

APLICACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO VEGETAL DE UN COMPUESTO DE INTERÉS INDUSTRIAL

APPLICATION OF A MATHEMATICAL MODEL TO PREDICT THE VEGETABLE YIELD OF A COMPOUND OF INDUSTRIAL INTEREST

Lira-Conde, A.¹; Ocaranza-Sánchez, E.¹; Cadena-Iñiguez, J.^{2*}; Tapia-López, L.¹; Solís-Oba, M.M.¹; Ruiz-Font, A.¹

¹Instituto Politécnico Nacional Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla Km 1.5. Tlaxcala, México. ²Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí, Posgrado de Innovación en Manejo de Recursos Naturales. Iturbide No. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

*Autor de correspondencia: jocadena@gmail.com

ABSTRACT

With the aim of predicting yields of betacyanins from the *Beta vulgaris* L. root, for dietary use under field conditions, a simple potential equation, Richard equation and Werker model were applied in three agri-environments, and the following were determined: growth curves, leaf development, biomass and metabolite. Seven yield variables were evaluated, and eight field variables, five abiotic, 22 physical-chemical of the soil, and two of biochemical extraction. The data were also analyzed by principal components. The production of betacyanins in root was inversely related to its biomass, which agrees with results from other authors, indicating that the size and weight of the beet is negatively correlated to the concentration of betacyanins, although they do not report a model for such concentration. The yields of aerial biomass were directly related to those of betacyanins ($r^2 \geq 0.90$), highlighting that 11 out of 17 essential nutrients were decisive. When the biotic and abiotic factors that affect the root development are defined, in the study sites, versus the betacyanin yields, it is possible to manage under the model applied the most significant variables to optimize the yield, quality and industrial profitability in each agri-environment.

Keywords: betacyanins, *Beta vulgaris*, biomass, secondary metabolism.

RESUMEN

Con el fin de predecir rendimientos de betacianinas de raíz de *Beta vulgaris* L., para uso alimentario bajo condiciones de campo, se aplicó una ecuación potencial simple, ecuación de Richard y modelo de Werker en tres agroambientes, y determinaron curvas de crecimiento, desarrollo foliar, biomasa y metabolito. Se evaluaron siete variables del rendimiento, ocho de campo, cinco abióticas, 22 físico-químicas del suelo, y dos de extracción bioquímica. Los datos fueron analizados además por componentes principales. La producción de betacianinas en raíz se relacionó inversamente con su biomasa, lo que coincide con resultados de otros autores, que indican que el tamaño y peso del betabel correlacionan negativamente con la concentración de betacianinas, aunque éstos no reportan un modelo para dicha concentración. Los rendimientos de biomasa aérea estuvieron directamente relacionados con los de betacianinas ($r^2 \geq 0.90$), resaltando que once de 17 nutrimentos esenciales fueron determinantes. Al quedar definidos los factores bióticos y abióticos que afectan el desarrollo de raíz, en los sitios de estudio, contra rendimientos de betacianinas, es posible gestionar bajo el modelo aplicado, las variables más significativas para optimizar el rendimiento, calidad y rentabilidad industrial en cada agroambiente.

Palabras clave: Betacianinas, *Beta vulgaris*, biomasa, metabolismo secundario.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una creciente demanda de los colorantes producidos a partir de frutas y vegetales para su uso en alimentos por lo que los sistemas de producción agrícola deben ser más eficientes y sostenibles para poder satisfacer las necesidades de materias primas para la transformación de alimentos con insumos de colorantes naturales (Ávalos y Pérez, 2009; Bourgaud *et al.*, 2001; Monteiro *et al.*, 2009; Davies, 2004; Stintzing y Carle, 2007). Lo anterior induce a seleccionar las condiciones ambientales que permitan un manejo eficiente de los recursos disponibles en un sistema de producción agrícola considerando la mayor cantidad de variables involucradas (Lobell y Burke, 2010; Gaelen, 2011; Oteng *et al.*, 2013; Nagarjuna *et al.*, 2011).

Dentro de los colorantes más comunes de origen vegetal están las betalainas, antocianinas, β -caroteno, curcumina, espirulina, bixina, luteína y clorofila (Popa *et al.*, 2015). Las betalainas son colorantes naturales, constituyen una clases de metabolitos secundarios que se encuentran en la especies del orden de *Caryophyllales* sintetizados a partir de la tirosina como parte de la ruta del ácido Shikimico (Strack *et al.*, 2003; Sepúlveda *et al.*, 2004; Kujala *et al.*, 2002). La fuente más importante es *Beta vulgaris* L. que produce principalmente betanina, su rendimiento es de 50-70 t ha⁻¹ de biomasa fresca de raíz, cuyo contenido de betalainas oscila de 0.4 a 20 mg g⁻¹ de raíz (Pavokovi y Krsnik, 2011; Strack *et al.*, 2003). El crecimiento, calidad de la raíz betabel, concentración de betalainas se ve afectada por factores ambientales (Feller y Fink, 2004), y nutrimentos minerales que tienen funciones específicas y esenciales en el metabolismo (Contliffe y Goodwin, 1974), que se pueden manipular para aumentar la producción de biomasa y colorante a escala comercial (Imtiyaj y Giridhar, 2015). Con base en lo anterior, se aplicó un modelo matemático con el fin de predecir el rendimiento de biomasa y betalainas en *Beta vulgaris* L, bajo condiciones de cultivo a campo abierto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo de simulación de cultivo

Para estimar la cantidad de biomasa por unidad de nutriente y cantidad de CO₂ fijado en una planta a partir de la temperatura de la atmósfera, radiación interceptada y agua transpirada por la cobertura foliar, Webb (1997) propuso un modelo donde la producción de bio-

masa se puede expresar como la respuesta del cultivo a la irrigación o lluvia, evapotranspiración y radiación solar interceptada por la cobertura foliar (Ecuación 1) (Werker y Jaggard, 1998; Steven *et al.*, 1986). Cuando el coeficiente de respuesta a la irrigación o lluvia es igual a cero ($K_y=0$) la ecuación (1) se simplifica al modelo de Montheit (Ecuación 2) en la cual la producción de biomasa solo depende de la radiación solar interceptada por el área foliar (Monteith & Moss, 1977).

$$Y = \epsilon \sum f_s (1 - K_y) \left(1 - \frac{E_T}{\left(\frac{\epsilon}{q_D} \right) \sum D f_s} \right) \quad (1)$$

$$Y = \epsilon \sum f_s \quad (2)$$

Dónde: Y =Producción potencial de biomasa seca, ϵ =Coeficiente de conversión de radiación, f =Área foliar, s =Radiación solar, K_y =Coeficiente de respuesta a la irrigación o lluvia, E_T =Evapotranspiración total, q_D =Coeficiente de transpiración de la materia seca.

Para describir el desarrollo del área foliar se pueden usar los modelos de crecimiento (Setiyono, 2007; Malnoua, 2008; Yin *et al.*, 2000; Ashory, 2013), los modelos más utilizados son: Logístico (Ecuación 3), Gompertz (Ecuación 4) y Richard (Ecuación 5), además del modelo de Barrel (Ecuación 6) basado en el modelo logístico (Lukombo *et al.*, 2013) y Richard S (Ecuación 7) basado en el modelo de Richard, que integran dos parámetros más para describir la senescencia de la cobertura foliar de las plantas.

$$f = f_{\max} \left[1 + e^{b(t-t_0)} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$f = f_{\max} e^{-e^{b(t-t_0)}} \quad (4)$$

$$f = f_{\max} \left[1 + b e^{c(t-t_0)} \right] \left(\frac{1}{1-m} \right) \quad (5)$$

$$f = f_{\max} \left[\frac{1}{1 + e^{b(t-t_0)}} - e^{a(t-t_f)} \right] \quad (6)$$

$$f = f_{\max} \left[1 + b e^{c(t-t_0)} + e^{a(t-t_f)} \right] \left(\frac{1}{1-m} \right) \quad (7)$$

Dónde: f =Área foliar, f_{\max} =Área foliar máxima, t_0 =Punto de inflexión, t_f =Punto de senescencia, a =Tasa de senescencia, b =Tasa de crecimiento, c =Tasa de crecimiento, t =Tiempo térmico acumulado (GDA), m =Cinética de crecimiento.

Para estimar la cantidad de radiación interceptada la ecuación de Montheit (Ecuación 2) se resuelve como una integral realizando un cambio de la variable radiación solar (s) por los Grados Día Acumulados (GDA) y se sustituyen el área foliar (f) por los modelos de curva de crecimiento (Ecuación 8). Para calcular la biomasa seca producida se tomaron en cuenta los fenómenos de mantenimiento y respiración donde la tasa de crecimiento disminuye mientras la biomasa seca aumenta usando la ecuación de Werker (1998) (Ecuación 9), donde se sustituyó el potencial de producción de biomasa seca (P) por la cantidad de radiación interceptada (Y) de la ecuación (8) para obtener el modelo de Werker-Montheit (Ecuación 10). Finalmente para representar la partición de la biomasa (Ecuación 11) hacia los órganos de la planta se utilizó el modelo de Werker (Ecuación 9), considerando que el coeficiente de respiración y mantenimiento (γ) es igual al del modelo de Werker-Montheith.

$$Y = \epsilon \int_0^{GDA} fGDA \quad (8)$$

$$Y = \left(\frac{1}{\gamma}\right)(1 - e^{-\gamma P}) \quad (9)$$

$$Y = \left(\frac{1}{\gamma}\right)\left(1 - e^{-\gamma \epsilon \int_0^{GDA} fGDA}\right) \quad (10)$$

$$P_{br} = \frac{Y_r}{Y} = \frac{\left(\frac{1}{\gamma}\right)(1 - e^{-\gamma \epsilon_r Y})}{\left(\frac{1}{\gamma}\right)(1 - e^{-\gamma \epsilon_t Y})} = \frac{(1 - e^{-\gamma \epsilon_r Y})}{(1 - e^{-\gamma \epsilon_t Y})} \quad (11)$$

Dónde: Y =Biomasa seca neta, P =Producción potencial de biomasa seca, γ =Coeficiente de respiración y mantenimiento, ϵ =Coeficiente de conversión total, P_{br} =Fracción de biomasa seca de raíz, Y_r =Biomasa seca de raíz, ϵ_r =Coeficiente de conversión de raíz.

Para determinar el grado interacción entre los factores que determinan y afectan el crecimiento del cultivo durante su desarrollo se realizó un monitoreo del clima, manejo del cultivo, características del suelo y el desarrollo fenológico del cultivo de tres parcelas de betabel en el municipio de Lázaro Cárdenas, Tlaxcala a 2,520 m (Figura 2) (SGET, 1987). Las parcelas, sitios experimentales, se ubicaron en 19° 31' 39" N; 97° 59' 19" O a 2506 m; 19° 31' 42" N; 97° 59' 25" O a 2508 m, y en 19° 33' 27" N; 97° 59' 08" O a 2531 m.

Las semillas utilizadas para el sembrado de los sitios experimentales fueron betabel rojo variedad Redondo F1-Bejo (*Beta vulgaris*) adquiridas en Agroinsumos del centro S.A. de C.V., el sembrado se realizó de manera directa a dos líneas, con una separación de 30 cm, sobre los lomos a una profundidad máxima de 1 cm, para obtener una densidad de entre 225,000-250,000 plantas ha⁻¹. En los sitios experimentales se realizaron labores de preparación de suelo: barbecho 15 días antes de la siembra, rastra y surcados para formar lomos de 90 cm de ancho tres días antes de la siembra.

El control de malezas se realizó de manera manual a los 30 y 60 días después de la siembra o cuando la maleza fue muy abundante; los riegos se aplicaron cada tercer día desde la siembra hasta la aparición de las primeras dos hojas verdaderas de la plántula (10 a 15 días después de la siembra), posteriormente se aplicaron riegos de auxilio cada semana cuando la precipitación no fue lo suficientes para cubrir las necesidades del cultivo mediante un sistema de aspersion.

La fertilización suministrada fue 240N-36P-30K (nitrógeno, fósforo y potasio) para el sitio experimental uno; 198N-30P-30K para el sitio dos, y 120N-15P-10K para el tres, dividida en dos aplicaciones (a los 30 y 60 días después de sembrado). Se realizó un control preventivo de plagas (áfidos, trips y lepidópteros) a los 80 días de desarrollo mediante la aplicación de 0.25 L ha⁻¹ de insecticida sistémico Muralla® Delta 190 OD de Bayer.

Métodos analíticos

Las variables monitoreadas del cultivo fueron: área foliar, biomasa aérea fresca, biomasa fresca de la raíz, biomasa seca aérea, biomasa seca de raíz, concentración de clorofila a y betacianinas. La cuantificación de estas variables se realizó a la unidad experimental de 11 plantas cada dos semanas a partir de la emergencia; la muestra

se obtuvo de un lote seleccionado por números aleatorios del sitio experimental que previamente se dividió en 10 lotes, descartando los bordes. Las muestras se llevaron al laboratorio donde se lavaron con agua para eliminar restos de suelo, se dejaron escurrir y secar a la sombra por 24 horas.

El área foliar se calculó como la suma del área de todas las hojas, considerando la hoja como una elipse. La biomasa fresca de la raíz y hojas se determinó pesando cada parte de la planta en una balanza analítica. La biomasa seca de la raíz y hojas se calculó a partir de humedad de una mezcla compuesta que se llevó a una termo balanza (Sartorius® MA35M) a una temperatura de 105 °C (Bradley, 2010). La concentración de clorofila a de las hojas frescas de betabel se determinó mediante espectrofotometría utilizando la ecuación propuesta por Lichtenthaler (1987) (Ecuación 12) usando alcohol etílico a 90% para la extracción de la clorofila de una mezcla compuesta de las hojas que se formó mediante una perforadora de hojas. La absorbancia del extracto alcohólico se obtuvo en una celda de cuarzo de 1 cm utilizando un espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific® modelo G10S UV-UVIS) calibrado con etanol al 90% como blanco (Sumanta *et al.*, 2014).

$$\text{Clorofila a} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{ml}} \right) = 13.36 \times A_{664.1} - 5.19 \times A_{648.6} \quad (12)$$

Dónde: $A_{664.1}$ =Absorbancia a 664.1 nm, $A_{648.6}$ =Absorbancia a 648.6 nm.

La concentración de betacianinas de la raíz fresca del betabel se determinó mediante espectrofotometría usando la ecuación propuesta por Nieto (Ecuación 13) en Castellar *et al.* (2003), para lo cual se extrajeron las betacianinas en agua destilada de una muestra compuesta de las raíces del betabel. La absorbancia del extracto se obtuvo en una celda de cuarzo de 1 cm utilizando un espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific® modelo G10S UV-UVIS) calibrado con agua destilada como blanco.

$$\text{Betacianinas} \left[\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] = \frac{A \times DF \times MW \times 10^3}{\epsilon \times l} \quad (13)$$

Dónde: A =Absorbancia a 538 nm, DF =Factor de dilución, MW =Peso molecular de las betacianinas (550 g mol⁻¹), ϵ =Coeficiente de extinción (60,000 L mol⁻¹ cm⁻¹), l =Grosor de la celda de cuarzo (1 cm).

Las variables de manejo registradas durante el desarrollo del cultivo fueron: fecha de siembra, densidad, día de emergencia, dosis y fecha de fertilización, labores culturales y aplicación de riegos. Los datos climáticos de cada sitio experimental se obtuvieron por interpolación espacial (Danfort *et al.*, 2007), regresión de elevación de parámetros en pendientes independientes (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) (OMM, 2011), gradiente altimétrico y complementación por promedios vecinales de los registros de tres estaciones meteorológicas Vantage Pro2® marca Davis Instrument® ubicadas en Tlaxco (19° 36' 53" N; 98° 07' 08" O, y altura de 2551 m), Terrenate (19° 28' 53" N; 98° 07' 08" O; 2693 m) y Virreral (19° 32' 00" N; 97° 53' 50" O; 3087 m), las cuales registran datos cada 30 minutos y están a cargo de Centro de Investigación en Cambio Climático (UAT-UNAM). Las variables recuperadas de cada estación meteorológica fueron: temperatura, precipitación pluvial y humedad relativa; la radiación se recuperó de la estación meteorológica ubicada en Tlaxco. La acumulación de tiempo térmico o Grados Día Acumulados (GDA) durante el desarrollo del cultivo se calculó como la suma de los grados día de desarrollo (GDD) considerando la temperatura umbral del betabel de 7 °C (Ecuación 14), debido a que la temperatura mínima para el desarrollo de betabel oscila entre 5 °C y 7 °C (Singh y Dhaliwal, 1972).

$$GDD = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} - u \quad (14)$$

Dónde: GDD =Grados día de desarrollo, T_{max} = Temperatura máxima por día en °C, T_{min} =Temperatura mínima por día en °C, u =Temperatura umbral en °C.

Las características de suelo se obtuvieron a partir de muestras compuestas de suelo de los sitios experimentales tomadas mediante una barrena de media caña a 30 cm dos semanas antes del establecimiento del cultivo, y analizadas por el laboratorio Fertilab S.A. de C.V. en Celaya, Guanajuato; los datos obtenidos fueron: textura de suelo, punto de saturación, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente, conductividad hidráulica, densidad aparente, pH, carbonatos totales, salinidad, concentración de materia orgánica, fósforo, nitrógeno, calcio, magnesio, sodio, fierro, zinc, manganeso, cobre, boro y azufre. Con los valores estadísticos de las 15 variables bióticas y 27 abióticas a lo largo del desarrollo fenológico del cultivo de los tres sitios experimentales se realizó el análisis de componentes

principales y de ajuste del modelo matemático utilizando los módulos Numpy, Sympy y Matplot del programa Scientific Python Development Environment (SPYDER) versión 2.3.5.2 con el sistema operativo Windows 8.1. El ajuste a las curvas de crecimiento para determinar el valor de los parámetros se realizó con el método de Levenberg-Marquardt y para calcular la biomasa seca producida se usó el método numérico de Romberg.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de componentes principales se utilizaron las variables climáticas, cultivo, suelo y manejo para construir una matriz de 30×19. Los primeros cinco componentes principales explicaron el 98% de la variación total de los datos (Cuadro 1), sin embargo los tres primeros fueron suficientes al registrar 91% de la variación total, aunque solo en el quinto componente aparece la concentración de betacianinas. Las variables con mayor contribución relativa en el primer componente fueron la densidad aparente, pH, Fósforo Bray, Potasio, Calcio, Cobre, Boro, Azufre y fertilización de Nitrógeno, Fósforo y Potasio; en el segundo, fueron grados día, densidad de plantas, concentración de clorofila, Nitrógeno, Magnesio, Sodio, Manganeseo y Azufre; para el tercero, los grados día, temperatura, radiación solar, área foliar, biomasa seca, en el cuarto, la temperatura, humedad y concentración de clorofila, y en el quinto, a la temperatura, biomasa seca de raíz, concentración de betacianinas, de clorofilas y fertilización nitrógenada.

Aplicando el modelo de Barrel y Richard S, fue posible proyectar la producción de biomasa durante el ciclo del cultivo, desde emergen-

cia hasta senescencia utilizando los valores obtenidos de los modelos Logístico (Richard y Weker-Montheit) (Cuadro 2). Los resultados obtenidos del ajuste mostraron que el modelo Logístico sobre estima el crecimiento del área foliar y biomasa seca durante la primera etapa de desarrollo del cultivo (GDA<500) (Figura 1 A), mientras que el Richard describió mejor el desarrollo del área foliar y biomasa seca durante todo el desarrollo del cultivo ($r^2 \geq 0.001$) (Figura 1 B).

El modelo propuesto para la partición de biomasa de raíz se ajustó a los datos experimentales para los tres modelos de crecimiento con el mismo coeficiente de correlación ($r^2=0.8854$). A partir de un análisis de correlación

Cuadro 1. Matriz de componentes principales.

Variable	CP1	CP2	CP3	CP 4	CP5
Eigenvalue	16.471	6.984	3.942	1.475	0.558
Proporción	0.549	0.233	0.131	0.049	0.019
Acumulativo	0.549	0.782	0.913	0.962	0.981
Grados día	0.052	-0.256	-0.330	0.175	0.006
Temperatura	0.085	-0.049	0.297	0.471	-0.431
Humedad	0.051	-0.066	-0.192	-0.685	-0.107
Radiación solar	0.157	-0.183	-0.272	0.170	0.022
Densidad de plantas	0.168	0.276	-0.017	0.053	0.027
Área foliar	0.193	-0.007	-0.309	-0.012	0.008
Biomasa seca total	0.161	-0.038	-0.366	0.046	-0.162
Biomasa seca de raíz	0.138	-0.057	-0.380	0.123	-0.252
Biomasa seca de aéreo	0.183	-0.008	-0.321	-0.066	-0.023
Concentración de betacianinas	-0.177	0.168	-0.013	-0.047	0.579
Concentración de clorofila	-0.042	-0.274	-0.095	0.413	0.430
Capacidad de campo	0.166	0.278	-0.018	0.053	0.027
Densidad aparente	0.201	-0.184	0.147	-0.069	0.036
pH	0.241	0.000	0.104	-0.026	0.041
Materia orgánica	-0.239	-0.068	-0.081	0.008	-0.041
Fósforo Bray	0.238	0.074	0.079	-0.007	0.041
Potasio	0.240	-0.017	0.109	-0.030	0.041
Nitrógeno	-0.179	0.231	-0.152	0.078	-0.032
Calcio	0.238	0.077	0.078	-0.006	0.040
Magnesio	0.121	0.325	-0.053	0.070	0.019
Sodio	0.034	0.364	-0.103	0.090	0.004
Fierro	0.198	-0.193	0.148	-0.071	0.035
Manganeseo	-0.186	-0.248	-0.000	-0.043	-0.030
Cobre	0.240	-0.009	0.107	-0.028	0.041
Boro	0.219	-0.136	0.139	-0.058	0.038
Zinc	0.125	0.322	-0.050	0.069	0.020
Azufre	0.227	0.142	0.052	0.012	0.038
Fertilización de Nitrógeno	0.211	-0.082	-0.123	0.055	0.409
Fertilización de Fósforo	0.229	-0.100	0.109	-0.037	0.060
Fertilización de Potasio	0.201	-0.184	0.147	-0.069	0.036

CP: Componente principal.

entre las variables que aparecen en el quinto componente se encontró que la correlación lineal más alta fue entre biomasa seca de raíz y cantidad de betacianinas en raíz ($r^2=0.42$), por lo que al ajustar estos datos con una ecuación potencial (Ecuación 15) se obtuvo un alto coeficiente de correlación ($r^2>0.90$) donde la cantidad de betacianinas está en función de la biomasa seca de la raíz. Realizando la derivación de la ecuación (15) respecto a la biomasa seca de la raíz se obtuvo la ecuación (16) que describe la concentración de betacianinas en la raíz en función de la biomasa

Cuadro 2. Parámetros de ajuste de los modelos de Barrel y Richard S para las curvas de desarrollo del área foliar de *B. vulgaris* del sitio experimental uno.

Parámetro	Modelo	
	Barrel	Richard S
f_m (cm ²)	2473	2655
t_0 (°C)	718	842
t_f (°C)	2200	2200
a	0.009	0.009
b	-8.1036×10^{-3}	3.7749×10^{-2}
c		-5.0034×10^{-3}
m		1.0908
r^2	0.99028	0.9912

sa seca de la raíz durante su desarrollo fenológico (Figura 2). Sustituyendo el valor de $Y_r=1$ en la Ecuación (27), esta se simplifica al producto de las constantes fenotípicas a y b (Cuadro 2) que indican el potencial de producción de betacianinas en la raíz de *B. vulgaris*.

$$Bet = bY_r^a \quad (15)$$

$$\frac{dBet}{dY_r} = abY_r^{(a-1)} \quad (16)$$

Dónde: Bet =Betacianinas (mg), Y_r =Biomasa seca de raíz (g), a y b =Constates fenotípicas.

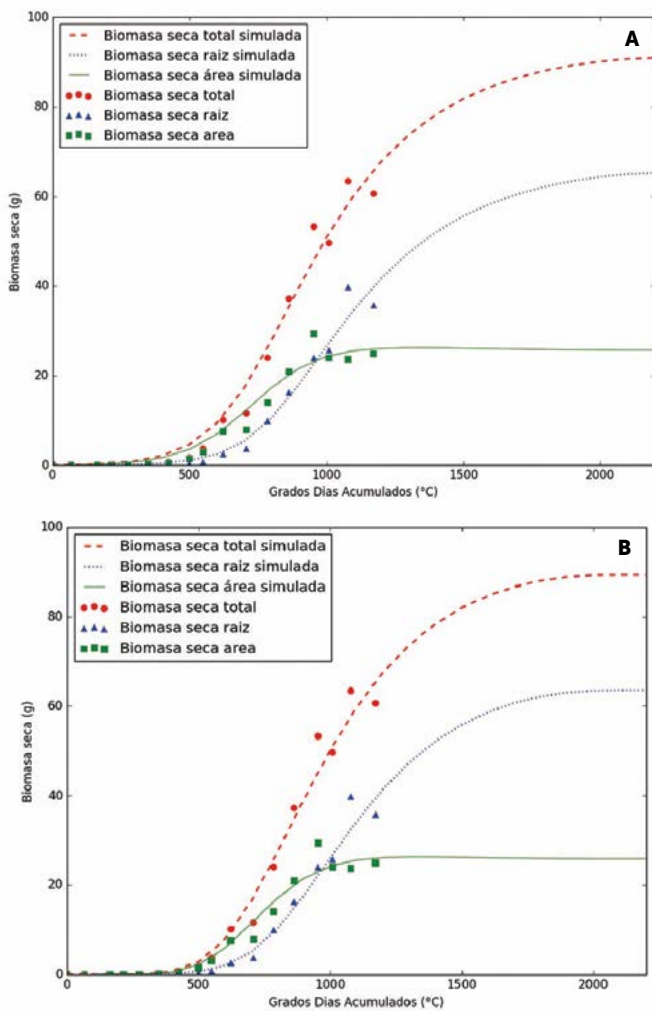


Figura 1. Proyección del desarrollo de biomasa de *Beta vulgaris*, desde siembra hasta senescencia, en el sitio experimental uno. A: mediante el modelo de Barrel. B: mediante el modelo de Richard S.

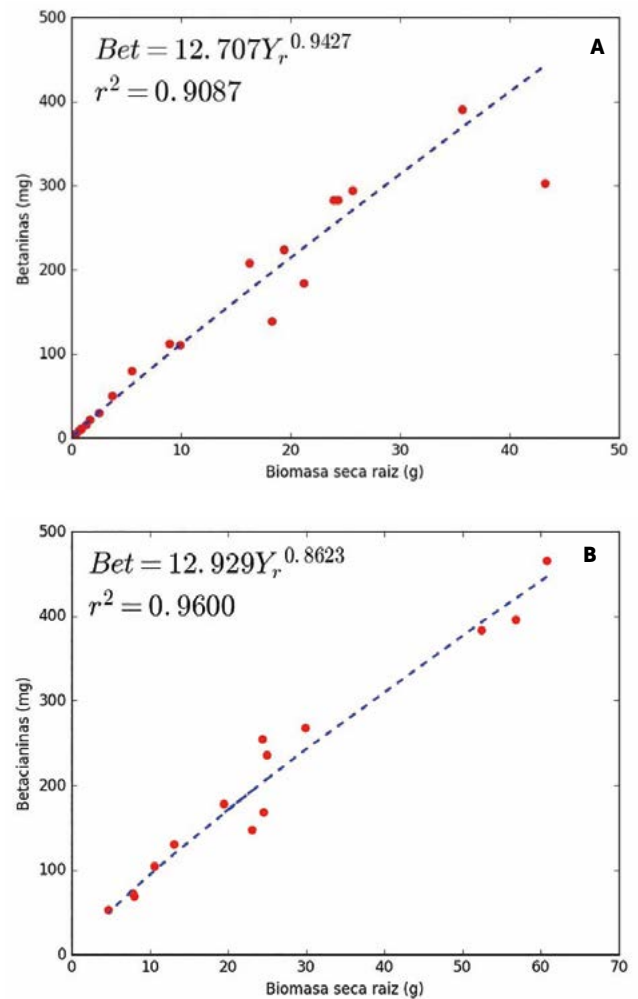


Figura 2. A: Simulación de producción de betacianinas respecto a biomasa de raíz en *Beta vulgaris* var. Redondo F1 usando el modelo potencial. B: Simulación de producción de betacianinas respecto a biomasa de raíz en *Beta vulgaris* var. Bettollo F1 usando el modelo potencial.

Al Ajustar los datos experimentales de los tres sitios experimentales de la variedad Redondo de *B. vulgaris*, F1 se obtuvieron las constantes fenotípicas *a* y *b* (Cuadro 2) (Figura 2 A), las cuales se compararon con las constantes fenotípicas de la variedad vegetal Bettollo F1 cultivado en la comunidad de San Francisco Tecocac, Huamantla (19° 23' 05" N; 97° 55' 52" O) durante el ciclo agrícola PV-2016 (Cuadro 3) (Figura 2 B), con lo que se observó un potencial de producción de betacianinas más alto en la variedad Redondo F1.

A partir de los datos experimentales se observó que la cantidad de betacianinas producidas en la raíz se podría deber a la actividad metabólica desarrollada durante el crecimiento de los diferentes tejidos que forman la raíz de *B. vulgaris*, ya que las enzimas y hormonas (Zeid, 1985) que están involucradas en la síntesis de betacianinas también están involucradas en los procesos de división celular, por lo tanto una alta tasa de crecimiento de los tejidos producirá mayor cantidad de betacianinas tal como lo reporta Kujala (2002) y Gaertner (2005). Además la concentración de betacianinas en la raíz de *B. vulgaris* esta inversamente relacionada a la cantidad de biomasa de la misma, lo que coincide con los resultados reportados por Nilson (1973), Von Elbe (1977) y Watso y Gabelman (1984), donde el tamaño y peso del betabel se correlacionaron negativamente con la concentración de las betacianinas, aunque estos autores no reportaron un modelo para dicha concentración.

Según el análisis de componentes principales las características del suelo (Densidad aparente, pH, Ni-

Cuadro 3. Parámetros de la Ecuación potencial de la producción de betacianinas en la raíz de *B. vulgaris*.

Grupo	Parámetro			
	a	b	ab	r ²
Sitio experimental 1	0.9908	12.212	12.01	0.9408
Sitio Experimental 2	0.9368	11.122	10.42	0.9496
Sitio experimental 3	0.9271	12.691	11.76	0.9061
Redondo F1	0.9427	12.707	11.97	0.9087
Betollo F1	0.8623	12.929	11.14	0.9600

trogeno, Fósforo Bray, Potasio, Calcio, Cobre, Boro, Azufre, Magnesio, Sodio, Manganeso y Azufre), sí como, 11 de los 17 nutrientes, y radiación solar (Grados día, densidad de plantación) tuvieron influencia sobre el desarrollo de la raíz *B. vulgaris*, y producción de betacianinas en los tres sitios experimentales, por lo que la producción de biomasa y betalainas quedo supe-ditada a la disponibilidad de nutrientes de los sitios experimentales; N₂₈₅ P₁₆₆ K₄₇₄ para el sitio 1, N₂₁₂ P₃₇ K₃₀₈ para el sitio 3 y N₂₃₅ P₈₄ K₄₁₆ para el sitio 2, esto también se reflejó en el ajuste de las curvas de crecimiento, donde el área foliar máxima alcanzable para los sitios experimentales 1, 3 y 2 fue de 2655 cm², 1837 cm² y 1337 cm² respectivamente en el modelo de Richard S.

Finalmente el impacto de estos factores nutrimentales fue observado también en el producto del coeficiente fenotipos (ab) del modelo potencial donde se mantuvo el orden descendente; 12.01 para el sitio experimental 1, 11.76 para el sitio 3, y 11.42 para el sitio 2 según la disponibilidad de nutrimentos durante el desarrollo del cultivo.

CONCLUSIONES

Aplicando los modelos Werker y Monteith en el modelo de Webb fue posible predecir la producción y partición de biomasa en la parte aérea y raíz de *B. vulgaris*. El ajuste de los modelos de curvas de crecimiento Logística, Gompertz y Richard permitió estimar el crecimiento del área foliar durante el desarrollo del cultivo desde la emergencia hasta que alcanza su máximo crecimiento encontrado que el modelo de Richard un factor de correlación (r²) 0.001 más alto, por lo que se ajusta mejor a los datos experimentales, pero no logran describir la senescencia, mientras que con el modelo de Barrel y "Richard S" fue posible describir el desarrollo del área foliar, desde la emergencia a la senescencia. Además se encontró que mediante una ecuación potencial es posible predecir la concentración de betacianinas en la raíz de *Beta vulgaris* L. en función de su biomasa seca (r² ≥ 0.90), debido a que la producción de betacianinas en la raíz de *B. vulgaris* está directamente relacionada con su tasa de crecimiento. Entonces para mejorar el rendimiento de betalainas y del cultivo, utilizado para la extracción de colorantes, es necesario gestionar anticipadamente el suministro o control de los factores biótico o abiótico del sistema de producción que afectan el crecimiento del cultivo, para favorecer la mayor biomasa de raíz para mayor cantidad de betalainas (betacianinas y betaxantinas) acumuladas.

LITERATURA CITADA

- Alard D., Wraya V., Grotjahna L., Reznik H., Strack D. 1985. Neobetanin: isolation and identification from *Beta vulgaris*. *Phytochemistry* 24(10): 2383–2385.
- Ashory S. A. 2013. Application of Richards function to the description of growth of Green gram. *International Journal of Farming and Allied Sciences* 2(18): 694-697.
- Ávalos G. A., Pérez U. C. E. 2009. Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología). Serie Fisiología Vegetal* 2(3): 119-145.
- Bourgau F., Gravot A., Milesi S., Gontier E. 2001. Production of plant secondary metabolites: a historical perspective. *Plant Science* 161(5): 839–851.
- Bradley Jr. R. L. 2010. Moisture and total solids analysis. *Food Analysis*. Ed. Nielsen SS, 4th ed. New York: Springer. 85–104 p.
- Castellar R., Obón J. M., Alacid M., Fernández L. J. A. 2003. Color Properties and Stability of Betacyanins from *Opuntia* Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51(9): 2772–2776.
- Contcliffe O., Goodwin P.R. 1974. Effect of nitrogen rates, sources, and various anions and cations on NO₃ accumulation and nutrient constituents of table beets. *Agronomic Journal*, 66(1): 779-783.
- Danfort C. M., Kalnay E., Miyoshi T. 2007. Estimating and Correcting Global Weather Model Error. *American Meteorological Society* 135: 281-299.
- Davies K. (Ed.). 2004. Plant pigments and human health. Annual plant reviews, plant pigments and their manipulation, Vol. 14. John Wiley & Sons. 248-267.
- Feller C., Fink M. 2004. Nitrate content, soluble solids content, and yield of table beet as affected by cultivar, sowing date and nitrogen supply. *HortScience* 39(6): 1255-1259.
- Freckleton R. P., Watkinson A. R., Webb D. J., Thomas T. H. 1999. Yield of sugar beet in relation to weather and nutrients. *Agricultural and Forest Meteorology* 93(1): 39-51.
- Gaelen H. V. 2011. Simulating yield response of barley to weed infestation in AquaCrop: case study Tigray, Northern Ethiopia. (Master dissertation, Department of Earth and Environmental Sciences, University of Leuven).
- Gaertner V. L. and Goldman I. L. 2005. Pigment distribution and total dissolved solids of selected cycles of table beet from a recurrent selection program for increased pigment. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130(3): 424-433.
- Imtiyaj K. M., Giridhar P. 2015. Plant betalains: Chemistry and biochemistry. *Phytochemistry*, 117: 267-295.
- Kamara K.A. 2001. Nutrición, Regulación del Crecimiento y Desarrollo Vegetal. *Boletín informativo de Intrakam S.A. de C.V. Mexico*: 1-14 p.
- Kujala T. S., Vienola M. S., Klika K. D., Loponen J. M., Pihlaja K. 2002. Betalain and phenolic compositions of four beetroot (*Beta vulgaris*) cultivars. *European Food Research and Technology* 214(6): 505-510.
- Lichtenthaler H. K. 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology* 148: 350-382.
- Lobell D. B., Burke M. B. 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(11): 1443–1452.
- Lukombo L. J. C., Kizungu V. R., Nkongolo K. C. K., Lufuluabo M. M., Tsumbu M. 2013. Growth and Leaf Area Index Simulation in Maize (*Zea mays* L.) under Small-Scale Farm Conditions in a Sub-Saharan African Region. *American Journal of Plant Sciences* 4: 575-583.
- Malnoua C. S., Jaggard K. W., Sparkes D. L. 2006. A canopy approach to nitrogen fertilizer recommendations for the sugar beet crop. *European Journal of Agronomy* 25(3): 254–263.
- Monteiro C. D. A. H., Pereira A. C., Rodrigues D. S. A. C., Gouveia S. T., Barbosa M. K. C. 2009. Study on efficiency of betacyanin extraction from red beetroots. *International Journal of Food Science & Technology* 44(12): 2464-2469.
- Monteith J. L., Moss C. J. 1977. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 281(980): 277-294.
- Moreno D. A., García-Viguera C., Gil J. I., Gil-Izquierdo A. 2008. Betalains in the era of global agri-food science, technology and nutritional health. *Phytochemistry Reviews* 7(2): 261-280.
- Nagarjuna K. R., Sailaja B., Voleti S.R. 2011. Crop Modelling with Special Reference to Rice Crop. *Rice Knowledge Management Portal*. Recuperado el 12/04/17, <http://www.rkmp.co.in/sites/default/files/ris/research-themes/Crop%20Modelling%20with%20Special%20Reference%20to%20Rice%20Crop.pdf>
- Nilson T., 1973. The pigment content in beetroot with regard to cultivar, growth, development and growing conditions. *Swedish Journal of Agriculture Research* 3(4): 187-200.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Ed.) 2010. Capítulo 5: Métodos estadísticos para analizar conjuntos de datos (1-20). Guía de prácticas climatológicas (OMM-Nº 100). Ginebra.
- Oteng D. P., Yeboah S., Addy S. N. T., Amponsah S. Owusu D. E. 2013. Crop modeling: A tool for agricultural research – A review. *Journal of Agricultural Research and Development* 2(1):1-6.
- Pavokovi D., Krsnik-Rasol M. 2011. Complex Biochemistry and Biotechnological Production of Betalains. *Food Technology and Biotechnology* 49(2):145–155.
- Popa A., Moldovan B., David L. 2015. Betanin from Red Beet (*Beta vulgaris* L.) Extraction conditions and evaluation of the thermal stability. *Chimie -Bucharest- Original Edition* 66(3): 413-416.
- Secretaría de Gobernación y Gobierno del Estado de Tlaxcala (SGGET) (ed.).1987. Los Municipios de Tlaxcala. *Enciclopedia de los Municipios de México*. Centro de Estudios Municipales.
- Sepúlveda J. G., Rueda B. P., Porta H., Rocha S. M. 2004. Betacyanin synthesis in red beet (*Beta vulgaris*) leaves induced by wounding and bacterial infiltration is preceded by an oxidative burst. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 64(3): 125-133.
- Setiyono T. D., Weiss A., Specht J. E., Bastidas A. M., Cassman K. G., Dobermann A. 2007. Understanding and modeling the effect of temperature and day length on soybean phenology under high-yield conditions. *Field Crops Research* 100(2-3): 257–271.
- Singh N.T., Dhaliwal G.S. 1972. Effect of soil temperature on seedling emergence in different crops. *Plant and Soil* 37(2): 441-442.
- Steven M.D., Biscoe P.V., Jaggard K.W., Paruntu J. 1986. Foliage cover and radiation interception. *Field Crops Research* 13: 75-87.
- Stintzing C. F., Carle R. 2007. Betalains-emerging prospects for food scientists. *Trends in Food Science & Technology* 18(10): 514-525.
- Strack D., Vogt T., Schliemann W. 2003. Recent advances in betalain research. *Phytochemistry* 62(3): 247–269.
- Sumanta N., Imranul H. C., Nishika J., Suprakash R. 2014. Spectrophotometric analysis of chlorophylls and carotenoids

- from commonly grown fern species by using various extracting solvents. *Research Journal of Chemical Sciences* 4(9): 63-69
- Von Elbe J. H. 1977. The betalains. In *current Aspects of food colorants*. Ed. T. E. Furia. CRC Press, Cleveland, OH. 29-39 p.
- Watson J. F., Gabelman W. H. 1984. Genetic analysis of betacyanin, betaxanthine, and sucrose concentrations in roots of table beet. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 109: 386-391.
- Werker A. R., Jaggard, K. W. 1998. Dependence of sugar beet yield on light interception and evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* 89(3): 229-240.
- Yin X., Schapendonk A. H. C. M., Kropff M. J., Van O. M., Bindraban P. S. 2000. A generic equation for nitrogen-limited leaf area index and its application in crop growth models for predicting leaf senescence. *Annals of Botany* 85(5): 579-585.
- Zeid F. A. 1985. Effect of growth regulators benzyladenine and chlorcholinchloride on pure protein, carbohydrates and the two pigments (chlorophyll and betanin) of *Beta vulgaris*, *Bodenkultur* 36: 45-52.

