

MODELOS EMPÍRICOS DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE PODADO A TRES RACIMOS

EMPIRICAL MODELS FOR PLANT GROWTH AND YIELD OF TOMATO PRUNED TO THREE CLUSTERS

José Refugio Villegas^{1,2*}, Víctor Arturo González Hernández¹, José Alfredo Carrillo Salazar¹, Manuel Livera Muñoz¹, Felipe Sánchez del Castillo³ y Tomás Osuna Enciso⁴

¹ Programa en Fisiología Vegetal, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. Montecillo, Edo. de México. Correo electrónico: villegas@colpos.mx ² Escuela Superior de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa. Juan José Ríos, Ahome, Sin. ³ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. ⁴ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Culiacán, Sinaloa, México.

* Autor para correspondencia

RESUMEN

Para obtener modelos empíricos simples que simulen el crecimiento de la biomasa y el rendimiento del fruto del tomate cultivado, en invernadero y podado a tres racimos, se estableció un experimento con densidades de 1.7, 3.8, 6.8, 15.4 y 66.6 plantas/m². Con la técnica de análisis de crecimiento, bisemanalmente y durante el ciclo completo se midió la biomasa de hojas, frutos y total, para relacionarla con unidades calor. La función de Gauss y la sustitución de sus parámetros por funciones que incluyen el efecto de densidad de población, permitió los mejores modelos con alto ajuste ($R^2 = 0.96$) para simular el comportamiento de las tres variables para cualquier densidad desde 1.7 a 15.4 plantas/m².

Palabras clave: *Lycopersicon esculentum* Mill., simulación, biomasa, fruto.

SUMMARY

In order to obtain simple empirical models for simulating tomato biomass accumulation and fruit yield in plants pruned to three clusters and grown under green house conditions, different plant densities (1.7, 3.8, 6.8, 15.4 y 66.6 plants/m²) were evaluated. The growth analysis technique was used to measure biomass of leaves, fruits and aerial part (total) during the growing season. The Gauss equation with its parameters replaced by functions considering plant density, produced models that fitted best ($R^2 = 0.96$) to simulate plant behaviour in the three variables for any density from 1.7 to 15.4 plants/m².

Index words: *Lycopersicon esculentum* Mill., simulation, biomass, fruit.

INTRODUCCIÓN

De los componentes de los modelos de simulación, las ecuaciones matemáticas son las que describen el comportamiento de la planta en función del tiempo (Peart y Bruce, 1998) y que producen valores similares a los datos observados (Lents, 1998). Los modelos se han desarrollado para investigar y profundizar el entendimiento de la fisiología del crecimiento y desarrollo, y para proponer nuevas estrategias de manejo (Bannayan y Crout, 1999).

Peart y Bruce (1998) clasifican a los modelos de simulación en dos grandes grupos: empíricos y mecanicistas. Los primeros son descriptivos, se derivan de datos observados sin involucrar procesos fisiológicos, y tienen escasa capacidad explicativa. Por el contrario, los modelos mecanicistas poseen capacidad explicativa de la fisiología del cultivo porque consideran aspectos como temperatura, radiación fotosintéticamente activa, índice de área foliar, fotosíntesis, respiración y eficiencia en el uso de la radiación.

Entre los modelos dinámicos de simulación para tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) están el TOMSIM 1.0 (Spitters *et al.*, 1989) y TOMGRO 1.0 (Jones *et al.*, 1991), los cuales han representado satisfactoriamente la producción de materia seca en tres de cuatro experimentos (Bertin y Heuvelink, 1994). Sin embargo, estos modelos son para condiciones óptimas y requieren de muchas variables independientes, principalmente con base en temperatura y radiación global. También se pueden generar modelos más simples, empíricos y con alta capacidad predictiva; inclusive, se pueden hacer modelos específicos que dependan sólo de pocas variables limitantes. Hasta el momento, no se ha publicado un modelo que simule el crecimiento y rendimiento del tomate en intervalo amplio de densidades de población ni que considere el efecto de la poda del dosel.

El objetivo del presente trabajo fue construir modelos empíricos para simular el crecimiento y rendimiento del tomate podado a tres racimos y crecido en condiciones de invernadero, en intervalo amplio de densidades de población y sin limitantes de agua ni de nutrimentos, en función de la edad, expresada en unidades calor acumuladas durante el ciclo del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Semillas de tomate del cv. Gabriela, de hábito de crecimiento indeterminado que produce frutos grandes tipo

bola, se sembraron en charolas de poliestireno el 29 de enero del 2001. A los 59 d de edad se transplantaron a camas de cemento con sustrato de tezontle rojo y un sistema de fertigación con la solución nutritiva generada por Sánchez *et al.* (1999), en un invernadero de vidrio localizado en Cuautlalpan, Texcoco, Estado de México, a 2251 msnm, 19° 29' LN y 98° 53' LW. El transplante se hizo en cinco densidades: 1.7, 3.8, 6.8, 15.4 y 66.6 plantas/m². Durante su crecimiento, las plantas fueron sostenidas verticalmente con hilo de ixtle. A los 107 d se practicó un despunte manual (eliminación de la yema terminal), para dejar diez hojas y tres racimos de flores por planta, y también se podaron todos los brotes laterales pero sin eliminar hojas inferiores, como recomiendan Nuez (1995) y Sánchez *et al.* (1999); de esta manera se inhibió el hábito de crecimiento indeterminado y las plantas se comportaron como si fueran de hábito de crecimiento determinado.

Los datos de crecimiento se registraron cada 14 d, a través de siete muestreos sistemáticos de tres plantas (tres repeticiones) cada uno, a partir de los 80 d después de la siembra, de acuerdo con la técnica de análisis de crecimiento indicada por Hunt (1990). En cada muestreo se determinaron los pesos secos de hojas, frutos y total de la parte aérea de las plantas cortadas al ras del sustrato, previo secado a 80 °C hasta peso constante (Coombs *et al.*, 1988). Las temperaturas máxima y mínima diarias del invernadero se registraron con un termómetro de máximas y mínimas. Las unidades calor diarias (UC) y acumuladas se calcularon por el método residual con la ecuación: $UC = (T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}})/2 - T_b$, donde T_b , es la temperatura base (Zaloom *et al.*, 1983). La temperatura base fue de 10 °C, como recomiendan Rangel y Silvas (1987) y Lorenz y Maynard (1988) para tomate. Para obtener un modelo empírico para cada densidad, se probaron las siguientes ecuaciones: polinomial cúbica ($y = a + bx + cx^2 + dx^3$), polinomial cuadrática ($y = a + bx + cx^2$), Richards ($y = a/(1 + \exp(b - cx)^{1/d})$) y Gauss $y = a \cdot \exp(-x + b)^2 / (2c^2)$. Con los programas de cómputo Statistical Analysis System SAS (1996) y Curveexpert (1993) se hicieron los análisis necesarios y se calcularon los coeficientes de determinación (R^2). El mejor modelo se seleccionó con base en la máxima R^2 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los modelos evaluados para el cultivo de tomate cv. Gabriela manejado con poda a tres racimos (para así evitar el hábito indeterminado) y sin restricciones de agua ni nutrimentos, la función de Gauss

$$y = a \cdot \exp(-x + b)^2 / (2c^2)$$

presentó el mejor ajuste ($R^2 = 0.96$) entre datos predichos y observados, en cada una de las densidades y en las tres variables de crecimiento, peso seco total, peso seco de hojas y peso seco de frutos (Cuadro 1). Como la función de Gauss se ajustó a cada densidad, se generó una función global que incluyó a la densidad como variable independiente; para esto se modificaron cada uno de sus tres parámetros (a , b y c). El coeficiente a se sustituyó por la máxima biomasa por planta, que se ajustó a la función $y = ax^b$, donde a y b son los parámetros de la ecuación resultante en cada variable y x es la densidad de plantas, con $R^2 = 0.96$. (Figura 1 A). El coeficiente b se sustituyó por la función logarítmica $y = a + b \cdot \ln(x)$, donde a y b son los parámetros de la función y $\ln(x)$ es el logaritmo natural de la densidad de plantas, con $R^2 = 0.85$ (Figura 1 B). El coeficiente c de la función de Gauss se mantuvo constante a través de las densidades (Figura 1 C), de modo que no hubo necesidad de sustituirlo. Los modelos empíricos de simulación basados en la función de Gauss, obtenidos para diversas variables se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Coeficientes de determinación (R^2) de diferentes modelos probados para predecir tres variables fisiológicas en función de cinco densidades de población, en el tomate cv. Gabriela crecido en invernadero con fertigación y con plantas podadas a tres racimos de flores.

Variable	Densidad (plantas/m ²)	Modelos			
		Polinomial cúbica	Polinomial cuadrática	Richards	Gauss
Biomasa total	1.7	0.99	0.98	0.99	0.99
	3.8	0.99	0.96	0.99	0.99
	6.8	0.97	0.93	0.97	0.97
	15.4	0.93	0.96	0.98	0.99
	66.6	0.98	0.90	0.94	0.97
Peso seco de hoja	1.7	0.95	0.91	0.90	0.99
	3.8	0.99	0.99	0.98	0.99
	6.8	0.96	0.93	0.95	0.96
	15.4	0.98	0.94	0.97	0.98
	66.6	0.98	0.95	0.95	0.98
Peso seco de fruto	1.7	0.99	0.91	0.90	0.98
	3.8	0.99	0.94	0.97	0.99
	6.8	0.97	0.93	0.92	0.97
	15.4	0.99	0.96	0.98	0.99
	66.6	0.97	0.87	0.85	0.98

Cuadro 2. Modelos empíricos, basados en la función de Gauss que simulan el crecimiento y rendimiento del tomate sometido a poda de tres racimos y densidades de población de 1.7 a 15.7 plantas/m², en relación a unidades calor.

Variable	Modelos
Biomasa total	$y = 219.4 \cdot dp^{(0.65)} \cdot \exp(-(2006.1 - 53.6 \cdot \ln(dp) - uc)^2 / (2446.4^2))$
Peso seco de hoja	$y = 62.1 \cdot dp^{(0.67)} \cdot \exp(-(1882.4 - 47.1 \cdot \ln(dp) - uc)^2 / (2493.4^2))$
Peso seco de fruto	$y = 100.3 \cdot dp^{(0.71)} \cdot \exp(-(1913.6 - 28.2 \cdot \ln(dp) - uc)^2 / (2326^2))$

Estas funciones de Gauss proporcionaron datos predichos de peso seco de hojas, frutos y total aéreo con buen ajuste estadístico ($R^2 = 0.96$), para cualquier densidad entre 0 y 15.4 plantas/m², en función de las unidades calor acumuladas. Dichos ajustes se ilustran para las densidades de 1.7 y 6.8 plantas/m² en las Figuras 2A a 2F; es decir, el modelo tiene capacidad para hacer simulaciones en una amplia diversidad de tamaños de follaje con plantas de tomate podadas a tres racimos.

En los demás modelos, con excepción del de Richards, no se pudo incorporar a la densidad como una variable independiente; es decir, requieren un modelo para cada densidad.

CONCLUSIONES

Con la función de Gauss y la sustitución de sus coeficientes por funciones matemáticas que incluyen el efecto de densidad de población, se lograron modelos capaces de simular la cinética de crecimiento de la biomasa total, la biomasa foliar y la biomasa de frutos, en el tomate cv. Gabriela cultivado en condiciones de invernadero y manejado a tres racimos de fruto por planta. Estos modelos son simples y tienen un alto grado de ajuste ($R^2 = 0.96$); sólo requieren como variables independientes a las unidades calor acumuladas y la densidad de plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Bannayan M, N M J Crout (1999) A stochastic modeling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Res.* 62: 85-95.
- Bertin N, E Heuvelink (1994) Dry-matter partitioning in a tomato crop: Comparison of two simulation models. *J. Hort. Sci.* 69:885-903.
- Coombs J D, O Hall, S Long P, J Scurlock M (1988) *Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad*. 2a. Ed. Trad. al español del Colegio de Postgraduados. Futura. S. A. 258 p.
- Curveexpert (1993) Software Version 1.3, A curve fitting system for windows. Starkville, MS 39759. Disponible en <http://www.ebicom.net/~dhyams/cvxpt.htm>.
- Hunt R (1990). *Basic Growth Analysis* Unwin Himan. London. 132 p.
- Jones J W, E Dayan, L H Allen, Van Keulen, H Challa. (1991) A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Trans. ASAE.* 34: 663-672.

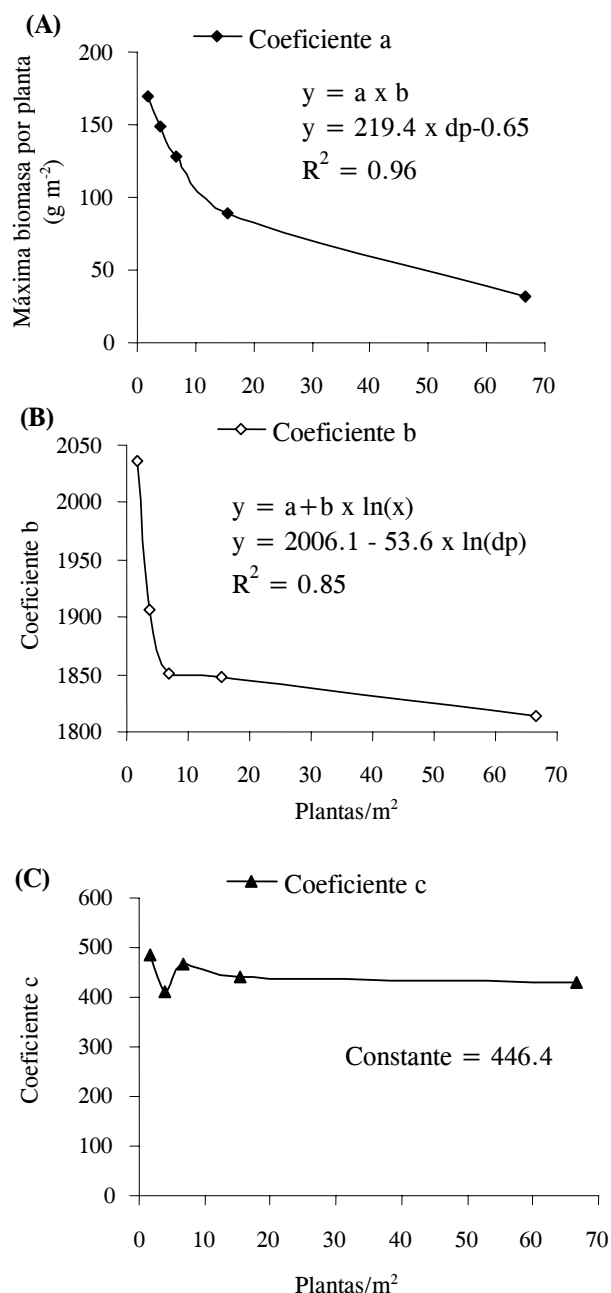


Figura 1. Relación entre los coeficientes (a, b y c) de la función de Gauss con la densidad de población, en el tomate cv. Gabriela cultivado en invernadero con poda a tres racimos. El coeficiente a se substituyó por la relación entre biomasa y densidad de población.

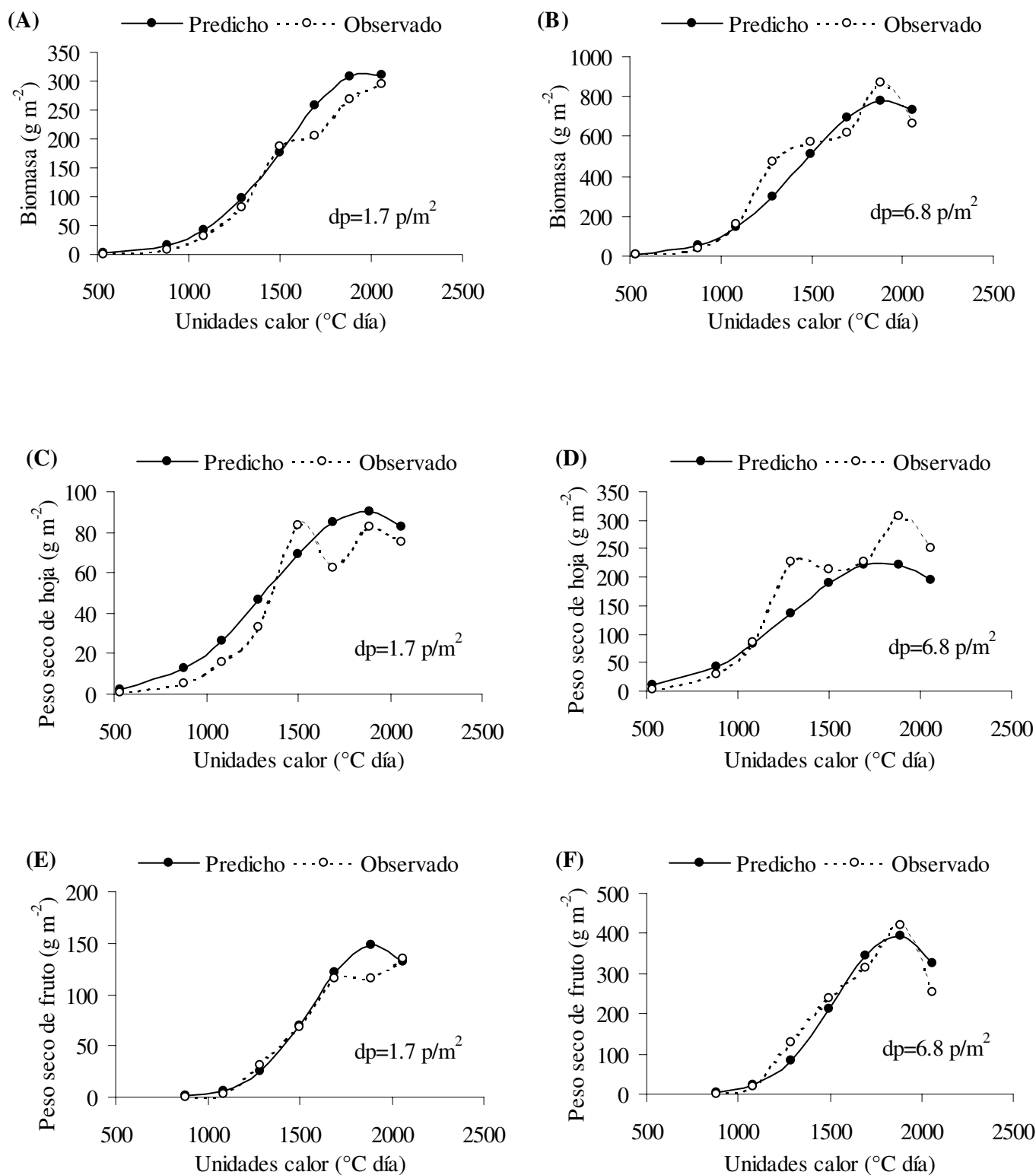


Figura 2. Cinética de crecimiento en biomasa total, peso seco de hoja y peso seco de fruto en las densidades de 1.7 y 6.8 plantas/ m^2 , con datos observados y predichos con la modificación a la función de Gauss. Se indica como dp = densidad de plantas/ m^2 .

- Lents W (1998)** Model applications in horticulture. A review. *Scientia Hort.* 74:151-174.
- Lorenz O A, D N Maynard (1988)** Knott's Handbook for Vegetables Growers. 3a. Ed. John Wiley and Sons. New York. 456 p.
- Nuez F (1995)** El Cultivo de Tomate. Ed. Mundi Prens. Madrid, España. 792 p.
- Pearl M R, C R Bruce (1998)** Agricultural System Modelling and Simulation. Ed. Marcel Dekker Inc. N. Y. 692 p.
- Rangel R J, J R Silvas (1987)** Fenología del tomate en tres fechas de siembra. *In: Avances de investigación en Hortalizas en el Estado de Sinaloa.* SARH-INIFAP-CAEVACU. Publicación N° 12. pp: 45-47.
- Sánchez del C F, J Ortiz, M C Mendoza, V A González, M T Colinas (1999)** Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate para un ambiente no restrictivo. *Agrociencia* 33:21-29.
- SAS Institute Inc (1996)** SAS Software release V 6.12, SAS Institute, Inc. Cary, N.C. 830 p.
- Spitters C J T, H Van Keulen, D W G Van Kraalingen (1989)** A simple and universal crop growth simulator : SUCROSS 87. *In: Simulation and System Management in Crop Protection.* Rabbinge R, S A Ward, H H Laar (eds). Wageningen: Pudoc. pp: 147-181.
- Zaloom F G, B P Goodel, T L Wilson, W W Barnett, W J Bentley (1983)** Degree days: The calculation and use of heat units in pest management. Leaflet No.21373, Division of Agriculture and Natural Resources, University of California. Berkeley, CA, 94720.