

## **Modelación del patrón de crecimiento del cultivo de jitomate de invernadero con lógica difusa**

FITZ-RODRÍGUEZ, Efrén, LÓPEZ-CRUZ, Irineo L., SALAZAR-MORENO, Raquel y RAMÍREZ-ARIAS, Armando

E. Rodríguez', I. López'', R. Salazar' y A. Ramírez'''

^ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

'' Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, UACH.

''' Programa de Horticultura Protegida, UACH.

efitzr@gmail.com

D. Sepúlveda, F. Rérez, D. Sepúlveda, E. Figueroa, R. Salazar, L. Godínez (eds.) Matemáticas Aplicadas. Handbook T-I. -©ECORFAN, Texcoco de Mora-México, 2016.

## Abstract

Greenhouse tomato crops experience a growth pattern going from a vegetative to a reproductive mode, as a result of crop, climate and irrigation management. Despite the technological advances on the controlled environment production systems, the decisions on the management of the crop-greenhouse biosystem are based on the direct observations of the grower. These observations are subjective and depend on the experience of the grower, to assess the current status of the crop. Based on these observations, he makes the decisions for driving the crop to a desired state. In order to reduce the subjectivity of the observations of the crop, it is proposed to model the growth pattern of the crop with fuzzy logic, taking as input parameters the stem diameter (Sd) and the distance to the first flowering (Th), from a plant sample of an experimental array with conditions conducting to different growth patterns. The fuzzy inference system proposed discriminated reasonably different growth patterns during a whole production cycle of a greenhouse crop.

## 4 Introducción

En la producción de jitomates de invernadero, normalmente se utilizan variedades indeterminadas, con lo cual se pueden tener ciclos de producción prolongados. Sin embargo, el desarrollo y crecimiento de las plantas muestran un tipo de crecimiento que oscila entre un patrón de crecimiento vegetativo a uno regenerativo. Los agricultores experimentados evalúan el patrón de crecimiento y toman decisiones en cuanto al manejo del cultivo y del control del clima del invernadero, para lograr un patrón de crecimiento balanceado. Es decir, aquel que tenga la proporción adecuada de masa foliar (fuentes) que soporte la carga de frutos actual y, una proporción de carga de frutos (sumideros) que logren mantener la calidad y los rendimientos adecuados en el largo plazo.

La evaluación del cultivo se basa en parámetros morfológicos de las plantas, los cuales pueden ser cuantitativos (longitud de hojas, diámetros de tallo, tasas de elongación, etc.) y cualitativos (forma, color, textura) (Jensen, 2004; Portree, 1996).

No obstante de los grandes avances tecnológicos en la automatización del manejo del clima, fertirriego y muchos otros procesos, la evaluación del estado del cultivo es subjetiva, dado que se realiza por inspección visual y depende de la experiencia del agricultor.

Con el propósito de desarrollar sistemas que puedan tomar información cuantitativa y cualitativa y poder cuantificar el patrón de crecimiento del cultivo de jitomate de invernadero, se propone modelar el patrón de crecimiento con sistemas difusos.

### 4.1 Materiales y métodos

Para la caracterización de los patrones de crecimiento del cultivo de jitomate en invernadero y para derivar el sistema de inferencia difuso, se utilizaron registros del cultivo y datos climáticos de un invernadero experimental donde se establecieron las condiciones para inducir cada uno de los patrones de crecimiento. Se utilizó un variedad de jitomate tipo "Beefsteak" cv. Rapsodie, la cual fue cultivada en condiciones controladas en el Centro de Agricultura de Ambientes Controlados, en la Universidad de Arizona.

El patrón de crecimiento de un cultivo de jitomate de invernadero se evaluó en cada estado del ciclo de producción, dado que éste es un indicador de la fortaleza de las fuentes-sumideros del cultivo y que define el rendimiento obtenido del cultivo. Éste parámetro se designa de manera cualitativa y se describe mejor con los patrones de crecimiento no deseados y extremos, es decir, patrón de crecimiento vegetativo o reproductivo.

Un patrón de crecimiento balanceado es aquel donde las plantas muestran características con valores que están en medio de los dos extremos no deseados.

La lógica difusa es una generalización de la lógica binaria, cuando se tiene una situación de razonamiento con incertidumbre (Zadeh, 1965). Ésta implementa conjuntos difusos, los cuales son conjuntos con fronteras no muy bien definidas y, donde la noción de pertenencia a un conjunto se convierte en un grado de pertenencia. La lógica difusa tiene la ventaja de poder evaluar datos imprecisos, dado que permite implementar conocimientos generales (por ejemplo, la experiencia del agricultor) al usar un lenguaje natural (variables lingüísticas) a través de sistemas de inferencias. Estos sistemas son capaces de manejar incertidumbre y los parámetros cuantitativos y cualitativos pueden combinarse para modelar sistemas complejos. Los modelos difusos basados en reglas se han aplicado en sistemas de control, en toma de decisiones y reconocimiento de patrones, entre muchos otros.

En los sistemas de agricultura controlada se ha aplicado la lógica difusa para modelar (Lanfang et al., 2000; Salgado and Cunha, 2005) y controlar (Castaneda-Miranda et al., 2006; Ehrlich et al., 1996) el clima del invernadero; así como también para modelar algunos procesos de las plantas, tales como la fotosíntesis (Center and Verma, 1997) y el crecimiento (Weiping and Hanqin, 1988) en cultivos de jitomate.

En este trabajo se investigó la caracterización del patrón de crecimiento usando modelación con lógica difusa, al implementar un sistema de inferencia difuso (FIS). Este sistema de inferencia mapea algunas características morfológicas cuantificables de las plantas en patrones o modos de crecimiento. El modo de crecimiento es una característica cualitativa expresada con una variable lingüística, la cual incluye un término descriptivo y un valor numérico que representa el grado de pertenencia a un conjunto difuso.

La gran mayoría de las características morfológicas son cualitativas y es difícil llevar un registro de estas y, poder tomar decisiones calculadas con estas. Sin embargo los agricultores experimentados hacen inferencias con estas para ajustar la operación del sistema completo.

Dos de las características morfológicas cuantificables que más se utilizan en operaciones comerciales son: 1) diámetro de tallo ( $S_d$ ) y 2) distancia del ápice a la primera floración ( $T_h$ ), los cuales fueron utilizados para derivar el sistema de inferencia difuso (FIS, por sus siglas en inglés). El patrón de crecimiento se caracteriza por ser reproductivo, balanceado o vegetativo, los cuales fueron modelados en función de los dos parámetros antes mencionados ( $S_d$ ,  $T_h$ ).

Basado en los experimentos que se realizaron para inducir el crecimiento y desarrollo de las plantas a cada uno de los patrones de crecimiento se construyeron las funciones de densidad de probabilidad normal para cada uno de los parámetros utilizados (Figura 4).

El universo de posibilidades ( $X$ ) y la distribución de probabilidades (Figura 4) definió a cada una de las funciones miembro (Figura 2a y 2b) de los conjuntos difusos de los parámetros de entrada del sistema de inferencia. Se implementó un FIS tipo Mandani, donde la salida (Patrón de crecimiento) también se define como un conjunto difuso.

El universo de posibilidades para el patrón de crecimiento se definió en el rango de 0 a 10, donde el prefijo “muy” se aplicó a ambas patrones de crecimiento, vegetativo y reproductivo; resultando en cinco patrones de crecimiento (figura 2c). El patrón de crecimiento “muy reproductivo” se representa como VR, “reproductivo” como R, “muy vegetativo” como VV, “vegetativo” como V, y balanceado como B.

Un conjunto difuso  $A$  definido en un universo de posibilidades  $X$ , cuyos elementos se denotan como  $x$ , se define como un conjunto de pares ordenados.

$$A = \{ x, \mu_A(x) | x \in X \}$$

Donde  $\mu_A(x)$  es la función miembro (MF) de  $x$ , en  $A$ , mapeando cada elemento en un valor de membresía en el rango de 0 a 1. Las funciones miembro implementadas son de tipo Gausiana simétrica y funciones miembro dobles combinadas en los valores extremos (Figura 4.1).

El sistema de inferencia (Figura 4.2) se definió con reglas if-then (Tabla 4), mapeando las variables de entrada con la variable nueva de salida y que define el patrón de crecimiento.

La integración de los conjuntos difusos que representan a la salida en cada una de las reglas if-then se agregó con el operador “*máximo*”, resultando en un conjunto difuso que describe el modo de crecimiento. Por último, el valor numérico que representa el grado del patrón de crecimiento (en una escala numérica del 0 al 10) se calculó al defusificar el conjunto difuso obtenido en el proceso de agregación con el método de centroides. El sistema de inferencia para caracterizar el patrón de crecimiento se implementó usando la interface gráfica del software Fuzzy Logic Toolbox™ Ver. 2.2.6 of Matlab ® 7.5 (The MathWorks, Inc., Boston, MA, USA).

## 4.2 Análisis y discusión de resultados

Con la modelación del patrón de crecimiento de las plantas de un cultivo de jitomate de invernadero con lógica difusa se pudo discriminar patrones de crecimiento, los cuales fueron inducidos de manera experimental y controlada.

El resultado de la caracterización del patrón de crecimiento del cultivo se monitoreó durante la duración del experimento (Figura 4), donde se aplicaron las condiciones para inducir los tres patrones de crecimiento (reproductivo, balanceado y vegetativo). Las plantas donde se indujo un crecimiento vegetativo (con una conductividad eléctrica  $EC = 2.5 \text{ dS cm}^{-2}$  y un déficit de presión de vapor bajo,  $VPD = \text{low}$ ) las plantas no alcanzaron un verdadero crecimiento vegetativo y a lo mucho se observó un crecimiento balanceado. Sin embargo, el patrón de crecimiento reproductivo si se logró con los tratamientos más severos ( $EC = 8.0 \text{ dS cm}^{-2}$  y  $VPD = \text{high}$ ) y, estos últimos si se diferenciaron claramente con el modelo difuso.

En términos generales el factor ambiental de VPD fue más sensitivo al tratamiento de conductividad eléctrica ( $EC = 8.0 \text{ dS cm}^{-2}$ ) y reflejó un cambio del patrón de crecimiento de balanceado a reproductivo cuando se cambió el tratamiento de VPD de “bajo” a “alto” y, viceversa de reproductivo a balanceado cuando se cambió el tratamiento de VPD de “alto” a “bajo”. El modelo difuso permite ver el desarrollo del patrón de crecimiento a través del ciclo de producción.

Las características morfológicas entre los diferentes cultivares son diferentes, sin embargo, los patrones del modo de crecimiento son correspondientes con el ambiente que ha inducido ese patrón de crecimiento, lo cual indica que es una técnica que puede ser útil para muchos tipos de jitomate.

Las ventajas de modelar el patrón de crecimiento con lógica difusa incluye: 1) la posibilidad de implementarlo en cultivos establecidos, dado que se derivó de datos experimentales. 2) la capacidad de combinar características cualitativas y cuantitativas y, 3) los resultados de la caracterización del patrón de crecimiento incluye componentes cualitativos y cuantitativos, dados por la variable difusa y el valor numérico del grado de membresía.

### 4.3 Conclusiones

El patrón de crecimiento de las plantas de un cultivo de jitomate de invernadero se modeló con lógica difusa en función de los dos parámetros morfológicos más utilizados en la determinación del vigor del cultivo de jitomate. A pesar del gran desarrollo tecnológico, los ajustes en el biosistema planta-invernadero se realizan basados en observaciones subjetivas del estado de las plantas. Aun cuando los patrones de crecimiento de diversas variedades son diferentes, la modelación difusa permite el manejo de datos imprecisos, lo cual lo hace una herramienta viable para incluir variables cualitativas que capturan la experiencia de los agricultores y que es difícil llevar un registro de estas y sobre todo poder hacer cálculos con ellas. Como futuros desarrollos se pueden integrar sistemas de visión artificial, que cuantifiquen y registren características morfológicas del cultivo, tanto cualitativas como cuantitativas y que suministren esta información a un sistema de inferencia. En su momento con esta información establecer medidas correctivas para dirigir el patrón de crecimiento deseado de acuerdo al estado actual del cultivo y a los requerimientos del mercado.

### 4.4 Referencias

- Adams, S.R., 2002. Predicting the weekly fluctuations in glasshouse tomato yields. *Acta Hort. (ISHS)*, 593: 19-23.
- Blum, E.K. and Li, L.K., 1991. Approximation theory and feedforward networks. *Neural Networks*, 4(4): 511-515.
- Buckley, J.J. and Eslami, E., 2002. An introduction to fuzzy logic and fuzzy sets. *Physica-Verlag*, 286 pp.
- Castaneda-Miranda, R., J. Ventura-Ramos, Eusebio, R. del Rocio Peniche-Vera, and G. Herrera-Ruiz. 2006. Fuzzy Greenhouse Climate Control System based on a Field Programmable Gate Array. *Biosystems Engineering*. 94: 165-177.
- Center, B. and Verma, B.P., 1997. A fuzzy photosynthesis model for tomato. *Transactions of the ASAE*, 40(3): 815-821.
- Costa, P., 2007. A quantified approach to tomato plant growth status for greenhouse production in a semi arid climate. Ph.D Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ, 231 pp.
- Ehrlich, H., Kühne, M. and Jäkel, J., 1996. Development of a fuzzy control system for greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)*, 406.

Jensen, M.H., 2004. Steering your tomatoes towards profit, Greenhouse Crop Production and Engineering Design Short Course. CEAC/UofA, Tucson, AZ, pp. 3.

Lanfang, P., W. Wanliang, and W. Qidi. 2000. Application of adaptive fuzzy logic system to model for greenhouse climate. Intelligent Control and Automation, 2000. Proceedings of the 3rd World Congress on. p. 1687-1691 vol.1683.

Lafont, F. and Balmat, J.-F., 2002. Optimized fuzzy control of a greenhouse. Fuzzy Sets and Systems, 128(1): 47-59.

Piegat, A., 2001. Fuzzy modeling and control. Studies in fuzziness and soft computing ; vol. 69. Physica-Verlag, Heidelberg ; New York, xiv, 728 pp.

Portree, J., 1996. Greenhouse vegetable production guide. British Columbia Ministre of Agriculture, Fisheries and Food. British Columbia Ministre of Agriculture, Fisheries and Food, Abbotsford, British Columbia, 117 pp.

Salgado, P. and Cunha, J.B., 2005. Greenhouse climate hierarchical fuzzy modeling. Control Engineering Practice, 13(5): 613-628.

Tien, B.-T., 1997. Neural-fuzzy approach for system identification. Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 155 pp.

Weiping, J. and T. Hanqin. 1988. Fuzzy modeling on crop growth control systems. Acta Hort. (ISHS). 230: 241-244.

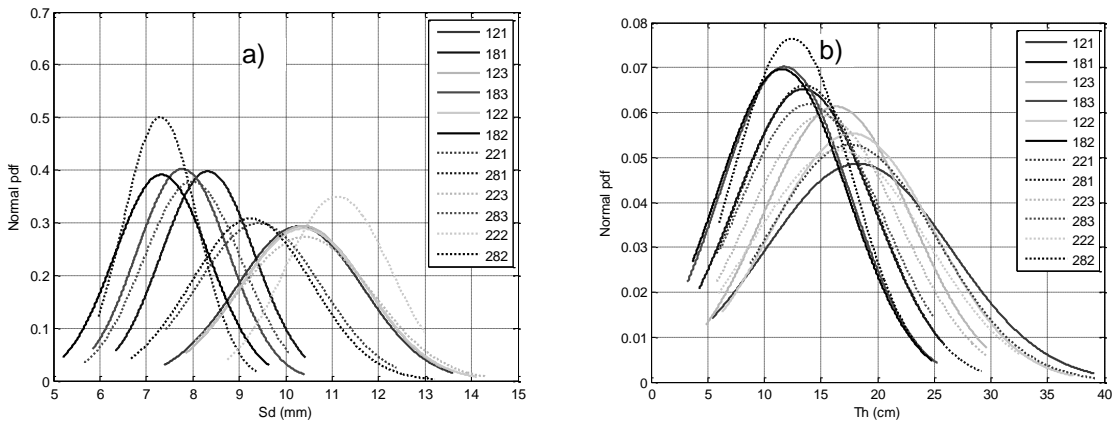
Yen, J. and Langari, R., 1999. Fuzzy logic, intelligence, control, and information. Prentice Hall, 548 pp.

Zadeh, L.A. 1965. Fuzzy sets. Information and Control. 8: 338-353.

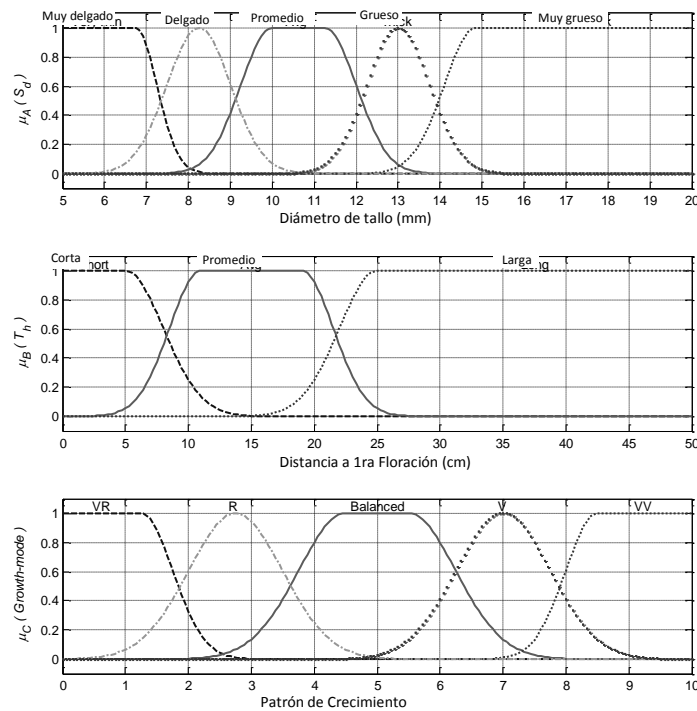
**Tabla 4** Reglas difusas “if-then” para definir el FIS en la caracterización del patrón de crecimiento

Rule No.	Antecedent	Consequent	Rule Weight
1	If (Sd is MuyDelgado)	then (Patrón de Crecimiento is VR)	1
2	If (Sd is Delgado)	then (Patrón de Crecimiento is R)	1
3	If (Sd is Promedio)	then (Patrón de Crecimiento is Balanced)	1
4	If (Sd is Grueso)	then (Patrón de Crecimiento is V)	1
5	If (Sd is MuyGrueso)	then (Patrón de Crecimiento is VV)	1
6	If (Th is Corto)	then (Patrón de Crecimiento is R)	1
7	If (Th is Promedio)	then (Patrón de Crecimiento is Balanced)	1
8	If (Th is Largo)	then (Patrón de Crecimiento is V)	1

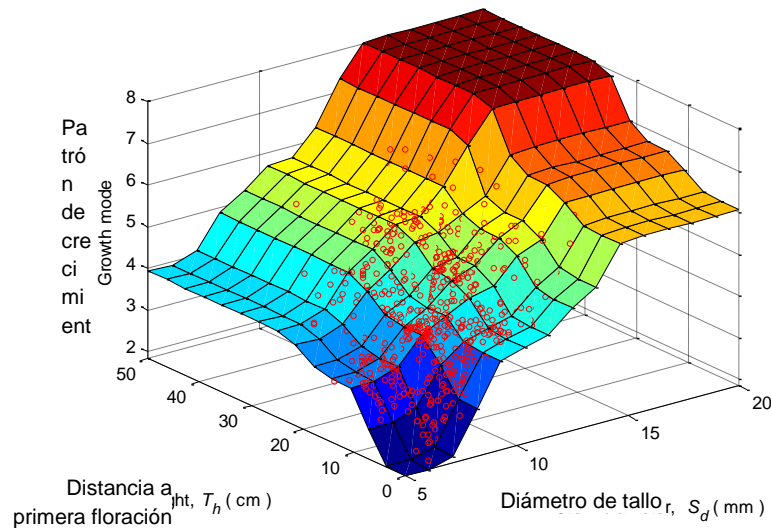
**Figura 4** Funciones de densidad de probabilidad normal para: a) diámetro de tallo ( $S_d$ ) y b) la longitud del ápice a la primera floración ( $T_h$ ), obtenidas de la muestras de cada tratamiento experimental. Los dígitos representan a cada uno de los tratamientos, los cuales son una combinación de conductividad eléctrica (EC, segundo dígito, 2=2.5 y 8 = 8.0 dS cm<sup>-2</sup>), déficit de presión de vapor (VPD, tercer dígito, 1=bajo, 2=alto y 3=control) y dos fases experimentales (primer dígito). El factor VPD se intercambió en tratamientos de un nivel alto a bajo, y viceversa



**Figura 4.1** Funciones miembro para los parámetros de entrada y salida del Sistema de inferencia difuso



**Figura 4.2** Función de inferencia (FIS) para la modelación del patrón de crecimiento



**Figura 4.3** Caracterización del patrón de crecimiento de plantas de jitomate durante un ciclo de producción. En las configuraciones experimentales se indujeron patrones A) vegetativos, B) reproductivos y C) balanceados durante la mitad del ciclo y, después de la semana 16 se intercambió a condiciones que condujeran a un modo de crecimiento opuesto

