ha sido el jitomate, ya que en México esta hortaliza es la segunda más importante después del chile. Su importancia radica en que posee cualidades muy esenciales para adecuarse a la dieta alimenticia, ya sea para consumo en fresco o procesado, lo que representa una rica fuente de sales minerales y de vitaminas A y C [2].

Cabe mencionar este cultivo es un ejemplo de un sistema biológico, el cual se basa en interacciones químicas y físicas y esto hace que su naturaleza sea altamente no lineal o tenga un comportamiento caótico [3].

Sin embargo la simulación basada en modelos cuantitativos de procesos biológicos y sus interacciones, puede proveer una considerable visión en el comportamiento de estos sistemas y dirigirlos a metas específicas.

Por esta razón los sistemas computacionales han ofrecido poderosas herramientas en las ciencias biológicas, lo cual ha hecho posible estimar y corregir errores en el ciclo del cultivo. Esto último en un futuro podrá ayudar a cumplir con los retos mundiales que se presentan en la búsqueda de producir alimentos sanos y de calidad, así como elevar la producción de los mismos.

Por esta razón surge la necesidad de desarrollar simulación matemática, usando técnicas de control ambiental y desarrollar la electrónica adecuada en los invernaderos donde se produce el jitomate [4].

Cabe mencionar que en la agricultura protegida existen de manera general dos formas para incrementar la producción: a) mejorar las condiciones climáticas, b) aplicar las cantidades óptimas de nutrimentos. En este último el elemento más importante es el Nitrógeno, ya que es el principal nutrimento que las plantas requieren. Pero cuando se aplican cantidades excesivas las consecuencias más importantes son: toxicidad en la planta, contaminación a los mantos acuíferos y salinidad en los suelos. De aquí el interés de crear nuevas técnicas de control que sean viables y que respeten el ambiente [5, 6].

Con base a lo anterior, en este trabajo se propone analizar el crecimiento de jitomate, considerando la parte nutrimental mediante la simulación del modelo VegSyst, técnicas de control y programación [7], con la finalidad de que se puedan predecir eventos, sin la necesidad de esperar la cosecha, buscando rendimientos potenciales, y generando una dosis óptima de solución nutritiva. Tratando de beneficiar a la población local que cuenta con invernaderos con superficies promedio de 1000 m² y con la visión de proteger el ambiente.

2. Materiales y Métodos

El modelo que se utiliza en este trabajo es conocido como “VegSyst”, el cual fue desarrollado para simular la producción de biomasa del cultivo, absorción de Nitrógeno (N) y evapotranspiración del cultivo (ET_c). Este modelo considera el tiempo térmico y por lo tanto se puede adaptar a las diferentes fechas de siembra, así como diferentes prácticas en el invernadero. También se asume que los cultivos no tienen agua o limitaciones de nutrientes, lo que es real para cultivos manejados intensivamente cultivados en invernaderos [8, 9].

Las entradas del modelo son datos diarios de temperatura máxima y mínima, humedad relativa máxima y mínima, y la radiación solar integral diaria, radiación fotosintéticamente activa (PAR).

Se consideran dos periodos en el ciclo del cultivo: (i) el período 1 del trasplante hasta la máxima intercepción PAR y (ii) el período 2 de máxima intercepción PAR hasta la madurez del cultivo (el fin de la cosecha).

La estructura que presenta el modelo es la siguiente:

$$RTT_1 = \frac{CTT_i}{CTT_f} \quad (1)$$

$$RTT_2 = \frac{CTT_i - CTT_f}{CTT_{mat} - CTT_f} \quad (2)$$

$$f_{i-PAR} = f_0 + \left[\frac{f_f - f_0}{1 + B_1 \exp(-\alpha_1 RTT_1)} \right] \quad (3)$$

$$f_{i-PAR} = f_f + \left[\frac{f_f - f_{mat}}{1 + B_2 \exp(-\alpha_2 RTT_2)} \right] \quad (4)$$

$$B_1 = \frac{1}{\exp(-\alpha_1 RTT_{0.5})} \quad (5)$$

$$B_2 = \frac{1}{\exp(-\alpha_2 RTT_{0.5})} \quad (6)$$

$$DMP_i = PAR_i \times RUE \quad (7)$$

$$\%N_i = a \times DMP_i^b \quad (8)$$

$$kc_i = kc_{ini} + (kc_{max} - kc_{ini}) \left(\frac{f_{i-SR}}{f_{f-SR}} \right) \quad (9)$$

$$kc_i = kc_{end} + (kc_{max} - kc_{end}) \left(\frac{f_{i-SR} - f_{mat-SR}}{f_{f-SR} - f_{mat-SR}} \right) \quad (10)$$

$$f_{i-SR} = 1 - \exp \left[\frac{\ln(1 - f_{i-PAR})}{1.4} \right] \quad (11)$$

$$ET_c = kc ET_0 \quad (12)$$

Donde:

f_{i-PAR} : Fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa.

DMP_i : Producción de materia seca.

N_i : Contenido de Nitrógeno del cultivo.

ET_c : Evapotranspiración del cultivo.

CTT_i : Acumulación de tiempo térmico.

PAR_i : Radiación fotosintéticamente activa.

T_{max} : Temperatura máxima.

T_{min} : Temperatura mínima.

Hum_{max} : Humedad máxima.

Hum_{min} : Humedad mínima.

CTT_f : Acumulación de tiempo térmico en la máxima intercepción de PAR.

CTT_{max} : Acumulación de tiempo térmico en la madurez del cultivo.

α_1 : Coeficiente de forma.

α_2 : Coeficiente de forma.

RTT_{05} : Tiempo térmico relativo.

f_f : Máxima fracción interceptada de PAR.

f_0 : Fracción inicial de PAR.

f_{mat} : Fracción de PAR en la madurez del cultivo.

RUE : Uso eficiente de radiación.

a : Factor de calibración.

b : Factor de calibración.

kc_{ini} : Coeficiente inicial del cultivo.

kc_{end} : Coeficiente final del cultivo.

kc_{max} : Coeficiente máximo del cultivo.

f_{f-SR} : Máxima fracción interceptada de radiación.

f_{mat-SR} : Radiación solar interceptada en la madurez del cultivo.

ET_0 : Evapotranspiración de referencia.

De las anteriores ecuaciones se definen las entradas (I), salidas (F) y los parámetros (P):

$$F = [f_{i-PAR}; DMP_i; N_i; ET_c] \quad (13)$$

$$I = [CTT_i; PAR_i; T_{max};$$

$$T_{min}; Hum_{max}; Hum_{min}] \quad (14)$$

$$\theta = [CTT_f; CTT_{max}; \alpha_1; \alpha_2; RTT_{05}; f_f; f_0; f_{mat}; RUE; a; b; kc_{ini}; kc_{end}; kc_{max}; f_{f-SR}; ET_0] \quad (15)$$

Para complementar el modelo se utilizaron dos ecuaciones de evapotranspiración de referencia (ET_0). La

primera es la descrita en la ecuación 16, la cual es propuesta por la FAO [10], mientras que en la ecuación 17 se utiliza una función más simple, propuesta en el mismo método, pero es aplicable cuando no se tienen las entradas y parámetros de la ecuación 16.

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (16)$$

$$ET_0 = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} Ra \quad (17)$$

Donde:

R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo.

G : Densidad de calor del suelo.

T : Temperatura del aire a 2m de altura.

U_2 : Velocidad del viento a 2m de altura.

e_s : Saturación de presión de vapor.

e_a : Presión real de vapor.

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor.

γ : Constante psicométrica.

Ra : Radiación extraterrestre.

T_{mean} : Temperatura promedio.

T_{max} : Temperatura máxima en el invernadero.

T_{min} : Temperatura mínima en el invernadero.

Haciendo uso de las anteriores ecuaciones y las respectivas entradas, se programa el modelo VegSyst.

3. Resultados y discusión

Para resolver el modelo se deben utilizar programas computacionales que ayuden a facilitar el trabajo. Por lo tanto en este trabajo se hace uso del programa MATLAB®, el cual es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación. Usando este programa se pueden analizar los datos, desarrollar algoritmos y crear modelos y aplicaciones [11].

Una vez programado el modelo en un archivo de texto tipo m y en versión Simulink, lo que sigue es analizar los resultados. Primeramente se muestra el comportamiento del modelo:

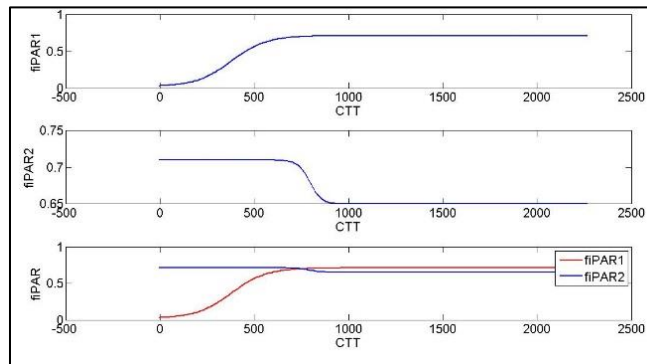


Fig. 1. Fracción interceptada de la radiación fotosintéticamente activa, con respecto a la acumulación de tiempo térmico.

La relación entre la fracción interceptada del PAR en el cultivo y la acumulación de tiempo térmico se presenta en la figura 1. Para obtener la acumulación de tiempo térmico se utilizó el método de triangulación descrito por [12]. También se observa que se tienen dos periodos, el primero representa la fracción interceptada del PAR desde el trasplante hasta la máxima intercepción del PAR, mientras el segundo representa desde la máxima intercepción hasta la madurez del cultivo.

En la figura 2 se muestra el contenido de Nitrógeno en la planta con respecto a la producción de materia seca, en donde se tiene que a mayor materia seca, el contenido de Nitrógeno disminuye, mientras la absorción de Nitrógeno por la planta aumenta con respecto al tiempo, lo cual se observa en la figura 3.

En la figura 4 se observa la producción de materia seca la cual aumenta con respecto a la acumulación de tiempo térmico y esta producción se puede ajustar dependiendo de las fechas de siembra.

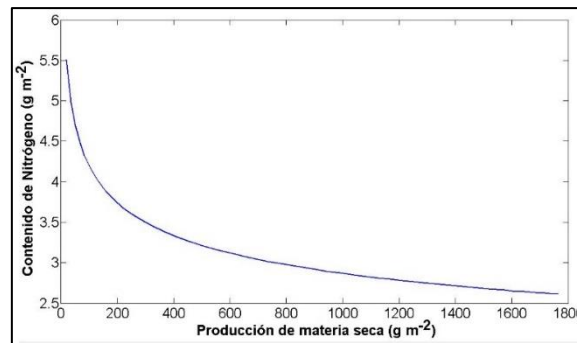


Fig. 2. Contenido de Nitrógeno en la planta con respecto a la producción de materia seca.

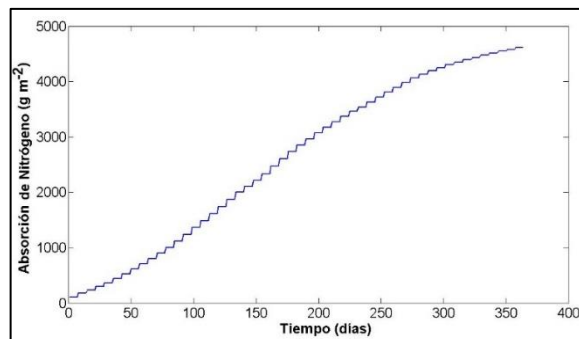


Fig. 3 Absorción de Nitrógeno.

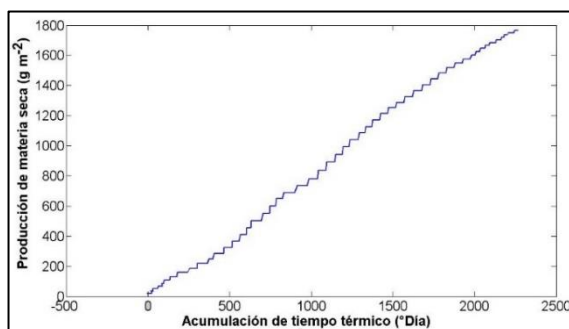


Fig. 4. Producción de materia seca contra la acumulación de tiempo térmico.

En la figura 5 se tienen 4 simulaciones de evapotranspiración del cultivo, utilizando las dos ecuaciones para los dos periodos de $f_{i- PAR}$ descritas por el modelo y de igual manera estas se simularon con las dos ecuaciones de k_c , así como con las ecuaciones 16 y 17 de evapotranspiración de referencia, en donde se puede observar que la ecuación 16 muestra un comportamiento más acorde con la realidad.

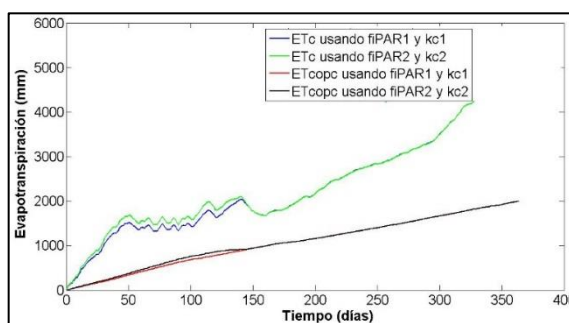


Fig. 5. Evapotranspiración del cultivo.

Con las anteriores simulaciones se puede mostrar que con los modelos matemáticos se pueden realizar experimentos sin la necesidad de tener un cultivo real, esto adaptando los parámetros y las entradas a la región de estudio. Hasta el momento se ha tratado de ajustar las curvas con los parámetros encontrados, pero en próximos trabajos se realizara una validación entre los datos simulados y los reales [13].

4. Conclusiones

Como se ha mencionado existe el interés de aplicar soluciones nutritivas, que sean óptimas, que respeten el ambiente y que puedan incrementar los rendimientos.

Por esta razón en este trabajo se plantea la utilización de un modelo matemático que optimice los niveles de Nitrógeno. Para lograr lo anterior se utilizaron herramientas de simulación, las cuales hacen posible predecir eventos futuros de una producción sin la necesidad de esperar una cosecha para poder corregir errores mediante el control de las variables que puedan influir en el rendimiento de la producción.

De esta manera en este documento se presentaron las simulaciones del modelo VegeSyst, el cual mediante sus ecuaciones pudieron determinar la producción de biomasa del cultivo diaria, la absorción de

Nitrógeno por la planta y evapotranspiración del cultivo. Cabe mencionar que para simular la evapotranspiración se consideraron dos ecuaciones de Penman-Monteith, las cuales se simularon para poder ajustar mejor los resultados.

Por lo tanto en las gráficas se pudo observar que mediante la simulación se pueden modificar las variables de entrada, lo cual ayuda a obtener rendimientos potenciales y el mejor comportamiento del crecimiento del cultivo de jitomate bajo condiciones de agricultura protegida, tratando de incrementar en la vida real la producción en los invernaderos y así beneficiar los ingresos de los productores que siembran dicho cultivo.

En próximos trabajos es necesario continuar con la programación del modelo, tratando de obtener mejores ajustes, así como realizar un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros más sensibles al modelo y a su vez realizar la identificación paramétrica de los coeficientes del modelo. Todo lo anterior se desarrolle electrónica adecuada que se pueda adaptar a invernaderos de una específica región y que ayuden a controlar las variables que influyen en el rendimiento del cultivar.

Referencias

- [1] López C. 2002. Efficient evolutionary algorithms for optimal control. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, Netherlands.
- [2] SAGARPA. 2010. Resumen nacional de producción agrícola. Revisado en: <http://www.contraparteinformativa.com/despliegue-noticia.php?Noticias-Puebla{En-10-anos-crecio-en-10-mil-hectareas-el-uso-de-invernaderos-en-el-pais&id=29665>. Consultada: Julio de 2013.
- [3] Pear M. R, Cuary R. B. *Agricultural systems modeling and simulation*. The University of Florida, Gainesville, Florida. Edit Marcel Dekker Inc, ISBN: 0-8247-0041-4. 1998.
- [4] López I., Ramírez A., Rojano A. 2005. Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: Trascendiendo la contemplación dinámica de cultivos. Revista Chapingo. Serie Horticultura. 11 (2). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo México, pp. 257-267.
- [5] Thornley J. H., Johnson I. R. 2000. Plant and Crop Modelling, A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology, The Blackburn Press. New Jersey, USA. 669 p. Revista Chapingo Serie Horticultura 11(2): 257-267, 2005.
- [6] Thompson RB, Martínez Gaitán C., Gallardo M., Giménez C., Fernández M. 2007. Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agric Water Manage* 89:261–274.
- [7] Jones J. W., Dayan E., Allen L., Van Keulen H., Challa H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transactions of the ASAE*. 34(2):663-672.
- [8] Gallardo M., Giménez C., Martínez C., Stöckle C. O. Thompson R. B., Granados M.R. 2011. Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 101 ELSEVIER (2011) 107– 117.
- [9] Giménez C., Gallardo M., Martínez C., Stöckle C. O., Thompson R. B., Granados M. R. VegSyst, a simulation model of daily crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration for pepper crops for use in an on-farm decision support system.
- [10] Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy.

- [11] Taps, F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. Ph. D. Thesis. Wageningen Agricultural University. Wageningen the Netherlands. 127 p.

- [12] Zalom F.G., Goodell P.B., Wilson L.T., Barnett W.W., Bentley W.J. 1983. Degree-days: The Calculation and Use of Heat Units in Pest Management. Cooperative Extension Publ. Univ. California, 10 pp.

- [13] Jones J. W., Tsuji G. Y., Hoogenboom G., Hunt L., Thornton K., Wilkens P., López C. 2002. Efficient evolutionary algorithms for optimal control. PhD. Thesis, Wageningen University. Wageningen, The Netherlands, 126 p.

- [14] Seginer I., Van Straten G., Buwalda F. 2000. Lettuce growth limited by nitrate supply. *Acta Horticulturae* 507: 141-14.