

DESARROLLO FLORAL DEL AGUACATE 'HASS' EN CLIMA SEMICÁLIDO. PARTE II. GENERACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DEL DESARROLLO FLORAL

S. Salazar-García¹; L. E. Cossio-Vargas²;
I. J. L. González-Durán¹; C. J. Lovatt³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,
Campo Experimental Santiago Ixcuintla, Apartado Postal 100,
Santiago Ixcuintla, Nayarit. C. P. 63300. MÉXICO.

Correo-e: samuelsalazar@prodigy.net.mx (¹Autor responsable).

²Posgrado en Ciencias Biológicas Agropecuarias, Universidad Autónoma de Nayarit,
Apartado Postal 49, Xalisco, Nayarit 63780, MÉXICO.

³Department of Botany & Plant Sciences, University of California,
Riverside, CA 92521-0124, USA.

RESUMEN

Para disponer de herramientas que mejoren la productividad de los huertos de aguacate 'Hass' en el clima semicálido de Nayarit, México, se desarrolló esta investigación multianual (1998 a 2006) con los siguientes objetivos: a) cuantificar el efecto de la temperatura ambiental sobre el desarrollo floral de 'Hass', y b) desarrollar y validar modelos de predicción para pronosticar etapas críticas del proceso de floración. El desarrollo floral de 'Hass' fue asociado a la temperatura ambiental y pudo ser modelado matemáticamente. El desarrollo floral de brotes del flujo vegetativo de invierno estuvo asociado a la acumulación de días frío (DFA) con temperaturas ≤ 21 °C, así como a los intervalos acumulados entre las temperaturas máxima y mínima (INTAC). Para los brotes del flujo de verano fueron los DFA con temperaturas ≤ 9 °C, ≤ 20 °C y los INTAC. Para brotes del flujo de invierno se obtuvieron dos modelos de predicción del desarrollo floral, invierno_{DFA ≤ 21} ($R^2 = 0.99$) e invierno_{INTAC} ($R^2 = 0.96$). En el caso de los brotes del flujo de verano se generaron tres modelos de predicción del desarrollo floral, verano_{DFA ≤ 19} , verano_{DFA ≤ 20} y verano_{INTAC}, todos ellos con $R^2 = 0.99$.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES. *Persea americana* Mill., fenología, floración.

FLORAL DEVELOPMENT OF 'HASS' AVOCADO UNDER SEMI WARM CLIMATE. PART II. GENERATION AND VALIDATION OF FLORAL DEVELOPMENT PREDICTION MODELS

ABSTRACT

A multiyear research (1998 to 2006) was undertaken with the goal of developing field management tools to improve the productivity of 'Hass' avocado orchards in the semiwarm climate of Nayarit. The objectives were: a) to quantify the effect of ambient temperature on floral development of 'Hass', and b) to develop and validate prediction models to prognosticate critical stages of floral phenology. Floral development of 'Hass' was related to ambient temperature and mathematically modeled. Floral development on shoots of the winter flush was correlated to chilling days accumulated (CDA) at temperatures ≤ 21 °C, as well as the accumulated intervals between daily maximum and minimum temperatures (ACINT). In the case of summer flush shoots, they were associated to CDA with temperatures ≤ 19 °C, ≤ 20 °C and the ACINT. Two floral development prediction models were obtained for winter shoots, winter_{CDA ≤ 21} ($R^2 = 0.99$) and winter_{ACINT} ($R^2 = 0.96$). In the case of summer flush shoots three prediction models were developed, summer_{CDA ≤ 19} , summer_{CDA ≤ 20} and summer_{INTAC}, all of them with $R^2 = 0.99$.

ADDITIONAL KEY WORDS. *Persea americana* Mill., phenology, flowering.

INTRODUCCIÓN

En el aguacate, el tiempo desde la iniciación floral hasta antesis es variable y está afectada por las condiciones climáticas prevaletientes durante el desarrollo floral. En California, EE. UU., región de clima subtropical templado, el desarrollo floral del aguacate 'Hass' necesitó seis meses desde el comienzo de la iniciación floral (octubre) en brotes del flujo vegetativo de verano hasta antesis (abril) (Salazar-García *et al.*, 1998). Por su parte, en Nayarit (clima semicálido), los brotes de los flujos de invierno y verano de 'Hass' sólo requirieron cuatro meses para pasar de la iniciación floral (octubre) hasta antesis (febrero) (Salazar-García *et al.*, 2006).

El desarrollo floral de 'Hass' en Michoacán, México, parece ser único, ya que suelen presentarse hasta cuatro flujos de floración. La floración loca, que es la más temprana y se presenta en agosto a septiembre; la avanzada que ocurre en octubre a noviembre; la normal, en diciembre a enero y la marceña que ocurre en marzo (Sánchez-Pérez *et al.*, 2001; Salazar-García *et al.*, 2005). Hasta el momento no se dispone de información sobre el desarrollo floral de los brotes que producen cada flujo de floración.

En el clima semicálido del estado de Nayarit, México, 'Hass' presentó cuatro flujos de crecimiento vegetativo, uno en el invierno y tres en el verano. El flujo de mayor intensidad e importancia para la producción de brotes florales fue el de invierno. También, se encontró que la carga de fruto presente en el árbol ($> 95 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ vs. $< 70 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$) no afectó la cantidad de brotes vegetativos o florales producidos por los brotes de los flujos vegetativos de invierno o verano (Salazar-García *et al.*, 2006).

Estudios realizados en condiciones controladas han mostrado que el único factor asociado con la iniciación floral del aguacate fue el descenso de la temperatura. El agobio hídrico no ha sido eficaz para promover la floración del aguacate, a diferencia de otros frutales, como el mango y los cítricos (Chaikiattiyos *et al.*, 1994). La investigación de Buttrose y Alexander (1978) reveló que el factor responsable de la iniciación floral en el aguacate 'Fuerte' fue la ausencia de temperaturas cálidas ($> 20^\circ \text{C}$), más que la presencia de temperaturas bajas. Estos autores también encontraron que los días cortos no se asociaron cualitativamente con la iniciación floral aunque sí redujeron el tiempo a la floración plena. En otro estudio, Nevin y Lovatt (1989) promovieron la floración de árboles jóvenes de 'Hass' con estrés de baja temperatura (8 h día de 15°C a 18°C y 16 h noche de 10°C a 13°C). La intensidad de floración fue la misma para las plantas tratadas con cuatro u ocho semanas de baja temperatura y el desarrollo de los brotes florales resultó similar en tiempo, a excepción de la fecha de antesis, la cual ocurrió una semana después en los árboles que recibieron ocho semanas de baja temperatura. Estos autores concluyeron que similar a los cítricos, el aguacate requirió no más de cuatro semanas de estrés por baja temperatura

para que la floración fuera estimulada. Resultados similares fueron obtenidos por Salazar-García *et al.* (1999) quienes encontraron además que después de cuatro semanas de estrés por baja temperatura ($\leq 15^\circ \text{C}$) las yemas apicales de árboles jóvenes de 'Hass' estuvieron determinadas irreversiblemente hacia floración.

Semejante a los resultados obtenidos en ambientes controlados, en condiciones de campo el descenso en la temperatura también ha sido asociado al desarrollo floral del aguacate. Esta relación fue establecida inicialmente para 'Hass' cultivado con riego en el clima subtropical templado del Sur de California, EE.UU., encontrándose una asociación entre la acumulación de temperaturas $\leq 15^\circ \text{C}$ y el desarrollo floral de este cultivar de aguacate (Salazar-García *et al.*, 1998). Investigación reciente demostró que 'Hass' cultivado sin riego en el clima semicálido de Nayarit, México, requirió de la acumulación de 27.5 días con temperaturas $\leq 19^\circ \text{C}$ para que los brotes de invierno o verano alcanzaran la determinación irreversible a la floración (Salazar-García *et al.*, 2006).

Existe evidencia que el desarrollo floral de 'Hass' está relacionado con la temperatura ambiental. Esto brinda la oportunidad de desarrollar modelos de predicción que pronostiquen eventos clave del desarrollo floral del aguacate, así como el inicio del crecimiento del ápice del brote vegetativo de los brotes florales indeterminados. Un modelo de predicción del desarrollo floral ayudará a programar de manera adecuada y efectiva algunas prácticas de manejo del huerto, como la poda y las aplicaciones al follaje de insecticidas, fertilizantes y biorreguladores autorizados para así aumentar su efecto y su relación beneficio-costeo.

En el artículo anterior se presenta información sobre diversos aspectos del desarrollo floral de 'Hass' en el clima semicálido de Nayarit, México (Salazar-García *et al.*, 2007) y que son la base para presente trabajo de esta investigación, cuyos objetivos fueron: a) cuantificar el efecto de la temperatura ambiental sobre el desarrollo floral de 'Hass', y b) desarrollar y validar modelos de predicción para pronosticar etapas críticas del proceso de floración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estudio I. Efecto de la temperatura ambiental sobre el desarrollo floral y obtención de modelos de predicción

Características de los huertos. Este estudio se desarrolló en dos huertos comerciales de 'Hass' en clima semicálido subhúmedo. El huerto Alberto, de 12 años de edad y localizado en Venustiano Carranza, municipio de Tepic, Nayarit, México; $21^\circ 32' \text{ N}$, $104^\circ 59' \text{ W}$, a 900 m de altitud, lluvia media anual de 1,300 mm y temperatura media anual de 21°C . El otro huerto fue el Bernabé, de 13 años de edad y establecido en Xalisco, municipio de Jalisco,

Nayarit, México; 21° 26 ' N, 104° 55 ' W, a 1,200 m de altitud, lluvia media anual de 1,185 mm y temperatura media anual de 21.7 °C.

Información sobre desarrollo floral. En el artículo de las páginas 87-92 de esta revista, fueron descritos los detalles sobre la colecta de yemas apicales de 'Hass' realizada en varios lapsos de tiempo. De 1998 a 1999 se colectaron yemas de brotes con fruto y sin fruto del flujo vegetativo de invierno encontrándose que la presencia de fruto no afectó el desarrollo floral. Durante 2000 a 2001 se colectaron yemas de brotes del flujo vegetativo de invierno y se determinó que la carga de fruto en el árbol ($< 60 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$ vs. $> 100 \text{ kg} \cdot \text{árbol}^{-1}$), ni de las diferentes altitudes (900 vs. 1200 m) en que se encontraban los huertos en estudio, influenciaron el desarrollo floral. Al no encontrar diferencias significativas para los aspectos descritos, se decidió utilizar un solo conjunto de datos del desarrollo floral de yemas apicales de brotes del flujo de invierno. Adicionalmente, en los periodos 2001 a 2002 y 2002 a 2003 se colectaron yemas apicales de brotes del flujo vegetativo de verano para establecer su patrón de desarrollo floral.

Cálculo de días frío (DF) e intervalos de temperatura (Int). Durante el tiempo que duró el estudio, en cada huerto se registró la temperatura ambiental cada hora con registradores automatizados HOBO H8 (Onset Computer, Witzprod, Englewood Cliffs, NJ, USA). Para el cálculo de DF se consideraron diversas temperaturas críticas que pudieran explicar el desarrollo floral de las yemas apicales en brotes de los flujos vegetativos de invierno y verano (se utilizó un conjunto de datos independiente para el flujo de invierno y otro para el de verano). Las temperaturas críticas fueron de 12 a 25 °C, en incrementos de 1 °C. También, se analizó la relación que pudiera tener el intervalo entre las temperaturas máxima y mínima diarias sobre el desarrollo floral.

Los días frío (DF) se calcularon con la fórmula: $DF = (T_{\text{mín}} \leq T, 1, 0)$; donde:

$T_{\text{mín}}$ = Temperatura mínima observada en ese día.

T = Temperatura crítica, de 12 a 25 °C.

Si se cumple la condición de temperatura, entonces el valor del día frío es 1, en caso contrario es 0.

El valor diario del intervalo de variación (Int) entre la temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$) se calculó con la fórmula: $\text{Int} = T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$.

Los brotes del flujo de verano emergieron en julio y el día cero fue la fecha en que sus yemas apicales presentaron el estado de desarrollo S-1 (yema cerrada y puntiaguda localizada dentro de las dos últimas hojas sin expandir del brote), según la escala visual de Salazar-García *et al.* (1998). En el caso de los brotes del flujo de invierno, el día cero fue

la fecha cuando las yemas apicales presentaron un estado de desarrollo mayor o igual a S-3 (yema cerrada y puntiaguda con senescencia parcial de las escamas de la yema; Salazar-García *et al.*, 1998), lo cual ocurrió en julio. Lo anterior, porque en Nayarit 'Hass' presentó el flujo vegetativo de invierno en febrero y por lo tanto para julio ya había ocurrido desarrollo de las yemas apicales; sin embargo, entre febrero y julio no se presentó frío efectivo (temperaturas ≤ 19 °C) que resultara en iniciación floral (Salazar-García *et al.*, 2006).

Mediante la suma individual de los valores de DF_{12} hasta DF_{25} , así como la de los intervalos, se obtuvieron los valores acumulados para cada fecha de muestreo de yemas apicales. A estos valores de se les denominó días frío acumulados (DFA) e intervalos acumulados (INTAC).

Identificación de la temperatura asociada con el desarrollo floral. Los DFA o INTAC se usaron como variables independientes para generar modelos de predicción que describieran el desarrollo floral de yemas apicales en brotes de los flujos vegetativos de invierno (años 1998 a 1999 y 2000 a 2001) y verano (años 2001 a 2002 y 2002 a 2003). Posteriormente, con el procedimiento Stepwise SAS/STAT (SAS Institute Inc., 2005.) se seleccionó el mejor modelo por orden de respuesta (segundo hasta quinto orden) para cada temperatura crítica (≤ 12 °C hasta ≤ 25 °C) así como para los INTAC. Los criterios para elegir los mejores modelos fueron: 1) valor de R^2 ; 2) el menor cuadrado medio del error (CME); 3) el valor de C_p , sugerido inicialmente por Mellows (Draper y Smith, 1981) y que está involucrado con el CME total de los valores predichos de cada una de las regresiones y con "p" parámetros. Cuando se utiliza el C_p como criterio se busca identificar modelos para los que el valor de C_p sea menor o igual a "p", donde "p" es igual al número de parámetros (Draper y Smith, 1981; Neter *et al.*, 1985).

Obtención de los valores de los coeficientes matemáticos. Una vez identificadas los mejores modelos, se calcularon sus coeficientes matemáticos ($\hat{\alpha}_0, \dots, \hat{\alpha}_n$) por el procedimiento REG utilizando los DFA (≤ 12 °C hasta ≤ 25 °C) y los INTAC, de acuerdo a los criterios ya mencionados. Se obtuvo la significancia de cada uno de los coeficientes matemáticos de los modelos de predicción utilizando el coeficiente de T , aunque cuando se seleccionaron los modelos, Stepwise ya lo había realizado (Draper y Smith, 1981; Neter *et al.*, 1985).

Estudio 2. Verificación de no diferencia entre datos del año 1 vs. año 2 y validación de modelos de predicción

Utilización de los mejores modelos de predicción. Para definir si era válido el considerar que los datos de los años 1 y 2 pertenecían a una sola población se evaluó la capacidad para predecir el desarrollo floral de 'Hass' de los

mejores modelos de predicción obtenidos, tanto para los DFA por temperatura crítica ($\leq 12^\circ\text{C}$ hasta $\leq 25^\circ\text{C}$), como para los INTAC. Los modelos de predicción obtenidos en el año 1 para los brotes vegetativos de invierno y verano fueron utilizados para predecir el desarrollo floral de sus flujos vegetativos equivalentes en el año 2. La operación inversa también fue realizada.

Los valores de desarrollo floral predichos por los modelos de predicción generados en la presente investigación fueron analizados mediante una regresión contra los valores observados del desarrollo floral del año y flujo vegetativo correspondiente, utilizando el programa MINITAB (Minitab Inc., 1996). Los criterios para determinar si los valores de los dos años pertenecían a una sola población fueron: 1) que la ordenada al origen de la regresión fuera lo más cercana a cero ($B_0 = 0$); 2) que la pendiente fuera lo más aproximada a uno ($B_1 = 1$); y 3) el mayor valor del coeficiente del modelo ajustado (R^2).

Generación y validación de modelos de predicción utilizando datos de dos años. Si los modelos de predicción del desarrollo floral para brotes de los flujos de invierno y verano del año 1 eran capaces de predecir el desarrollo floral del año 2 y viceversa, los datos de los dos años fueron considerados estadísticamente como una sola población. Ante esto, se integró un solo conjunto de datos con información de dos años para cada flujo de crecimiento para obtener modelos de predicción del desarrollo floral más precisos, tanto para brotes de invierno (años 1998 a 1999 + 2000 a 2001) como de verano (años 2001 a 2002 + 2002 a 2003). Estos modelos de predicción fueron generados con el procedimiento descrito previamente.

Los modelos de predicción obtenidos de esta forma fueron validados por su capacidad para predecir algunas etapas críticas del desarrollo floral de 'Hass' durante un tercer año. Para esto, se emplearon datos del desarrollo floral de yemas apicales de brotes de los flujos de invierno y verano obtenidos en el huerto Alberto durante 2005 a 2006. De todo el proceso de desarrollo floral, según la escala de Salazar-García *et al.* (1998), sólo se eligieron los últimos estados de desarrollo, desde S-7 (las brácteas del brote floral se abren y el brote floral empieza a emerger) hasta S-11 (antes de la anthesis; se inicia el rompimiento de la yema vegetativa en el ápice del brote floral indeterminado), ya que tienen un uso práctico para los productores de aguacate de Nayarit, México.

RESULTADOS

Efecto de la temperatura ambiental sobre el desarrollo floral

El estado de desarrollo floral de las yemas apicales de brotes de los flujos vegetativos de invierno y verano, obtenidos durante todo el estudio se presenta en los

Cuadros 1 y 2. Estos datos fueron utilizados para generar los modelos de predicción del desarrollo floral.

Acumulación de frío por brotes del flujo de invierno. Cuando se utilizaron las temperaturas críticas $\leq 12^\circ\text{C}$ hasta $\leq 17^\circ\text{C}$ no hubo DFA durante las primeras etapas del desarrollo floral de los brotes de invierno (julio a septiembre). La acumulación de DF inició cuando las temperaturas críticas fueron $\leq 18^\circ\text{C}$ y aumentó conforme se incrementó la temperatura crítica usada en el cálculo (no se muestran datos). En el periodo 1998 a 1999, los

CUADRO 1. Estado de desarrollo floral de yemas o brotes florales procedentes del flujo vegetativo de invierno en árboles de aguacate 'Hass' y que fueron utilizados para generar modelos de predicción del desarrollo floral.

Huerto Alberto (1998 a 1999)		Huertos Alberto+Bernabé (2000 a 2001)	
Fecha	Desarrollo floral ²	Fecha	Desarrollo floral ²
24 julio 1998	3.5	28 agosto 2000	3.6
09 agosto	3.5	28 septiembre	3.9
24 agosto	3.8	28 octubre	4.2
09 septiembre	3.8	28 noviembre	4.8
24 septiembre	3.9	28 diciembre	6.9
09 octubre	4.0	28 enero 2001	9.6
24 octubre	4.6	11 febrero	10.5
09 noviembre	4.9	25 febrero	11.0
24 noviembre	6.8		
24 diciembre	9.1		
08 enero 1999	10.1		
30 enero	11.0		

²De acuerdo a la escala visual de Salazar-García *et al.* (1998).

CUADRO 2. Información sobre desarrollo floral de brotes del flujo vegetativo de verano en árboles de aguacate 'Hass' y que fue utilizada para generar los modelos de predicción del desarrollo floral. Los datos corresponden al huerto Alberto.

Fecha	Estado de desarrollo floral ²	
	(2001 a 2002)	(2002 a 2003)
15 julio	1.0	1.0
28 julio	1.2	1.4
28 agosto	1.6	1.8
28 septiembre	2.3	2.5
28 octubre	3.1	3.3
28 noviembre	3.8	4.0
28 diciembre	5.8	6.3
28 enero	8.5	8.9
11 febrero	10.9	10.7
25 febrero	11.0	11.0

²De acuerdo a la escala de Salazar-García *et al.* (1998).

DFA por los brotes de invierno en el huerto Alberto, desde el estado S-1 (término el alargamiento del brote vegetativo) hasta antesis (S-11), fue de 51 DFA ($\leq 12^\circ\text{C}$) a 191 DFA ($\leq 25^\circ\text{C}$). Para el 2000 a 2001, los DFA por los brotes de invierno en el huerto Alberto variaron de 73 ($\leq 12^\circ\text{C}$) a 181 ($\leq 25^\circ\text{C}$) y para el huerto Bernabé fluctuaron de 9 ($\leq 12^\circ\text{C}$) a 179 DFA ($\leq 25^\circ\text{C}$).

La acumulación de los valores de intervalos entre las temperaturas máximas y mínimas (INTAC) para los brotes de invierno fue similar entre años y entre huertos. En el huerto Alberto (1998 a 1999) el valor de los INTAC fue 2761.1. Para el 2000 a 2001 los INTAC fueron 2760.8 en el huerto Alberto y 2757 en el huerto Bernabé.

Acumulación de frío por brotes del flujo de verano. El proceso de desarrollo floral desde yemas en estado S-1 (término de alargamiento del brote vegetativo) hasta antesis (S-11) en brotes de verano del huerto Alberto ocupó en el 2001 a 2002 de 71 DFA ($\leq 12^\circ\text{C}$) hasta 226 DFA ($\leq 25^\circ\text{C}$). Para el 2002 a 2003, los DFA empleados fueron desde 67 DFA ($\leq 12^\circ\text{C}$) hasta 226 ($\leq 25^\circ\text{C}$).

La acumulación de los intervalos entre las temperaturas máximas y mínimas por los brotes de verano fue similar entre años. En el 2001 a 2002 se acumularon 3213.6 INTAC y en el 2002 a 2003 fueron 3347.1.

Selección de los mejores modelos de predicción

El uso de los criterios R^2 , CME y C_p permitió elegir los mejores modelos de predicción del desarrollo floral para yemas apicales de brotes de invierno (años 1998 a 1999 y 2000 a 2001) y verano (años 2001 a 2002 y 2002 a 2003) por orden de respuesta (2^{do} . hasta 5^{o} orden) y temperatura

crítica ($\leq 12^\circ\text{C}$ a $\leq 25^\circ\text{C}$ e INTAC) (Cuadro 3). Los mejores modelos de predicción para brotes de invierno durante los dos años de evaluación (1998 a 1999 y 2000 a 2001), fueron los que consideraron los DFA con temperaturas $\leq 21^\circ\text{C}$, así como los INTAC. En el caso de los brotes de verano (años 2001 a 2002 y 2002 a 2003), los mejores modelos de predicción fueron aquellos basados en DFA con temperaturas críticas $\leq 19^\circ\text{C}$, $\leq 20^\circ\text{C}$ e INTAC (Cuadro 3).

Verificación de no diferencia entre datos del año 1 y el año 2

La verificación de los modelos de predicción del desarrollo floral (ajuste de valores observados vs. predichos) fue realizada en forma recíproca (año 1 vs. año 2, y viceversa) para determinar si los datos de los dos años eran estadísticamente iguales. Para brotes de invierno, el resultado de esta verificación de modelos de predicción mostró una alta capacidad de predicción ($R^2 = 0.99$) cuando se basó en DFA $\leq 21^\circ\text{C}$ e INTAC (Figura 1A, 1B, 1C y 1D).

En el caso de brotes de verano, la verificación de los modelos de predicción generados en el año 1 vs. año 2 arrojó los siguientes resultados: DFA $\leq 19^\circ\text{C}$ ($R^2 = 0.97$), DFA $\leq 20^\circ\text{C}$ ($R^2 = 0.98$), e INTAC ($R^2 = 0.95$) (Figura 2A, 2B y 2C). La verificación de los modelos generados en el año 2 vs. año 1 resultó en: DFA $\leq 19^\circ\text{C}$ ($R^2 = 0.97$), DFA $\leq 20^\circ\text{C}$ ($R^2 = 0.98$), e INTAC ($R^2 = 0.96$) (Figura 2D, 2E y 2F).

Generación y validación de nuevos modelos de predicción con datos de dos años

Basados en los resultados de la verificación recíproca de los modelos de predicción, se integró un solo conjunto de datos con información de dos años para cada flujo de

CUADRO 3. Criterios para seleccionar los mejores modelos de predicción del desarrollo floral en brotes de los flujos vegetativos de invierno y verano en árboles de aguacate 'Hass'.

Tipo de brote, huerto y años	Temperatura	Pr >T según el orden de respuesta del modelo						Criterios de selección		
		$\hat{a}_0$	$\hat{a}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{a}_3$	$\hat{a}_4$	$\hat{a}_5$	Cp	R ²	CME
Brotes de invierno										
Alberto (1998 a 1999)	DFA ≤ 21 °C	0.0002	0.0773	0.0331	0.0123	0.0093		4.3	0.99	0.021
	INTAC	0.0011	0.0835	0.0686	0.0543	0.0592	0.0704	6.0	0.99	0.013
Alberto + Bernabé (2000 a 2001)	DFA ≤ 21 °C	0.0001	0.0898	0.0020	0.0669	0.0563	0.0592	6.0	0.99	0.018
	INTAC	0.0001	0.0047	0.0045	0.0031	0.0059	0.0142	6.0	0.99	0.029
Brotes de verano										
Alberto (2001 a 2002)	DFA ≤ 19 °C	0.0076	0.0501	0.0968	0.0868	0.0430	0.0266	6.0	0.99	0.041
	DFA ≤ 20 °C	0.0397	0.0448	0.0810	0.0190	0.0749	0.1583	6.0	0.99	0.138
	INTAC	0.0351	0.0682	0.0064	0.0411			3.6	0.99	0.206
Alberto (2002 a 2003)	DFA ≤ 19 °C	0.0066	0.0166	0.0939	0.0471	0.0336		4.7	0.99	0.077
	DFA ≤ 20 °C	0.0092	0.0506	0.0453	0.0843	0.0153	0.0837	6.0	0.99	0.052
	INTAC	0.0033	0.0499	0.0519	0.0373	0.0198		4.0	0.99	0.048

DFA: días frío acumulados; INTAC: intervalos acumulados; Cp: valor Cp; CME: cuadrado medio del error.

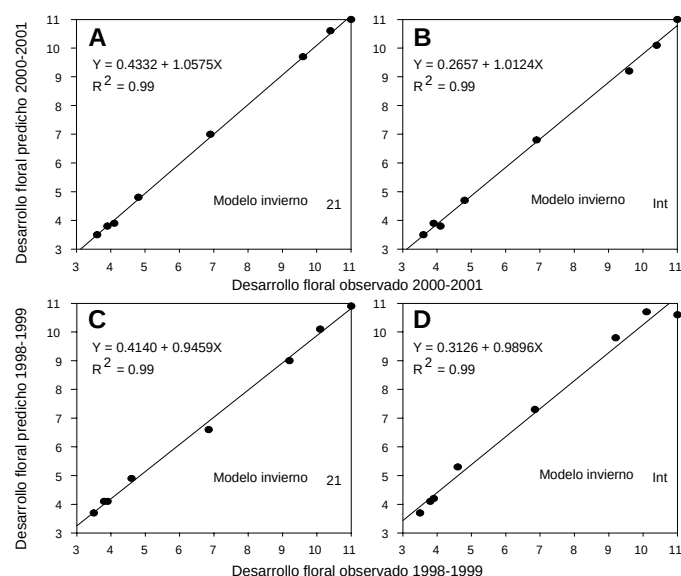


FIGURA 1. Ajuste de valores entre el estado de desarrollo floral de aguacate 'Hass' observado (evaluación directa) y el estado de desarrollo floral predicho empleando los modelos invierno₂₁ (A) e invierno_{Int.} (B), obtenidos durante 1998 a 1999 para brotes del flujo vegetativo de invierno, para predecir el estado de desarrollo floral en el 2000 a 2001, así como los modelos invierno₂₁ (C) e invierno_{Int.} (D), obtenidos en el 2000 a 2001 para predecir el estado de desarrollo floral en el 1998 a 1999. Escala de desarrollo floral (Salazar-García *et al.*, 1998): 1 = yema cerrada y puntiaguda; 11 = antesis.

crecimiento y se obtuvieron modelos de predicción más precisos. Para el flujo vegetativo de invierno, los nuevos modelos de predicción del desarrollo floral se denominaron invierno_{DFA ≤ 21} e invierno_{INTAC}, mientras que para el flujo de verano se denominaron verano_{DFA ≤ 19}, verano_{DFA ≤ 20} y verano_{INTAC} (Cuadro 4).

Los resultados de la validación de los nuevos modelos de predicción para predecir las últimas etapas del desarrollo floral de 'Hass' en el año 2005 a 2006 fueron buenos. Para brotes de invierno, resultaron excelentes los modelos de predicción invierno_{DFA ≤ 21} ($Y = 3.690559 + 0.030014X - 0.000721X^2 + 0.000005243X^3 + 2.3675456E^{-8}X^4$; $R^2 = 0.99$) e invierno_{INTAC} ($Y = 3.672844 + 0.004359X - 0.000012469X^2 + 1.3601102E^{-8}X^3 - 5.15164E^{-12}X^4 + 6.446725E^{-16}X^5$; $R^2 = 0.96$) (Figura 3A y 3B). En el caso de brotes de verano, los tres modelos de predicción desarrollados, verano_{DFA ≤ 19} ($Y = 0.900118 + 0.07697X - 0.001245X^2 + 0.000013197X^3 - 3.84E^{-08}X^4$; verano_{DFA ≤ 20} ($Y = 1.050477 - 0.008331X + 0.001573X^2 - 0.000025629X^3 + 0.000000169X^4 - 3.65E^{-10}X^5$) y verano_{INTAC} ($Y = 0.94049 + 0.002711X - 0.000002445X^2 + 1.68E^{-09}X^3 - 2.74E^{-13}X^4$), también mostraron una elevada capacidad de predicción ($R^2 = 0.99$) (Figura 4A 4B y 4C).

DISCUSIÓN

Tal y como fue mencionado por Salazar-García (2000), existen varios "mitos" acerca de la fisiología reproductiva del aguacate y sólo un examen exhaustivo del comportamiento reproductivo de cada cultivar en cada región productora, permitirá aumentar el conocimiento sobre este

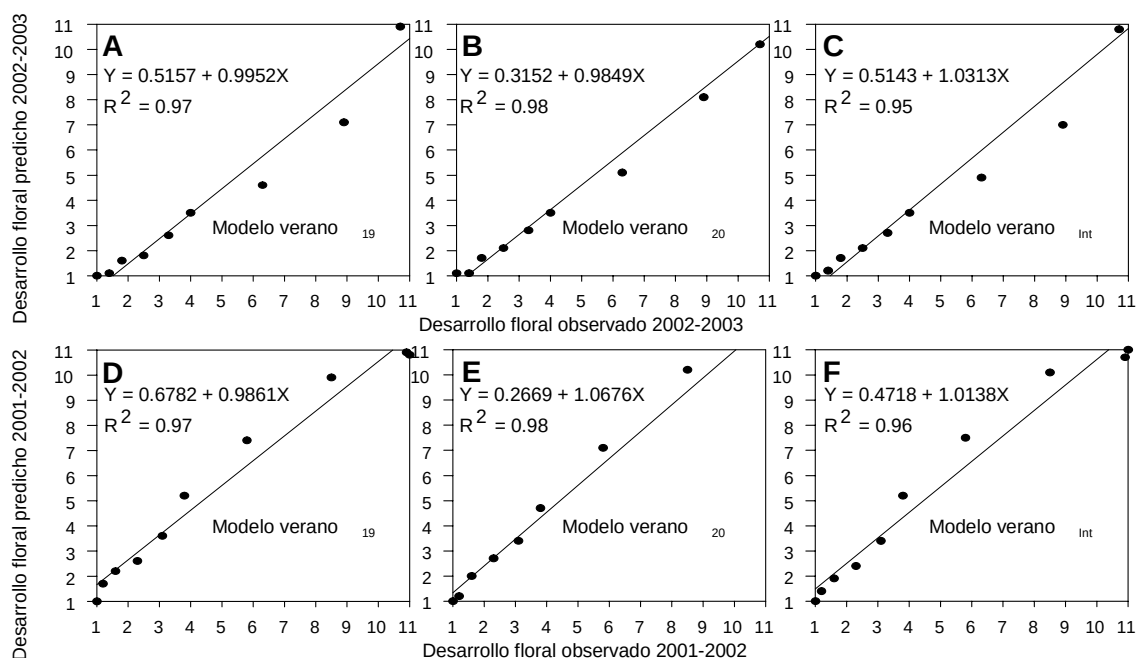


FIGURA 2. Ajuste de valores entre el estado de desarrollo floral de aguacate 'Hass' observado (evaluación directa) y el estado de desarrollo floral predicho empleando los modelos verano₁₉ (A), verano₂₀ (B) y verano_{Int.} (C), obtenidos durante 2001 a 2002 para brotes del flujo de verano, para predecir el estado de desarrollo floral en el año 2002 a 2003, así como los los modelos verano₁₉ (D), verano₂₀ (E) y verano_{Int.} (F) obtenidos en el 2002 a 2003 para predecir el estado de desarrollo floral en el año 2001 a 2002. Escala de desarrollo floral (Salazar-García *et al.*, 1998): 1 = yema cerrada y puntiaguda; 11 = antesis.

CUADRO 4. Criterios para seleccionar los mejores modelos de predicción del desarrollo floral en brotes de los flujos vegetativos de invierno y verano en árboles de aguacate 'Hass'. Modelos generados con datos de dos años.

Tipo de brote, huerto y años	Temperatura	Pr>T según el orden de respuesta del modelo						Criterios de selección		
		$\hat{a}_0$	$\hat{a}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{a}_3$	$\hat{a}_4$	$\hat{a}_5$	Cp	R ²	CME
Brotes de invierno										
Alberto + Bernabé (1998 a1999 + 2000 a 2001)	DFA ≤ 21 °C	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	4.4	0.99	0.024	
	INTAC	0.0001	0.0017	0.0012	0.0006	0.0012	0.0036	6.0	0.99	0.038
Brotes de verano										
Alberto(2001 a 2002 + 2002 a 2003)	DFA ≤ 19 °C	0.0123	0.0219	0.0456	0.0583	0.0471	4.2	0.98	0.282	
	DFA ≤ 20 °C	0.0032	0.0321	0.0648	0.0731	0.0488	0.0808	6.0	0.99	0.189
	INTAC	0.0151	0.0529	0.0413	0.0758	0.0477	0.0151	4.3	0.98	0.312

DFA: días frío acumulados; INTAC: intervalos acumulados; Cp: valor Cp; CME: cuadrado medio del error.

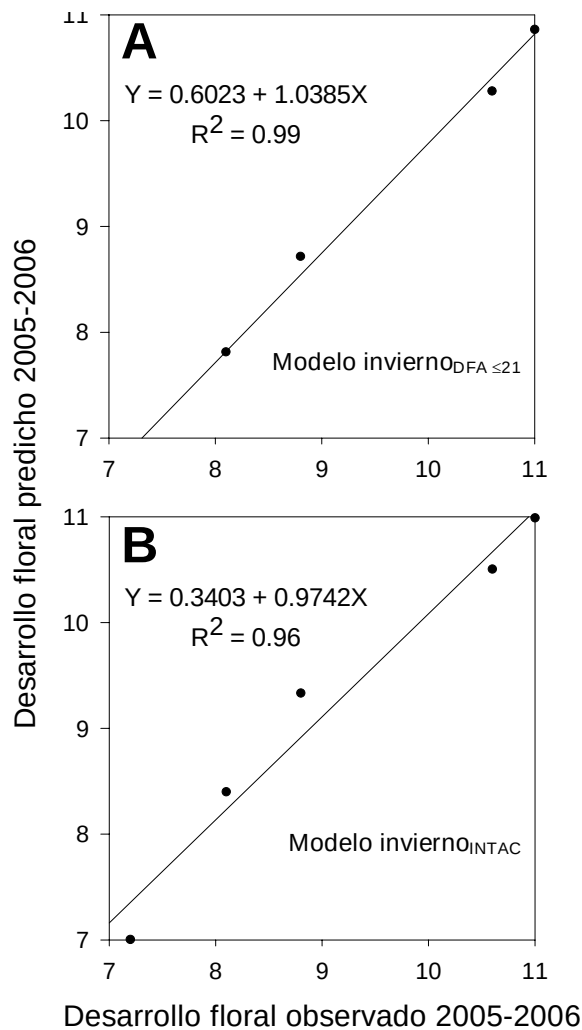


FIGURA 3. Ajuste de valores entre el estado de desarrollo floral observado (evaluación directa) y el estado de desarrollo floral predicho (en el año 2005 a 2006), empleando el Modelo invierno₂₁ (A) y el Modelo invierno_{int.} (B) obtenidos con datos de 1998 a1999 y 2000 a 2001 para brotes de invierno en aguacate 'Hass'. Escala de desarrollo floral (Salazar-García *et al.*, 1998): 1 = yema cerrada y puntiaguda; 11 = antesis.

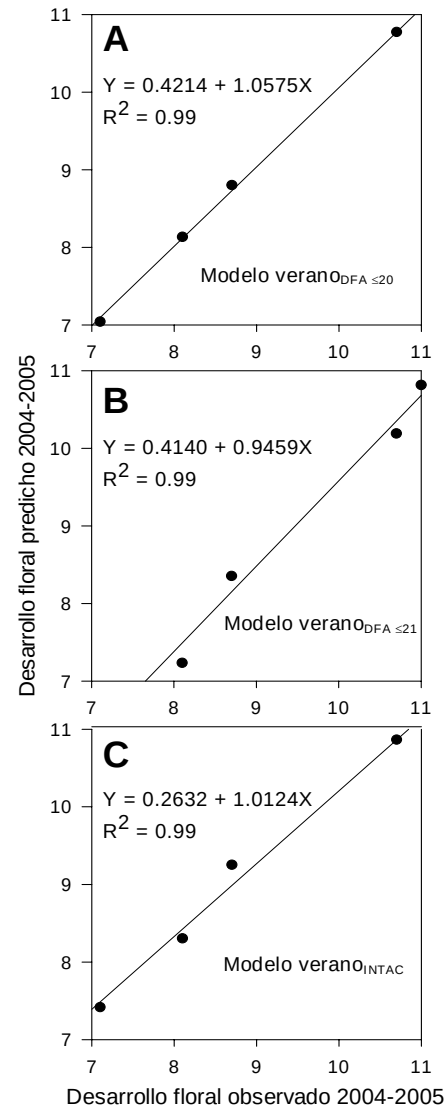


FIGURA 4. Ajuste de valores entre el estado de desarrollo floral observado (evaluación directa) y el estado de desarrollo floral predicho (en el año 2005 a 2006), empleando el Modelo verano₁₉ (A), Modelo verano₂₀ (B) y el Modelo verano_{int.} (C), obtenidos con datos de 2001 a 2002 y 2002 a 2003, para brotes del flujo de verano en aguacate 'Hass'. Escala de desarrollo floral (Salazar-García *et al.*, 1998): 1 = yema cerrada y puntiaguda; 11 = antesis.

particular. Por ejemplo, Salazar-García *et al.* (1998) demostraron que el proceso de desarrollo floral de 'Hass' en California, EE.UU., región de clima subtropical templado, iniciaba meses antes que lo reportado previamente y en consecuencia se necesitaba un promedio de 270 días desde la formación del brote de verano en julio hasta antesis en abril. En comparación, en el presente estudio se encontró que en el clima semicálido de Nayarit, México, el desarrollo floral en brotes del flujo de invierno y verano requirió de 355 días y 225 días, respectivamente, para alcanzar antesis. Estos resultados son una nueva contribución a la fisiología reproductiva del aguacate.

La presente investigación, presenta evidencia de que en condiciones de clima cálido el descenso en la temperatura también fue el factor que promovió la floración de 'Hass'. Además, por primera vez, se encontró una relación matemática entre el desarrollo floral de brotes del flujo vegetativo de invierno y las temperaturas $\leq 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ o los intervalos entre las temperaturas máximas y mínimas diarias. En el caso de brotes del flujo de verano, las temperaturas asociadas al desarrollo floral fueron: $\leq 19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los intervalos entre las temperaturas máximas y mínimas diarias.

La acumulación de frío necesario para el desarrollo floral de 'Hass', desde la formación del brote hasta antesis, dependió de la temperatura crítica usada y del flujo vegetativo que dio origen a los brotes potencialmente florales. A partir del día cero, los brotes de invierno necesitaron 179 DFA con temperaturas $\leq 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los INTAC fueron 2760. Para brotes de verano se necesitaron 183 y 201 DFA con temperaturas $\leq 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente, y de INTAC fueron 3280. Estos resultados difieren con lo mencionado por Davenport (1986), en el sentido que dada la "ausencia" de temperaturas bajas en condiciones de clima cálido, como las de Florida, la floración no podía ser promovida por este factor.

Buttrose y Alexander (1978) y Salazar-García *et al.* (1999) encontraron en árboles jóvenes de 'Fuerte' y 'Hass', respectivamente, que en condiciones controladas las temperaturas constantes $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ no promovieron la floración. En la presente investigación, realizada en condiciones de campo, las temperaturas diurnas siempre superaron dicha temperatura crítica, inclusive en los meses más fríos (diciembre a enero), cuyos promedios mensuales de temperaturas máximas siempre fueron $> 26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lo importante para la iniciación floral fue la ocurrencia de temperaturas nocturnas $\leq 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (brotes de invierno) y temperaturas $\leq 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (brotes de verano).

Los modelos de predicción del desarrollo floral desarrollados en la presente investigación, invierno_{DFA ≤ 21} ($R^2 = 0.99$), invierno_{INTAC} ($R^2 = 0.96$), verano_{DFA ≤ 19} , verano_{DFA ≤ 20} y verano_{INTAC} ($R^2 = 0.99$) permitirán el uso de bases de datos de temperaturas diarias, ya sea series históricas o

en tiempo real, para predecir la fecha de ocurrencia de eventos clave del desarrollo floral de 'Hass' en Nayarit. Estos modelos de predicción ayudarán a programar de manera adecuada y efectiva las aplicaciones al follaje de insecticidas autorizados para controlar plagas, como trips y arañas rojas, y así aumentar su efecto y su relación beneficio-coste. La medición del tiempo fisiológico adecuado para la aplicación deberá reducir la necesidad de reaplicaciones de agroquímicos, protegiendo así a los humanos y al ambiente. Otro uso de los modelos de predicción será en la planeación adecuada de la fecha de poda de ramas, o la aplicación de nitrógeno al suelo, o de boro a los brotes florales en desarrollo; urea o biorreguladores en etapas específicas (óptimas) de la fenología del aguacate para incrementar el amarre y tamaño de los frutos, y consecuentemente la cosecha.

Los modelos de predicción aquí propuestos deberán de ser evaluados por su aplicabilidad en otras regiones productoras de aguacate. Sólo después de esto podrán hacerse las adecuaciones pertinentes que permitan su uso más amplio.

CONCLUSIONES

El proceso de floración de 'Hass' en el clima semicálido de Nayarit, México, fue asociado a la temperatura ambiental y pudo ser modelado matemáticamente. El desarrollo floral de brotes del flujo vegetativo de invierno estuvo asociado a las temperaturas $\leq 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a los intervalos entre las temperaturas máxima y mínima; para los brotes del flujo de verano fueron temperaturas $\leq 19\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los intervalos. Para brotes del flujo de invierno se obtuvieron dos modelos de predicción del desarrollo floral, invierno_{DFA ≤ 21} ($R^2 = 0.99$) e invierno_{INTAC} ($R^2 = 0.96$). En el caso de los brotes del flujo de verano se generaron tres modelos de predicción del desarrollo floral, verano_{DFA ≤ 19} , verano_{DFA ≤ 20} y verano_{INTAC}, todos ellos con $R^2 = 0.99$.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce el financiamiento del programa binacional UCMEXUS-CONACYT (USA-México) y el Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACYT-Gobierno del estado de Nayarit. Apoyo adicional, fue proporcionado por la Fundación Produce Nayarit A.C. y la USPR Aguacate Hass de Nayarit. Agradecemos a Alberto Ante y Bernabé Sánchez por facilitar sus huertos de aguacate.

LITERATURACITADA

- BUTTROSE, M. S.; ALEXANDER, D. M. 1978. Promotion of floral initiation in 'Fuerte' avocado by low temperature and short daylength. *Scientia Hort.* 8: 213-217.
- CHAIKIATTIYOS, S.; MENZEL, C. M.; RASMUSSEN, T. S. 1994. Floral

- induction in tropical fruit trees: effects of temperature and water supply. *J. Hort. Sci.* 69: 397-415.
- DAVENPORT, T. L. 1986. Avocado flowering. *Hort. Rev.* 8: 257-259.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. 1981. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. Second Edition. New York, USA. 709 p.
- MINITAB INC. 1996. *Minitab for Windows*, Release 11.2- Minitab, Inc., State College. PA, USA. 355 p.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. 1985. *Applied Linear Statistical Models*. Second Edition. Richard D. Irwin. Homewood, IL. USA. 1127 p.
- NEVIN, J. M.; LOVATT, C. J. 1989. Changes in starch and ammonia metabolism during low temperature stress-induced flowering in 'Hass' avocado- a preliminary report. *S. African Avocado Grower's Assn. Yrbk.* 12: 21-25.
- SALAZAR G., S. 2000. Fisiología reproductiva del aguacate, pp. 57-83. *In: El Aguacate y su Manejo Integrado*. TÉLIZ-ORTIZ, D. (coordinador). Ediciones Mundi-Prensa. D. F., México.
- SALAZAR G., S.; COSSIO V., L. E.; LOVATT, C. J.; GONZÁLEZ D., I. J. L.; PÉREZ B., M. H. 2006. Crop load affects vegetative growth flushes and shoot age influences irreversible commitment to flowering of 'Hass' avocado. *HortScience* 41: 1541-1546.
- SALAZAR G., S.; LORD, E. M.; LOVATT, C. J. 1998. Inflorescence and flower development of the 'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) during "on" and "off" crop years. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123: 537-544.
- SALAZAR G., S.; LORD, E. M.; LOVATT, C. J. 1999. Inflorescence development of the 'Hass' avocado: commitment to flowering. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124: 478-482.
- SALAZAR G., S.; ZAMORA C., L.; VEGA L., R. J. 2005. Update on the avocado industry of Michoacán, México. *California Avocado Soc. Yrbk.* 87: 31-44.
- SALAZAR G., S.; COSSIO V., L. E.; GONZÁLEZ D., I. J. L.; LOVATT, C. J. 2007. Desarrollo floral del aguacate 'Hass' en un clima semicálido. I. Influencia de la carga de fruto y la edad de los brotes. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 13(1): 93-98, 2007.
- SAS INSTITUTE INC. 2005. *SAS/STAT User's Guide*, Version 8, Fourth Ed. Vol. 1 and 2. SAS Institute Inc., Cary, N.C., USA.
- SÁNCHEZ P., J. DE LAL.; ALCÁNTAR R., J. J.; CORIAA., V. M.; ANGUIANO C., J.; VIDALES F., I.; TAPIA V., L. M.; AGUILERA M., J. L.; HERNÁNDEZ R., G.; VIDALES F., J. A. 2001. *Tecnología para Producir Aguacate en México*. SAGARPA-INIFAP. Campo Experimental Uruapan. Libro técnico No. 1. Uruapan, México. 208 p.