

ADAPTACIÓN DE UN MODELO DE DETERIORO A SEMILLAS DE TOMATE DE CÁSCARA

ADAPTATION OF A MODEL TO EVALUATE SEED DETERIORATION IN HUSK TOMATO

J. Alfredo Carrillo Salazar¹, J. Manuel Pichardo González¹, Óscar J. Ayala Garay^{1*},
Víctor A. González Hernández¹ y Aureliano Peña Lomelí²

¹ Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Tel. 01 (595) 952-0200. Ext. 1594. ² Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Estado de México.

* Autor para correspondencia (oayala@colpos.mx)

RESUMEN

Los factores ambientales más importantes que afectan la viabilidad de semillas almacenadas son la humedad relativa y la temperatura. En esta investigación se adaptó un modelo diseñado para tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) para estimar la viabilidad de semillas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) almacenadas sin control de temperatura ni de humedad relativa. El contenido de humedad de las semillas de tomate de cáscara se calculó usando la temperatura y la humedad relativa del almacén, y la viabilidad con la ecuación de Ellis y Roberts. Se calibró el coeficiente lambda (λ) de la ecuación que calcula el contenido de agua de la semilla, así como los parámetros C_H , C_w , C_Q , y K_i , simultáneamente y por separado, con los métodos de optimización Marquardt y Simplex mediante mínimos cuadrados ordinarios, para minimizar la diferencia entre la viabilidad modelada y la observada. Como medidas de sesgo se calculó el error medio de la diferencia entre valores observados y modelados (*MBE*), el error medio en porcentaje (*MPE*) y la raíz cuadrada de la diferencia media (*RMSD*). La lambda calibrada (61.6) para tomate de cáscara, fue 62 % superior a la del tomate, pero con la calibración se obtuvo un promedio apropiado (5 %) de humedad de la semilla. La mejor calibración de la ecuación de viabilidad de Ellis y Roberts fue cuando se optimizaron simultáneamente C_H , C_w y K_i con el método Simplex; así los parámetros variaron en menos de 4.6 % de su valor original, el error medio de porcentaje fue 3.4 %, y el R^2 fue 0.97. Según el modelo optimizado, viabilidad de la semilla fue mayor o igual a 85 % hasta 263 d de almacenamiento, y luego perdió 50 % de viabilidad en cuatro años y cinco meses.

Palabras clave: *Physalis ixocarpa*, viabilidad de semilla, contenido de humedad, longevidad de semilla.

SUMMARY

Air temperature and relative humidity are the most important environmental factors affecting the viability of stored seeds. In this investigation, the viability of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) seeds stored without control of air temperature and relative humidity, was estimated with a model designed for tomato seeds (*Lycopersicon esculentum* Mill.). The seed moisture was calculated using the air temperature and relative humidity of storage conditions, while the seed viability was calculated using the Ellis and

Roberts equation. The coefficient lambda (λ) in the seed water content equation, and the values of C_H , C_w , C_Q , and K_i in the Ellis and Roberts equation were calibrated with the Marquardt and Simplex optimization methods. The mean error of the difference between observed and modeled data (*MBE*), the mean error in percent (*MPE*), and the root square of the mean difference between modeled and observed data (*RMSD*), were used as bias measurements. The calibrated lambda (61.6) for husk tomato seeds was 62 % higher than that for tomato, but this calibrated value rendered an adequate average (5 %) of the seed moisture. C_H , C_w and K_i optimized simultaneously with the Simplex method produced the best calibration of the Ellis and Roberts equation, since each parameter changed less than 4.6 % from its original value, with a mean error of 3.4 % and a R^2 over 0.97. Modeled viability of husk tomato seeds was higher or equal than 85 % after 263 d of storage, and there after 50 % of viability was lost in 4 years and 5 months.

Index words: *Physalis ixocarpa*, seed viability, moisture content, seed longevity.

INTRODUCCIÓN

Las semillas almacenadas en los bancos de germoplasma están expuestas a la humedad y temperatura ambiental y son los factores físicos que más afectan su conservación (Socorro *et al.*, 2007). Debido a su naturaleza higroscópica, las semillas se mantienen en equilibrio con la humedad relativa atmosférica (Copeland y McDonald, 2001), y tal equilibrio se alcanza cuando se exponen por varios días a dicha humedad relativa (Marques-Pereira y Marcal-de Queiroz, 1991). A su vez, la humedad relativa es altamente interdependiente de la temperatura ambiental, ya que la humedad relativa es la relación entre la presión de vapor actual sobre la presión de vapor a saturación, y la presión de vapor actual se calcula con base en la diferencia entre la temperatura del bulbo húmedo y seco de un psicrómetro (Marques-Pereira y Marcal-de Queiroz, 1991; Copeland y McDonald, 2001).

La mayoría de las semillas de los cultivos pierden rápidamente su viabilidad si se almacenan con 80 % de humedad relativa y de 25 a 30 °C, pero pueden conservarse 10 años o más con menos de 50 % de humedad relativa y menos de 5 °C (Copeland y McDonald, 2001). Harrington (1972) propuso que por cada 1 % de reducción en la humedad de la semilla o por cada 5 °C de reducción en la temperatura, se duplica su vida en almacén. La máxima longevidad de la semilla se alcanza con una humedad relativa entre 5 y 6 % (Copeland y McDonald, 2001).

Cuando las semillas almacenadas contienen alta humedad, se incrementan la actividad enzimática hidrolítica, la respiración y los ácidos grasos libres, por lo que la humedad se considera el factor más crítico para su conservación (Copeland y McDonald, 2001). El alto contenido de agua acelera las reacciones que deterioran la semilla y actúa como solvente para la mayoría de las reacciones bioquímicas, de modo que su reducción disminuye la tasa de difusión de solutos y la actividad metabólica nociva (Vertucci y Roos, 1990; Vijay *et al.*, 2009).

Las temperaturas altas aumentan la velocidad de los procesos enzimáticos y metabólicos, y en consecuencia hay una mayor velocidad de deterioro, sobre todo cuando existe alto contenido de humedad en la semilla. En cambio, las altas temperaturas combinadas con baja humedad de la semilla ejercen un efecto mínimo en el deterioro (Copeland y McDonald, 2001).

En almacenamiento a largo plazo, a bajas temperaturas y contenido de humedad bajo, las semillas se encuentran en estado vidrioso (Williams y Leopold, 1989; Sun y Leopold, 1993; Sun *et al.*, 1998), estado que se produce por la acumulación de sacarosa, posiblemente en conjunción con oligosacáridos (como rafinosa), lo que contribuye a preservar la membrana y la estructura de las proteínas (Bradford, 2004). En estas circunstancias, la difusión de moléculas en el citoplasma es mínima y por consiguiente se inhibe el deterioro de la semilla. Pero cuando incrementa la temperatura o el contenido de humedad de la semilla, el estado sólido vidrioso puede suavizarse a un estado de consistencia elástica o incluso a un estado líquido.

Los procesos que inician el envejecimiento de las semillas pueden depender de la temperatura de transición a la vitrificación (T_g) del citoplasma de las semillas (Sun y Leopold, 1994; Narayana *et al.*, 2003), por lo que las temperaturas de almacenamiento cerca o debajo de la temperatura de transición a la vitrificación beneficiarían

marcadamente el almacenamiento a largo plazo (Sun y Leopold, 1994).

En diversas especies, se ha demostrado que la declinación de la viabilidad de un lote de semillas durante el almacenamiento seco sigue un patrón predecible. Generalmente hay un periodo de duración variable durante el cual la viabilidad permanece relativamente sin cambios, seguida por una baja pronunciada y con una cinética que puede considerarse sigmoideal (Bradford, 2004).

Ellis y Roberts (1980) propusieron un modelo de viabilidad de la semilla de una especie o genotipo, basado en temperatura y humedad relativa del ambiente de almacenamiento, y en la calidad inicial del lote de semillas en estudio (Bradford, 2004). Los parámetros del modelo pueden ser obtenidos experimentalmente para cada especie, y este modelo sirve para predecir el tiempo de almacenamiento de semillas en un intervalo amplio de condiciones. El proceso del modelo a un caso específico, consiste en transformar las curvas sigmoideas de reducción de la viabilidad de las semillas a través del tiempo a valores probit o unidades de probabilidad, lo cual convierte las curvas sigmoideas a líneas rectas (Bradford, 2004). Cuando se transforman a probit, las líneas resultantes pueden ser paralelas (mismas pendientes) pero con diferentes interceptos (K_i) o viabilidad de semilla inicial. El inverso de la pendiente de la curva de viabilidad probit es igual a la desviación estándar del número de semillas muertas por unidad de tiempo (σ), o es una medida del tiempo que toma una unidad probit para declinar el porcentaje de viabilidad y está relacionada con la temperatura y humedad de almacenamiento. La ecuación de viabilidad de semilla es el método más ampliamente aceptado para cuantificar y predecir la longevidad de semilla en relación a las condiciones de almacenamiento (Bradford, 2004).

En esta investigación se calibraron los parámetros del modelo de la viabilidad de la semilla propuestos por Ellis y Roberts para tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), y se ajustaron al deterioro natural de semillas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en condiciones de almacenamiento sin control de temperatura ni de humedad relativa, con el propósito de estimar cuándo se alcanza el 85 y 50 % de viabilidad de la semilla.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo

El modelo para calcular la viabilidad de la semilla de tomate de cáscara se basa en la siguiente función:

$$y = f(t, Tac, Hrc, C, pt) \dots \dots \dots \text{Ec. 1}$$

Donde: *t* es el tiempo, *Tac* es la temperatura de aire promedio durante el almacenamiento (°C), *Hrc* es la humedad relativa del aire promedio durante el almacenamiento (%), *C* es el contenido de humedad de la semilla (fracción de 0 a 1) y *pt* es el vector de parámetros.

El modelo consistió de dos etapas. En la primera se calculó el contenido de humedad de la semilla (*C*) en el intervalo de 0 a 1 con base en el trabajo de Socorro *et al.* (2007). Para esto inicialmente se integró diariamente la siguiente ecuación diferencial:

$$\int_{i=1}^n \frac{\partial m}{\partial t} = \frac{RTacL}{V_{PMA}} \ln \left[Hra \left(1 + A \exp \left(-\lambda \frac{m}{m+m_s} \right) \right) \right] \dots \dots \dots \text{Ec. 2}$$

Donde: *n* es el número de días de almacenamiento, *m* es la masa de agua contenida en la semilla (kg), *t* es el tiempo, *R* es la constante universal de los gases (8.31 J mol⁻¹ K⁻¹), *Tac* es la temperatura del aire (°K), *L* es un coeficiente fenológico que representa la permeabilidad de la testa al vapor de agua (1.0 x 10⁻¹⁷ m s⁻¹), *V_{PMA}* es el volumen parcial molar del agua (18 x 10⁻⁶ m³ mol⁻¹), *ln* es la función logaritmo natural, *Hra* es la humedad relativa (fracción de 0 a 1), *A* es una constante de integración (27.11), *exp* es la función exponente, *λ* es un coeficiente con un valor de 38.02 para tomate (Socorro *et al.*, 2007), y *m_s* es el peso de la biomasa seca de una semilla (kg) que en *Physalis ixocarpa* Brot. es 1.27 x 10⁻⁶ kg en promedio, valor obtenido en forma experimental.

Una vez integrada la Ecuación 2, se calculó *C*:

$$C = \frac{m}{m + m_s} \dots \dots \dots \text{Ec. 3}$$

En la segunda etapa se calculó la viabilidad de las semillas con base en la ecuación de la viabilidad de Ellis y Roberts (1980). Se calculó la desviación estándar del número de semillas muertas por unidad de tiempo (*σ*):

$$\sigma = 10^{K_E - C_W \log(m) - C_H Tac - C_Q Tac^2} \dots \dots \dots \text{Ec. 4}$$

Donde: *K_E* es 6.975 y considera las diferencias inherentes entre especies a la capacidad de almacenarse, *m* es el contenido de humedad de la semilla (porcentaje de biomasa en fresco), *Tac* es la temperatura de almacenamiento (°C) acumulada, *C_w* es 3.47 y describe el efecto relativo del contenido de la humedad en la longevidad (Ellis y Roberts, 1981), *C_H* es 0.0329 y *C_Q* es 0.000478; los efectos combinados de estas dos últimas

constantes describen la respuesta de la longevidad de la semilla a la temperatura (Dickie *et al.*, 1990; Sinicio, 2004).

La viabilidad de la semilla en una escala probit (*pv*), se calculó a través del tiempo con la siguiente ecuación (Ellis y Roberts, 1980):

$$pv = K_i - \frac{t}{\sigma} \dots \dots \dots \text{Ec. 5}$$

Donde: *K_i* es la viabilidad inicial. El valor de este coeficiente (1.1575) fue obtenido experimentalmente como el intercepto al eje de las ordenadas. Se calculó después de linealizar la curva de viabilidad mediante la transformación del porcentaje de viabilidad observada a unidades probit con la función DISTR.NORM.ESTAND.INV (Distribución normal estándar inversa) en Microsoft Excel (Bradford, 2004), y *t* es el tiempo de almacenamiento.

La viabilidad de la semilla en una escala probit (*pv*) se transformó a porcentaje de viabilidad de la semilla (*v*) con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{1}{1 + \exp(-1.6478 pv)} \dots \dots \dots \text{Ec. 6}$$

Además, se calculó el tiempo (*p*) en que se reduce la viabilidad a 50 % (Hay, 2009) con la función:

$$p = \frac{K_i \sigma}{365} \dots \dots \dots \text{Ec. 7}$$

Como *p* se expresa en días, se dividió entre 365 para obtener el tiempo en años.

Datos meteorológicos

Los promedios diarios de la temperatura del aire (*Tac*) y humedad relativa (*Hr*) del 2000 a 2005 se obtuvieron a partir de registros obtenidos cada 10 min con un sensor Hobo® Onset Computer Corporation, en una bodega sin control de clima ubicada en Texcoco, México (19° 29' LN, 98° 51' LO y 2250 m de altitud) cuya temperatura promedio anual oscila entre 12 y 18 °C, con régimen de lluvias en verano de 600 mm en promedio. Se calculó la suma acumulada de la temperatura diaria, y se dividió entre el número de días transcurridos.

Material biológico y variables registradas

Se usó semilla de tomate de cáscara de la variedad ‘CHF1-Chapingo’, producida en campo en la primavera-verano de 2000 a 2005, en Texcoco, Estado de México. El manejo del cultivo fue el mismo en cada año de producción; trasplante a campo abierto en la primera semana de abril, a una densidad de 30 000 plantas ha⁻¹ y cosecha en la segunda semana de junio. Para obtener la semilla se cosecharon 1000 frutos, de acuerdo con el método indicado por Martínez-Solís *et al.* (2004). La semilla cosechada fue secada al ambiente durante dos semanas, luego limpiada en una mesa de gravedad (Modelo SB707®, Seedbuco Inc., USA.) y almacenada en botes de aluminio abiertos. De acuerdo con el procedimiento estandarizado de ISTA (2004), a cuatro muestras

de 100 semillas se les midió el porcentaje de viabilidad (v, %) mediante una prueba de germinación establecida el día 25 de junio 2005. Para la prueba de germinación, las semillas fueron depositadas en cajas petri sobre papel filtro humedecido y colocadas en una germinadora (SD8900®, Seedbuco Inc., USA.). La humedad de la semilla fue 5 % en promedio de todos los años.

Construcción del modelo

El modelo (Figura 1) se construyó con el programa Model Maker 4.0® (Cherwell Scientific Ltd, UK). La unidad de tiempo (t) fue 1 d y el modelo se operó por 1850 d, es decir por cinco años. Para la modelación, se partió en retrospectiva de la fecha en que se hizo la prueba de germinación. La integración de la Ecuación 2

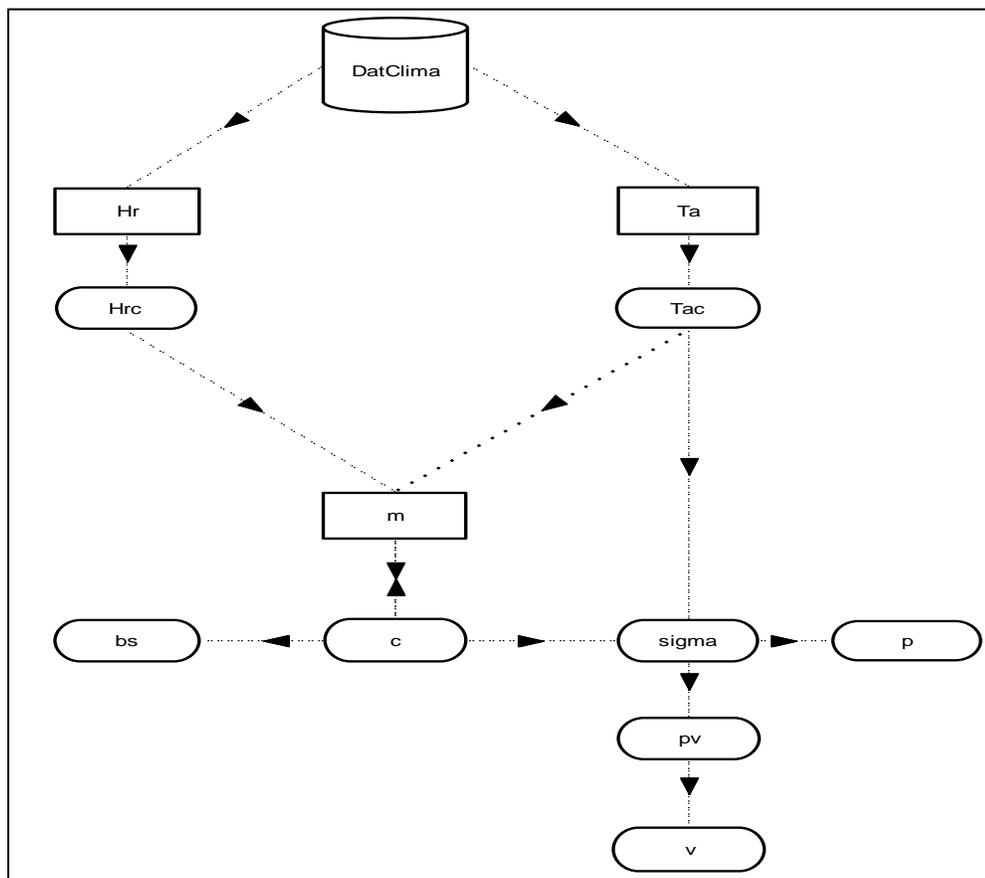


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo de viabilidad de semilla de tomate de cáscara variedad ‘CHF1-Chapingo’, almacenada en una bodega sin control de clima ubicada en Texcoco, Estado de México, México. El cilindro es una unidad de acceso a un archivo de datos meteorológicos, los óvalos evalúan funciones y los rectángulos integran ecuaciones diferenciales. Las flechas representan el flujo del modelo entre variables. Hr = humedad relativa promedio; Ta = temperatura promedio del aire; Hrc = humedad relativa acumulada; Tac = temperatura del aire acumulada; m = masa de agua contenida en la semilla; c = contenido de humedad de la semilla; sigma = desviación estándar del número de semillas muertas por unidad de tiempo; pv = viabilidad de la semilla en unidades probit; v = viabilidad de la semilla, en porcentaje; p = tiempo en que se reduce la viabilidad a 50 %; bs = peso de la biomasa seca.

se hizo con el método numérico Ruge-Kutta y se utilizó un valor inicial de $m = 9.62 \times 10^{-8}$ kg, el cual se obtuvo de un promedio de 50 semillas.

Calibración del modelo

El modelo se calibró mediante la optimización de los parámetros C_H , C_w , C_Q , y K_i , ya sea individualmente o en conjunto, para minimizar la diferencia entre datos modelados y observados. Para esto se utilizaron los métodos Levenberg-Marquardt y Simplex con la opción de mínimos cuadrados ordinarios, disponible en el programa Model Maker.

Cálculo de medidas de sesgo

Además de calcular el coeficiente de determinación R^2 y el porcentaje del parámetro calibrado (PCP) Se calcularon las siguientes medidas de sesgo con el propósito de determinar el error entre los valores modelados y observados en el modelo.

a) Error medio de la diferencia entre observados y modelados (*MBE*)

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{(modelado_i - observado_i)}{n} \dots\dots\dots Ec. 8$$

Donde n es el número de datos.

b) Error medio en porcentaje (*MPE*)

$$MPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|modelado_i - observado_i|}{observado_i} \right) \times 100}{n} \dots\dots\dots Ec. 9$$

c) Raíz cuadrada de la diferencia media (*RMSD*)

$$RMSD = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (modelado_i - observado_i)^2}{n} \right]^{0.5} \dots\dots\dots Ec. 10$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo original (sin calibrar) produjo una cinética similar al deterioro natural de semillas (Figura 2), en la cual en la madurez fisiológica se tiene el porcentaje de germinación más alto, y a partir de ahí inicia un proceso continuo e irreversible de deterioro hasta perder su capacidad de germinación (Delouche, 2002). Sin embargo, el modelo original diverge de los datos observados en

tomate de cáscara, de manera que a los 1106 d se modela una viabilidad que es la mitad de la observada.

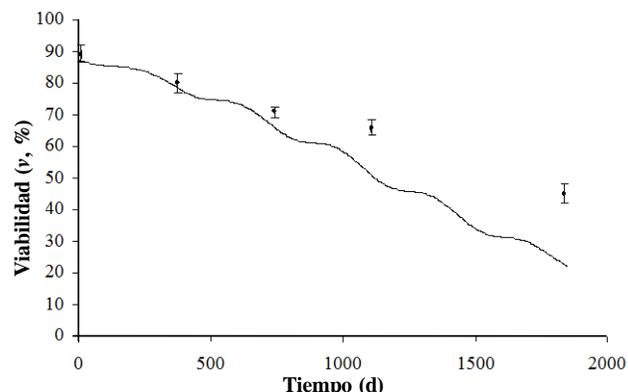


Figura 2. Porcentaje de viabilidad de semillas de tomate de cáscara (v) sin calibración de parámetros, modelada (línea continua) y datos observados (puntos con desviación estándar).

Calibración del modelo

En el modelo no calibrado, el contenido inicial de agua en la semilla es de 7 % e incrementa a 8 %, valor en el que se estabiliza (Figura 3). El valor de lambda (38.02) en la Ec. 2 (contenido de agua en la semilla) corresponde al sugerido para tomate (Socorro *et al.*, 2007) y su calibración podría mejorar la estimación del porcentaje de humedad en la semilla (C en la Ec. 3), debido a que refleja la permeabilidad de la testa al flujo de agua. Cuando se calibró lambda, el *MPE* entre C modelada y observada fue 8.7 % mientras que sin calibración fue de 52 %. Sin embargo, el lambda ajustado para tomate de cáscara fue de 61.6, valor que es 62 % superior al lambda para tomate y fuera del intervalo de 37 a 55.8 % presentado por Socorro *et al.* (2007) para semillas de diferentes especies.

Este cambio tan alto de lambda para las semillas de tomate de cáscara puede atribuirse a que el contenido de humedad de la semilla observado (5 %) no corresponde con lo que se esperaría con almacenamiento a 46 % de humedad relativa promedio (Socorro *et al.*, 2007), o bien a que el modelo propuesto no es el adecuado para estimar el contenido de humedad de la semilla. Aún así, la predicción del modelo del contenido de humedad de la semilla estuvo en el intervalo de 5 a 14 %, que se considera adecuado para lograr máxima longevidad de las semillas, aunque el contenido ideal es entre 5 y 6 %; en cambio, el contenido de humedad por debajo de 5 % puede propiciar el rompimiento de la estructura de la membrana y provocar la aceleración del deterioro, mientras que por arriba de 14 % incrementa la respiración e invasión de hongos (Harrington, 1972; Copeland y McDonald, 2001).

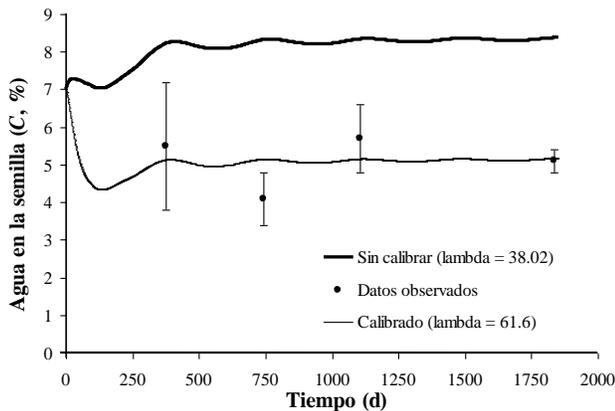


Figura 3. Contenido de agua en la semilla de tomate de cáscara (C , %). Datos modelados sin calibrar λ (línea continua superior); datos observados (puntos con desviación estándar) y datos modelados con λ calibrado (línea continua inferior).

De acuerdo con el Cuadro 1, es posible disminuir el error medio en porcentaje (MPE) de la modelación de la viabilidad de la semilla (v) de 18 hasta 2.2 %, mediante la calibración de diferentes parámetros del modelo de viabilidad propuesto por Ellis y Roberts (1980).

Todas las calibraciones realizadas mostraron altos R^2 . Los valores menores de $RMSD$ (1.9) y MPE se obtuvieron al calibrar conjuntamente C_H , C_w y K_i con el método Marquardt; sin embargo, este método presentó los PCP más altos y provocó que el porcentaje de viabilidad modelada aumentara y disminuyera cíclicamente (Figura 4), lo cual sólo se ha observado en especies con letargo secundario o cíclico (secondary dormancy); por lo general, estas semillas pertenecen a especies no domesticadas cuya germinación es estacional (Milhorst, 2007). En cambio, en la semilla de tomate de cáscara el deterioro provoca pérdidas anuales constantes en la viabilidad y germinación (Pérez Camacho *et al.*, 2008).

Otros valores bajos de MPE (2.9 %), MBE (-0.32) y $RMSD$ (2.3) se obtuvieron al calibrar los parámetros C_Q (método de Marquardt) y C_w . Con la calibración combinada de C_H , C_w y K_i (método Simplex) también se obtuvo un bajo $RMSD$.

Cuadro 1. Calibración de parámetros del modelo de viabilidad propuesto por Ellis y Roberts (1980) para ajustar el modelo a los datos de porcentaje de viabilidad de la semilla (v) de tomate de cáscara almacenada en una bodega sin control de clima, ubicada en Texcoco, Estado de México, del 2000 al 2005.

Mét. optimización	Parámetro	Inicial	Optimizado	PCP	R^2	MBE	MPE	RMSD
Parámetro sin optimizar					0.98	-9.92	17.8	12.8
Marquardt	C_H	0.0329	0.0242	-26.4	0.97	-0.52	3.4	2.4
Simplex	C_H	0.0329	0.0242	-26.5	0.97	-0.52	3.4	2.4
Marquardt	C_Q	0.000478	0.000163	-66.0	0.97	-0.32	2.9	2.3
Simplex	C_Q	0.000478	0.000448	-6.2	0.98	-9.12	16.5	11.9
Marquardt	C_w	3.47	3.29	-5.1	0.98	-0.32	2.9	2.3
Simplex	C_w	3.47	3.29	-5.1	0.98	-0.32	2.9	2.3
Marquardt	K_i	1.1576	1.5262	31.8	0.96	0.88	9.2	6.5
Simplex	K_i	1.1576	1.5268	31.9	0.96	1.08	8.8	6.2
Marquardt	C_H	0.0329	0.133	304.0				
	C_w	3.47	1.25	-64.1				
	K_i	1.1576	1.1426	-1.3	0.98	-0.72	2.2	1.9
Simplex	C_H	0.0329	0.0332	0.9				
	C_w	3.47	3.31	-4.6				
	K_i	1.1576	1.1865	2.5	0.97	-0.52	3.4	2.3

Mét. = método; MBE = error medio de la diferencia entre valores observados y predichos; MPE = error medio, en porcentaje; $RMSD$ = la raíz cuadrada de la diferencia media; PCP = porcentaje de cambio del parámetro calibrado.

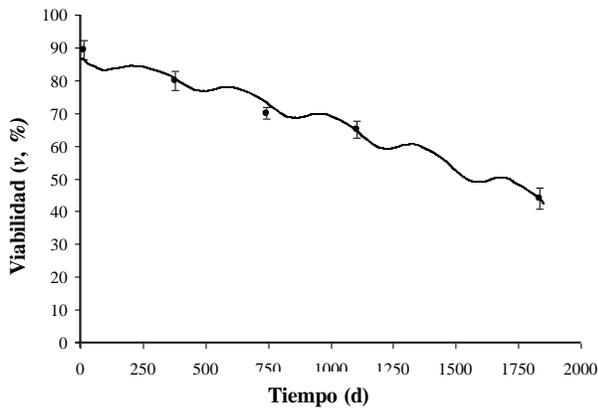


Figura 4. Porcentaje de viabilidad de semillas de tomate de cáscara (v) con la calibración combinada de C_H , C_W y K_i con el método de Marquardt, modelado (línea continua) y observado (puntos con desviación estándar).

La calibración de C_H permitió obtener valores bajos de MBE , MPE y $RMSD$, pero el PCP fue relativamente alto (-26.4 %); en cambio, los PCP de C_Q optimizado con el método Simplex, C_W , y la optimización combinada de C_H , C_W y K_i con el método Simplex, fueron iguales o menores a 6.2 %.

En esta investigación se usaron como parámetros iniciales C_H (0.0329) y C_Q (0.000478), los recomendados por Dickie *et al.* (1990) y Sinicio (2004), quienes consideran que estos valores son similares para todas las especies. Hung *et al.* (2001) estimaron valores de $C_H = 0.0346$ y $C_Q = 0.000401$ para la curva de deterioro de semillas de tomate. La predicción con los valores de Hung *et al.* (2001) fue similar a la obtenida con los parámetros propuestos por Dickie *et al.* (1990). En esta investigación, la calibración de C_H ya sea individual o en conjunto con otros parámetros, permitió mejorar los valores predichos por el modelo.

Con base en lo anterior, la mejor calibración resultó de modificar C_H , C_W y K_i con el método Simplex, ya que el PCP es menor a 4.6 en los tres parámetros y el cálculo del error entre observados y predichos es bajo con los tres criterios utilizados en este estudio (Figura 5). Con este modelo, el valor inicial de v fue 87.6 %, y esta variable fue mayor o igual a 85.0 % hasta los 263 d, periodo en el cual las semillas almacenadas mantuvieron la calidad comercial de acuerdo con las normas de la Asociación Internacional de Pruebas de Semillas (ISTA, 2004). La mitad (50 %) de la semilla deteriorada (p) se alcanzó entre los 4 años y 4 meses a 4 años y 7 meses.

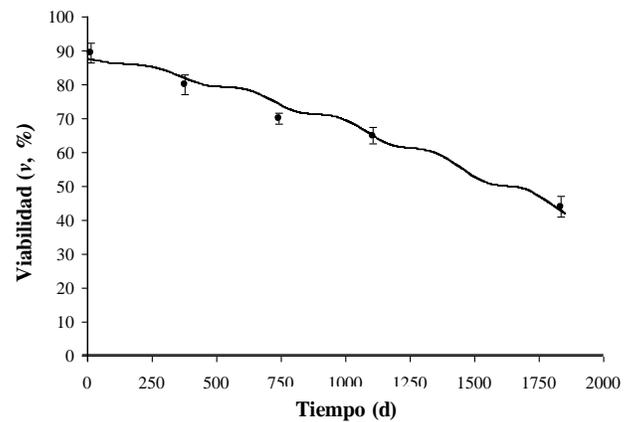


Figura 5. Porcentaje de viabilidad de semillas de tomate de cáscara (v) con la calibración combinada de C_H , C_W y K_i con el método Simplex, modelado (línea continua) y observado (puntos con desviación estándar).

La cinética deterioro (Figura 5) presenta ligeras variaciones periódicas en la tasa de deterioro, comportamiento que se atribuye a las variables ambientales de entrada al modelo. En promedio, la temperatura del aire y la humedad relativa en el almacén sin control de clima fueron 18.8 °C y 46 %. Si se considera que la temperatura del aire promedio en el periodo más frío (octubre a marzo) fue 16.3 °C, y de 21.3 °C para el resto del año, pero sin diferencias en humedad relativa entre periodos, entonces las fluctuaciones en el deterioro se debieron al efecto de la temperatura ambiental, con las tasas de deterioro más bajas durante el periodo más frío (4.2 % anual) y las más altas durante el periodo más cálido (13.3 % anual).

Si se almacenaran las semillas en un ambiente como el que predomina en la región de estudio de octubre a marzo, entonces se podrían conservar las semillas de tomate de cáscara por un periodo significativamente mayor. En promedio, la tasa de deterioro de la semilla de tomate de cáscara var. 'CHF1-Chapingo' fue relativamente alta (8.3 % anual, Figura 5), y se esperaría que con 5 % de humedad en la semilla la tasa de deterioro fuera más lenta, es decir que las células de las semillas permanecieran en estado vídrio con una viscosidad extremadamente alta, con baja movilidad molecular del citoplasma (Williams y Leopold, 1989; Sun y Leopold, 1993), así como baja degradación tanto de ADN como de moléculas de reserva (Bradford, 2004).

El modelo podría no ser válido si el citoplasma de las células se suavizara o pasara a un estado líquido, es decir, cuando aumentara el porcentaje de humedad de la semilla sobre un límite que en algunas especies es mayor a 14 %; tampoco funcionaría cuando la temperatura y humedad fueran altas, como en condiciones de envejecimiento o

deterioro artificial en donde se pierde la actividad enzimática, ocurre peroxidación de lípidos, pérdida de permeabilidad de membranas, de sustancias de reserva y disminución de la respiración, lo que finalmente causa disminución de la germinación y vigor (Priestley, 1986; Basavarajappa *et al.*, 1991; Bernal-Lugo y Leopold, 1992). Otro mecanismo fisiológico que este modelo no toma en cuenta es la disminución de reservas de carbohidratos que explica en gran parte las pérdidas de germinación en tomate de cáscara, debido a que los sustratos respiratorios para la germinación resultan insuficientes (Pérez-Camacho *et al.*, 2008; Pichardo-González *et al.*, 2010). Un modelo que incluyera estos procesos fisiológicos y bioquímicos, podría ofrecer una mejor predicción del deterioro de la semilla de tomate de cáscara.

CONCLUSIONES

Después de la calibración, el valor de lambda (λ) en la ecuación diferencial para calcular la masa de agua contenida en la semilla de tomate de cáscara, fue 62 % superior al valor reportado para semillas de tomate en otros estudios, lo que indica discrepancias con los datos observados de humedad de la semilla o bien la necesidad de ajustar algún otro parámetro de esta ecuación diferencial para ajustarlo a las semillas de tomate de cáscara. Con la lambda sugerida para tomate, se obtuvo una masa de agua contenida en la semilla en el intervalo de 5 a 14 %, adecuada para la conservación de la semilla. La mejor calibración de la ecuación de viabilidad Ellis y Roberts se obtuvo cuando se optimizaron simultáneamente C_H , C_W y K_i con el método Simplex, ya que los cambios en los parámetros fueron menores a 4.6 %, con un error de 3.4 %. El mejor modelo calibrado permitió estimar que la viabilidad de la semilla será mayor o igual a 85 % hasta los 263 d de almacenamiento, periodo en el cual las semillas conservan la calidad comercial de acuerdo con las normas del ISTA (2004), y también predijo que 50 % de viabilidad se perderá en un promedio de 4 años y 5 meses.

BIBLIOGRAFÍA

Basavarajappa B S, H S Shetty, H S Prakash (1991) Membrane deterioration and other biochemical changes associated with accelerated ageing of maize seeds. *Seed Sci. Technol.* 19:279-286.

Bernal-Lugo I, A C Leopold (1992) Changes in soluble carbohydrates during seed storage. *Plant Physiol.* 98:1207-1210.

Bradford K J (2004) *Seed Production and Quality*. 1st ed. Department of Vegetable Crop and Weed Science. University of California. Davis CA, USA. 134 p.

Copeland O L, M B McDonald (2001) *Principles of Seed Science and Technology*. 4th ed. Kluwer Press. New York. 409 p.

Delouche J C (2002) Germinación, deterioro y vigor de semillas. *Seed News* 6:6

Dickie J B, R H Ellis, H L Kraak, K Ryders, P B Tompsett (1990) Temperature and seed storage longevity. *Ann. Bot.* 65:197-204.

Ellis R H, E H Roberts (1980) Improved equations for the prediction of seed longevity. *Ann. Bot.* 45:13-30.

Ellis R H, E H Roberts (1981) The quantification of ageing and survival in orthodox seeds. *Seed Sci. Technol.* 9:373-409.

Harrington J F (1972) Seed storage and longevity. *In: Seed Biology*. Vol. 3. T T Kozlowski (ed). Academic Press. New York, USA. pp:145-240.

Hay F (2009) The seed viability equations. Millennium Seed Bank Project Kew. Royal Botanic Gardens Kew. 13 p. Disponible en: <http://data.kew.org/sid/viability/index.html> (Septiembre 2009).

Hung L Q, T D Hong, R H Ellis (2001) Constant, fluctuating and effective temperature and seed longevity: a tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) exemplar. *Ann. Bot.* 88:465-470.

ISTA International Seed Testing Association (2004) *International Rules for Seed Testing*. Rules 2004. ISTA Editions. Zurich, Switzerland. 243 p.

Marques-Pereira J A, D Marcal-de Queiroz (1991) *Principios de Secado de Granos Psicometría Higroscopia*. Serie Tecnología Poscosecha 8. FAO. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. 72 p.

Martínez-Solís J, A Peña-Lomelí, D Montalvo-Hernández (2004) *Producción y Tecnología de Semilla de Tomate de Cáscara*. Boletín Técnico N° 4. Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. México. 35 p.

Milhorst, H W M (2007) Definitions and hypotheses of seed dormancy. *In: Seed Development, Dormancy and Germination*. K Bradford, H Nonogaky (eds). Blackwell Publishing, Oxford, United Kingdom. pp:50-71.

Narayana M U M, P P Kumar, W Q Sun (2003) Mechanisms of seed ageing under different storage conditions for *Vigna radiata* (L.) Wilczek: lipid peroxidation, sugar hydrolysis, Maillard reactions and their relationship to glass state transition. *J. Exp. Bot.* 54:1057-1067.

Pérez-Camacho I, O J Ayala-Garay, V A González-Hernández, J A Carrillo-Salazar, A Peña-Lomelí, G García-de los Santos (2008) Indicadores morfológicos y fisiológicos del deterioro de semillas de tomate de cáscara. *Agrociencia* 42:891-901.

Pichardo-González J M, O J Ayala-Garay, V A González-Hernández, C M Flores-Ortiz, J A Carrillo-Salazar, A Peña-Lomelí, A Robledo-Paz, G García-de los Santos (2008) Calidad fisiológica, ácidos grasos y respiración en semillas de tomate de cáscara deterioradas artificialmente. *Rev. Fitotec. Mex.* 33:231-238.

Priestley D A (1986) *Seed Aging: Implications for Seed Storage and Persistence in the Soil*. Comstock Publishing Associates. Cornell University Press. Ithaca, NY, USA. 304 p.

Sinício R (2004) Generalised longevity model for orthodox seeds. *Biosyst. Engin.* 89:85-92.

Socorro A, E Hernández, S Calderón, H Penichet (2007) Modelo para curvas isotérmicas de humedad de equilibrio en semillas de interés agrícola. *Rev. Cub. Física* 24:138-143.

Sun W Q, A C Leopold (1993) The glassy state and accelerated ageing of soybeans. *Physiol. Plant.* 89:767-774.

Sun W Q, A C Leopold (1994) Glassy state and seed storage stability: a viability equation analysis. *Ann. Bot.* 74:601-604.

Sun W Q, P Davidson, H S O Chan (1998) Protein stability in the amorphous carbohydrate matrix: relevance to anhydrobiosis. *Biochim. Biophys. Acta* 1425:245-254.

Vertucci C W, E E Roos (1990) Theoretical basis of protocols for seed storage. *Plant Physiol.* 94:1019-1023.

Vijay D, M Dadlani, S Nagarajan (2009) Role of sorption properties and water status in control of seed longevity patterns. *Curr. Sci.* 96:1103-1109.

Williams R J, A C Leopold (1989) The glassy state in corn embryos. *Plant Physiol.* 89:977-981.