

DESARROLLO DEL FRUTO Y SEMILLA DE *Jatropha curcas* L. E INDICADORES DE MADUREZ FISIOLÓGICA DE LA SEMILLA

FRUIT AND SEED DEVELOPMENT OF *Jatropha curcas* L. AND PHYSIOLOGICAL INDICATORS OF SEED MATURITY

J. Trinidad Zavala-Hernández¹, Leobigildo Córdova-Téllez^{1*},
Jorge Martínez-Herrera² y Juan C. Molina-Moreno¹

¹Postgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Producción de Semillas, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. ²JatroBioenergy and Oilseeds S. P. R. de R. L. S. Carr. 233-4. 62744, Colonia Emiliano Zapata, Cuautla, Morelos, México.

*Autor para correspondencia (lcordova@colpos.mx)

RESUMEN

La madurez fisiológica de la semilla ocurre cuando la acumulación de materia seca es máxima, lo que se ha asociado con máximo rendimiento y calidad de semilla. En esta investigación se registró la cinética de variables relacionadas con el crecimiento de frutos y semillas de un ecotipo comestible de *Jatropha curcas* L., a partir de las cuales se determinó la madurez fisiológica de las semillas, así como su relación con el color del fruto. En una plantación de cuatro años de edad se evaluaron dos periodos de fructificación en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se marcaron flores femeninas en antesis para cosechar cada semana y dos cosechas por semana para el primero y segundo periodo, hasta que el exocarpo presentó dehiscencia. En fruto y semilla se midió diámetro, longitud, peso fresco y relación diámetro/longitud; en semilla se cuantificó peso seco y contenido de humedad; en semillas desecadas a la sombra, el peso volumétrico y el peso de mil semillas; y en el fruto se registraron los cambios en coloración. La madurez fisiológica de la semilla o máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) ocurrió 75 y 78 d después de antesis (dda), con un contenido de humedad de 42.7 y 36.4 %, para el primero y segundo periodo de fructificación. En el fruto, los valores máximos del diámetro se alcanzaron 68 y 57 dda, de longitud a los 75 y 64 dda, y de peso fresco a los 75 y 68 dda. En semilla, los lapsos respectivos para el diámetro fueron 75 y 64 dda, para la longitud, peso fresco y peso de mil semillas fueron 75 y 68 dda; y para peso volumétrico 75 dda. Los valores máximos de los caracteres de semilla coincidieron con el color amarillo del fruto; por lo que esta característica se considera un indicador visual confiable y práctico de la madurez fisiológica de la semilla de esta especie.

Palabras clave: *Jatropha curcas*, acumulación de peso seco, contenido de humedad, indicadores de madurez fisiológica de la semilla.

SUMMARY

Physiological seed maturity is attained at maximum dry matter accumulation, and it is related to maximum yield and physiological seed quality. In this study the kinetics of variables related to fruit and seed development of an edible ecotype of *Jatropha curcas* L. were recorded; from these data seed physiological maturity was determined, as well as its relationship to fruit color. In a four-year-old plantation, two fruiting periods were evaluated under a complete block experimental design with three replications. Female flowers were labeled at anthesis and were harvested every day, twice per week for

the first and second fruiting periods, until fruit dehiscence. In fruit and seed, diameter, length, diameter/length ratio, and fresh weight were quantified. Dry matter and moisture content were recorded in seed, and volumetric seed weight as well as 1000-seeds weight for shade-dried seed were measured. Changes in fruit color were recorded also. Physiological seed maturity or maximum dry matter (654.1 and 639.2 mg/seed) occurred at 75 and 78 days after anthesis (daa), with 42.7 and 36.4 % seed moisture content, for the first and second fruiting period. In fruits maximum values of diameter were reached at 68 and 57 daa; maximum length occurred at 75 and 64 daa; and maximum fresh weight accumulated at 75 and 68 daa. Maximum values for seeds occurred at 75 and 64 daa for diameter; 75 and 68 daa for length, fresh weight and 1000-seeds weight; and 75 daa, for volumetric weight. Maximum values for seed characteristics coincided with yellow fruits; so this trait is considered a reliable and practical visual indicator of seed physiological maturity for this species.

Index words: *Jatropha curcas*, dry matter accumulation, moisture content, physiological maturity indicators.

INTRODUCCIÓN

Jatropha curcas L. es una especie perenne y monoica de la familia Euphorbiaceae (Webster, 1994). Las plantas de este género crecen de forma nativa en África, Norteamérica y el Caribe, pero existe controversia en cuanto al centro de origen (Jongschaap *et al.*, 2007). No obstante, es probable que el centro de origen sea México y otros países de América Central (Heller, 1996). La semilla tiene un gran potencial para producir biodiesel, debido al alto contenido de aceite (Arruda *et al.*, 2004). La planta inicia la producción de frutos después de un año de su establecimiento; cada fruto contiene tres semillas, comúnmente conocidas como "Piñón" (Basha y Sujatha, 2007). En general, las semillas no son comestibles, debido a la presencia de ésteres de forbol que les confiere un efecto purgante (Makkar *et al.*, 1997). En México se ha reportado un ecotipo comestible, sin dicho compuesto, lo que favorece su uso en la alimentación humana y animal (Martínez-Herrera *et al.*, 2006).

En el año 2008 la superficie mundial cultivada fue de 900,000 ha principalmente en Asia, con un incremento estimado de 12.8 millones de hectáreas para el año 2015 (FAO/IPGRI, 2010). En México este cultivo no se reporta en las estadísticas de producción, pero en los estados de Michoacán, Chiapas, Sinaloa, Oaxaca, Campeche, Yucatán, Sonora, Veracruz, Tabasco y Guerrero se han desarrollado proyectos productivos desde el año 2006 (Zamarripa *et al.*, 2008). La forma principal de establecer plantaciones es mediante semilla botánica, la cual debe ser de alta calidad fisiológica para asegurar la germinación y el desarrollo de plantas vigorosas.

La formación del embrión, el endospermo y la testa, así como la presencia de otras características ocurren en tres fases durante el desarrollo de la semilla: histodiferenciación, acumulación de reservas y secado (Taiz y Zeiger, 2006). La semilla se considera fisiológicamente madura cuando su peso seco es máximo, lo que indica el final de la etapa de la fase de acumulación de reservas, que puede coincidir con la más alta germinación y vigor (Harrington, 1972; Silva *et al.*, 2011). A partir de entonces, comienza el deterioro, que reduce la calidad fisiológica de la semilla (Harrington, 1972).

Ellis y Pieta Filho (1992) consideran que la máxima acumulación de peso seco describe el final del periodo de llenado de las semillas y que en algunos cereales no necesariamente coincide con la máxima germinación y vigor. Según Tekrony y Egli (1997), en especies de fruto seco, como maíz (*Zea mays* L.), soya (*Glycine max* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.), la máxima calidad de semilla en germinación y vigor, se logra antes de, o simultáneamente, con la máxima acumulación de peso seco, mientras que en frutos carnosos, *i.e.*, tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) se produce después de esta etapa.

La acumulación de peso seco, como indicador de la madurez fisiológica, es difícil y poco práctica de medir en el campo, por lo que es recomendable asociarla con otros cambios físicos de la semilla, e incluso del fruto. En la recolección de semillas forestales algunas características físicas, *i.e.*, color, tamaño y olor del fruto, se emplean como indicadores (Sena y Gariglio, 1998). El conocimiento de la relación de color del fruto con la calidad de la semilla permite cosechar en el momento óptimo (Carvalho y Nakagawa, 2000).

En *J. curcas* las etapas de floración y fructificación pueden prolongarse hasta siete meses durante el año, lo que conlleva a una maduración heterogénea en la que el crecimiento de los últimos frutos continúa después de la maduración de los primeros (Saturnino *et al.*, 2005). Esto ocasiona mayor número de cosechas, que incrementan la mano de obra y los costos asociados. En este contexto, conocer las fases de

formación de la semilla y determinar la mejor etapa de cosecha es fundamental en la producción de semilla de alta calidad de esta especie.

En el presente trabajo se registró la cinética de variables relacionadas con el crecimiento de frutos y semillas de *J. curcas*, a partir de los cuales se determinó la madurez fisiológica de las semillas, así como su relación con el color de fruto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se utilizó una plantación de 4 ha de *J. curcas* del ecotipo no tóxico comestible, cuya semilla provenía de Puebla, Veracruz, que en el año de estudio (2012) se encontraba en el cuarto año de producción y quinto desde la siembra, establecida con arreglo en hileras a 3 m de separación y 3 m entre plantas (1111 plantas por hectárea).

Sitio experimental

La plantación estaba ubicada en la localidad de Anenilco, municipio de Ayala, Morelos, México, a 1270 m de altitud. El clima de la región se clasifica como cálido subhúmedo, con veranos calurosos, temperatura media de 24 °C y precipitación anual promedio de 800 mm (García, 1964).

Tratamientos y diseño experimental

El terreno donde se ubicaba la plantación tenía una ligera pendiente de este a oeste, por lo cual se estableció un diseño experimental de bloques completos al azar, con tres bloques (116 plantas por bloque) orientados de forma perpendicular a la pendiente del terreno.

Aun cuando en esta localidad la planta florece y forma frutos de mayo a noviembre de cada año, en observaciones previas se detectaron dos periodos de fructificación bien definidos; el primero, en el que la floración inicia en junio y la fructificación culmina en septiembre, y el segundo, de agosto a noviembre. Por ello aquí se consideró pertinente estudiar ambos periodos, pues entre ellos existen diferencias en precipitación y temperatura durante el desarrollo y maduración de fruto y semilla (Figura 1).

Los tratamientos correspondieron a fechas de cosecha de frutos en ambos periodos. En cada periodo se marcaron flores femeninas abiertas (en antesis). Posteriormente hubo dos etapas de cosecha. En la Etapa I se cosecharon y midieron 90 frutos por cosecha (30 frutos por bloque) cada 2 d hasta que tuvieron 1 cm de diámetro. Las cosechas posteriores (Etapa II) fueron de 600 frutos por bloque

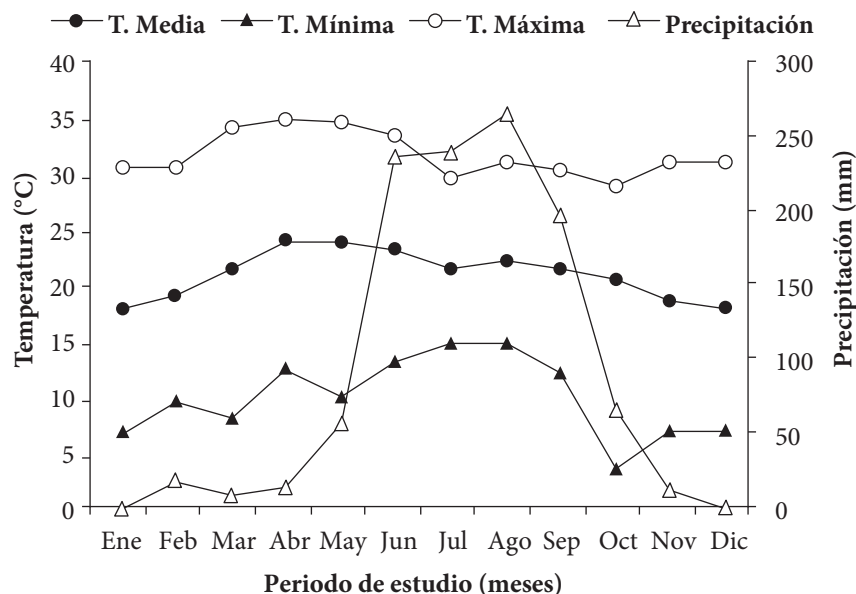


Figura 1. Condiciones de temperatura máxima, mínima, media y precipitación durante el periodo de estudio. Datos de la estación agrometeorológica El Hospital, en Cuautla, Morelos. Año 2012. (http://galileo.imta.mx/FUPROMOR/rep_men_admin.php).

y se efectuaron cada semana (primer periodo de fructificación), y luego dos cosechas por semana (segundo periodo de fructificación) hasta que el fruto alcanzó una coloración café (Muncell, 7.5YR4/2; 90 dda) y presentó dehiscencia. La intensificación de cosechas en el segundo periodo (9 cosechas en el primero y 14 en el segundo) se debió a que el análisis de crecimiento del peso seco en el primer periodo no permitió detectar con claridad la cinética de esta variable.

Variables

Los frutos de cada cosecha en la Etapa I y II se transportaron en una hielera para evitar deshidratación, por un lapso promedio de 2.5 h desde la parcela hasta el laboratorio donde se registraron las siguientes variables: (i) Contenido de humedad (%) y peso seco (mg) de semillas, para lo cual se extrajeron las semillas de 15 frutos en cada cosecha y se tomaron al azar 10 semillas por bloque; éstas se secaron en una estufa marca Mapsa® (Mod. HDP-867) a 103 °C hasta peso constante; el contenido de humedad se calculó en base húmeda, con la ecuación propuesta por Bewley y Black (1994), en la cual al peso fresco de la muestra se resta el peso seco y el valor resultante se divide entre el peso fresco y se multiplica por cien; (ii) Diámetro (mm) y longitud (mm) de frutos y semillas, en 15 frutos y 10 semillas por bloque, con un vernier digital marca Mitutoyo® (Japón) con 0.01 mm de precisión; y se calculó la relación diámetro/longitud; (iii) Peso fresco de frutos y semillas en 15 frutos y 10 semillas por bloque, en una balanza analítica marca Ohaus® (China), con precisión de 1 mg; (iv) Color de fruto,

en 15 frutos por muestreo, mediante la tabla Munsell. Para las variables de crecimiento se estimó la tasa absoluta de crecimiento (TAC) entre cosechas, mediante la ecuación:

$$TAC = \frac{PS_2 - PS_1}{t_2 - t_1}$$

donde: PS_2 y PS_1 son los valores de la variable al final y al inicio del periodo; t_2 y t_1 es el tiempo transcurrido entre dos cosechas.

Una muestra de 200 frutos por cosecha y bloque se secó a la sombra por 60 d, a una temperatura con promedio diario de 22 °C; posteriormente se extrajeron las semillas en estado seco (7 % de humedad), y en ellas se cuantificó: (v) Peso volumétrico (kg hL^{-1}) en tres repeticiones de 250 semillas, que se pesaron en una balanza analítica marca Ohaus® (China), con precisión de 1 mg, para posteriormente determinar el volumen en una probeta graduada de 500 mL, de acuerdo con la ISTA (2005); (vi) Peso de 1000 semillas, para lo cual se pesaron ocho repeticiones de 100 semillas (mg) en misma balanza analítica, y se extrapoló a 1000 semillas (ISTA, 2005).

Análisis estadístico

Los datos de cada periodo de fructificación se analizaron con el paquete SAS V.9.2.® (SAS Institute, 2002), mediante el modelo de bloques completos al azar, y la comparación de medias se hizo mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Se realizó un análisis de correlación de Pearson del peso seco contra el resto de las variables cuantitativas. Los resultados se presentan de manera gráfica, con base en los promedios de las tres repeticiones más el error estándar respectivo, por cada periodo de fructificación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La acumulación de peso seco en la semilla tuvo una tendencia similar en los dos periodos de fructificación (Figura 2A, B). Los datos de las cosechas previas a 45 y 35 d después de anthesis (dda) no muestran cambios significativos en ambos periodos de fructificación, posiblemente por coincidir con la etapa de histodiferenciación (Bradford, 2004; Taiz y Zeiger, 2006). En la fase de acumulación de reservas ocurrió un rápido incremento en peso seco, con una TAC de 21.52 y 14.59 mg d⁻¹ hasta 75 y 78 dda; en esta fase se alcanzó el máximo peso seco (654.1 y 639.2 mg/semilla) y por lo tanto la madurez fisiológica, para el primero y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Xu *et al.* (2011) observaron la misma tendencia en la acumulación de peso seco en semillas de esta especie, aunque el máximo peso seco, de magnitud similar al del presente estudio, se alcanzó a los 55 dda; este lapso difiere de lo reportado en esta investigación (75 y 78 dda), debido posiblemente a diferencias atribuidas al genotipo y a las condiciones climáticas. Por su parte, Heller (1996) señala que el desarrollo del fruto en *J. curcas* necesita aproximadamente 90 d desde la floración hasta la madurez de la semilla, periodo mayor al reportado en el presente trabajo.

Después de la madurez fisiológica inició la desecación (Figura 2A, B), etapa en la que se aprecia una ligera reducción (no significativa) del peso seco hasta los 90 dda. Esta reducción ha sido observada en tomate (*Solanum lycopers*

sicum) (Dias *et al.*, 2006) y en *J. curcas* (Silva *et al.*, 2011), quienes lo asocian a una respiración elevada por el alto contenido de humedad de la semilla.

El contenido de humedad en la semilla mostró tendencias similares en los dos periodos de fructificación (Figura 2A, B). Durante la histodiferenciación (antes de 40 dda) con 92 % de humedad en ambos periodos, no se detectaron cambios significativos. Durante la acumulación de reservas el contenido de humedad disminuyó a una tasa de 1.7 y 1.3 % d⁻¹ hasta 75 y 78 dda, cuando se registró 42.7 y 36.4 % de humedad en la madurez fisiológica, para el primero y segundo periodo de fructificación respectivos. En la fase de secado, después de madurez fisiológica, la pérdida de humedad ocurrió a tasas de 2.3 % d⁻¹ (primer periodo) y 1.9 % d⁻¹ (segundo periodo de fructificación).

La rápida reducción de humedad es proporcional al depósito de los compuestos de reserva, que en gran medida sustituyen los espacios ocupados por agua (Bradford, 2004). Después de este punto, la reducción de agua ocurre por la búsqueda de equilibrio higroscópico entre el contenido de agua de la semilla con la humedad relativa del ambiente (Ahrens y Peske, 1994). En semillas ortodoxas el contenido de humedad en madurez fisiológica oscila entre 30 y 50 % (Campton, 1990), intervalo en el que se ubican los valores del presente estudio.

Las variables longitud y peso fresco del fruto (Figura 3B, D) no fue posible medirlas en las cosechas previas a 30 y 40 dda, en el primero y segundo periodo de fructificación, que coinciden con la histodiferenciación cuyo crecimiento es mínimo. Posteriormente, durante la acumulación de reservas el diámetro (Figura 3A) aumentó a una TAC de 0.78 mm d⁻¹ en las cosechas hechas entre 38 y 68 dda (primer

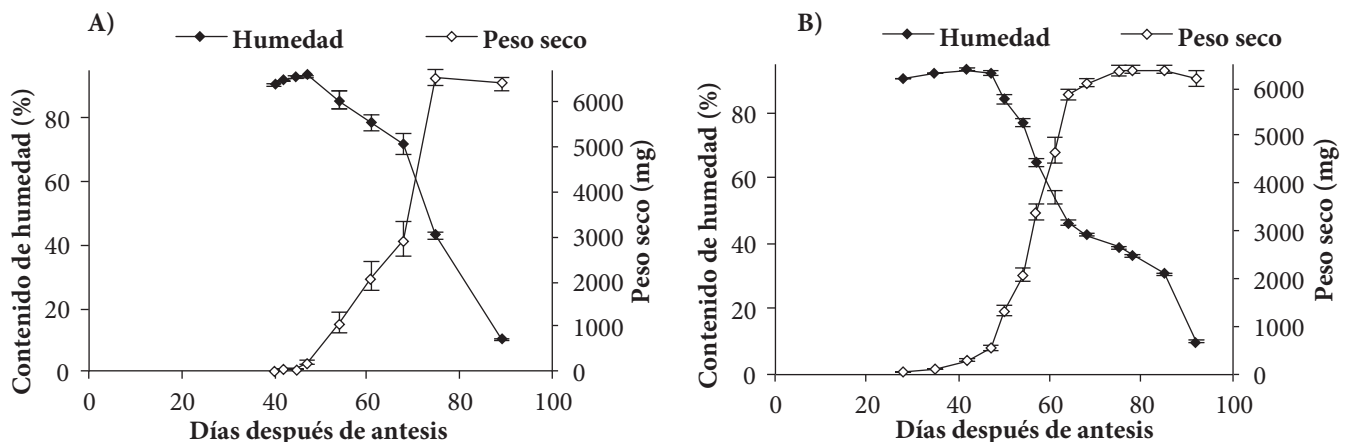


Figura 2. Cinética del contenido de humedad y peso seco durante el desarrollo de semilla de *J. curcas*: Primero (A) y segundo (B) periodo de fructificación. Promedio de tres repeticiones de 10 semillas por bloque \pm error estándar.

periodo) y de 0.71 mm d⁻¹ en las cosechas correspondientes al intervalo entre 21 y 57 dda (segundo periodo).

Durante la fase de desecación ocurrió una reducción de 0.32 y 0.27 mm d⁻¹ hasta la última cosecha (90 dda) para el primero y segundo periodo, respectivamente. La longitud del fruto (Figura 3B) se incrementó a TAC's similares (0.70 y 0.71 mm d⁻¹) en cosechas entre 40 y 75 dda, y entre 28 y 64 dda, seguido de una reducción de 0.44 mm y 0.29 mm d⁻¹ hasta la última cosecha, para el primero y segundo periodo de fructificación. La relación diámetro/longitud (Figura 3C) también aumentó 0.0050 y 0.0044 mm d⁻¹, en el primero y segundo periodo, pero con una alta variación que dificulta definir con claridad el punto máximo, sobre todo en el segundo periodo de fructificación.

El peso fresco del fruto (Figura 3D), durante la fase de acumulación de reservas, aumentó a una TAC de 0.35 y 0.39 g d⁻¹, con un máximo de 14.6 y 16.7 g a los 75 y 68 dda, seguido de un descenso durante la fase de secado hasta

2.85 y 3.25 g, para el primero y segundo periodo de fructificación. Destaca que el peso fresco máximo del fruto casi coincidió con la máxima acumulación de materia seca en la semilla en ambos periodos de fructificación.

En cuanto a las variables de semilla (Figura 4), durante la acumulación de reservas el diámetro aumentó a una TAC de 0.18 y 0.19 mm d⁻¹ hasta 75 y 64 dda, con valores máximos de 9.46 y 9.35 mm; en la fase de desecación la TAC disminuyó ligeramente sin diferencias significativas en ambos periodos de fructificación (Figura 4A). Un comportamiento similar se manifestó en la longitud de semilla, que se incrementó a una TAC de 0.37 y 0.36 mm d⁻¹ hasta 75 y 64 dda, cuando alcanzó los máximos valores (20.84 y 20.70 mm). Después mostró una reducción en cosechas posteriores para finalmente medir 18.25 y 18.33 mm en el primero y segundo periodo (Figura 4B). La relación diámetro/longitud (Figura 4C) tuvo una alta variación, con una tendencia de incremento a medida que las semillas se cosecharon en estados fenológicos avanzados. Saturnino *et al.* (2005) indican que

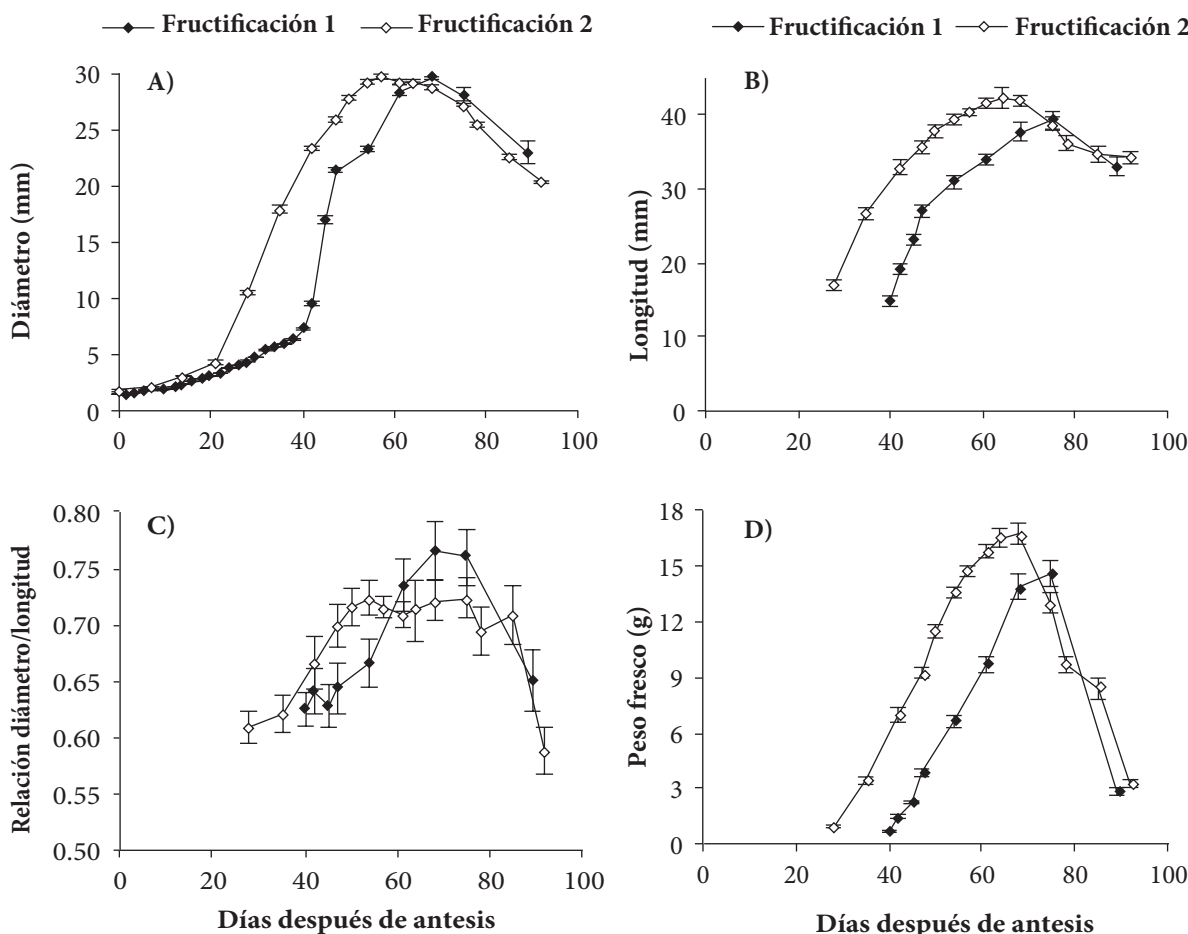


Figura 3. Cambios durante el desarrollo del fruto de *J. curcas* en diámetro (A), longitud (B), relación diámetro/longitud (C) y peso fresco (D). Promedio de tres repeticiones de 15 frutos \pm error estándar.

las semillas maduras de *J. curcas* presentan de 15 a 20 mm de largo y 8 a 13 mm de diámetro, similares a las obtenidas en este estudio.

El peso fresco de semilla (Figura 4D) aumentó a una TAC de 31.58 y 29.11 mg d⁻¹ hasta las cosechas de 75 y 64 dda, con un peso máximo de 1144 y 1082 mg/semilla, posteriormente dicho peso disminuyó a 691.2 y 677.4 mg, para el primero y segundo periodo de fructificación. Según Annarao *et al.* (2008) durante el desarrollo de semillas de *J. curcas* su peso fresco varía de 32.4 mg a 1061 mg, valores similares a los registrados en el presente estudio. Xu *et al.* (2011) también reportan valores de peso fresco de semilla similares a los de este trabajo, aunque el peso fresco máximo se alcanzó a los 50 dda, mientras que en el presente estudio ocurrió 75 y 64 dda, diferencia debida posiblemente al efecto del genotipo y condiciones ambientales.

El peso de 1000 semillas aumentó gradualmente mientras avanzó la madurez, con máximos de 646.0 g (75 dda) y

609.5 g (68 dda) para el primero y segundo periodo de fructificación; la misma tendencia presentó el peso volumétrico, que alcanzó 47.5 y 47.0 Kg HL⁻¹ a los 75 dda para ambos periodos. Las dos variables mostraron una pequeña reducción después de esas fechas (Figura 5) en el primer periodo de fructificación, debido posiblemente a una reducción en la humedad de la semilla causada por un decremento en la humedad relativa del ambiente, previo a la medición de estas variables.

La diferencia más marcada entre ambos periodos de fructificación, en general, se reflejó en una mayor duración de la fase de acumulación de reservas en el segundo periodo, que inició aproximadamente 5 d antes y terminó 3 d después que la primera fructificación; en consecuencia las variables de crecimiento de fruto y semilla previas a madurez fisiológica fueron de mayor magnitud en la segunda fructificación. El inicio temprano en la acumulación de reservas en la segunda fructificación coincide con los valores máximos de temperatura mínima y mayor precipitación que aceleran

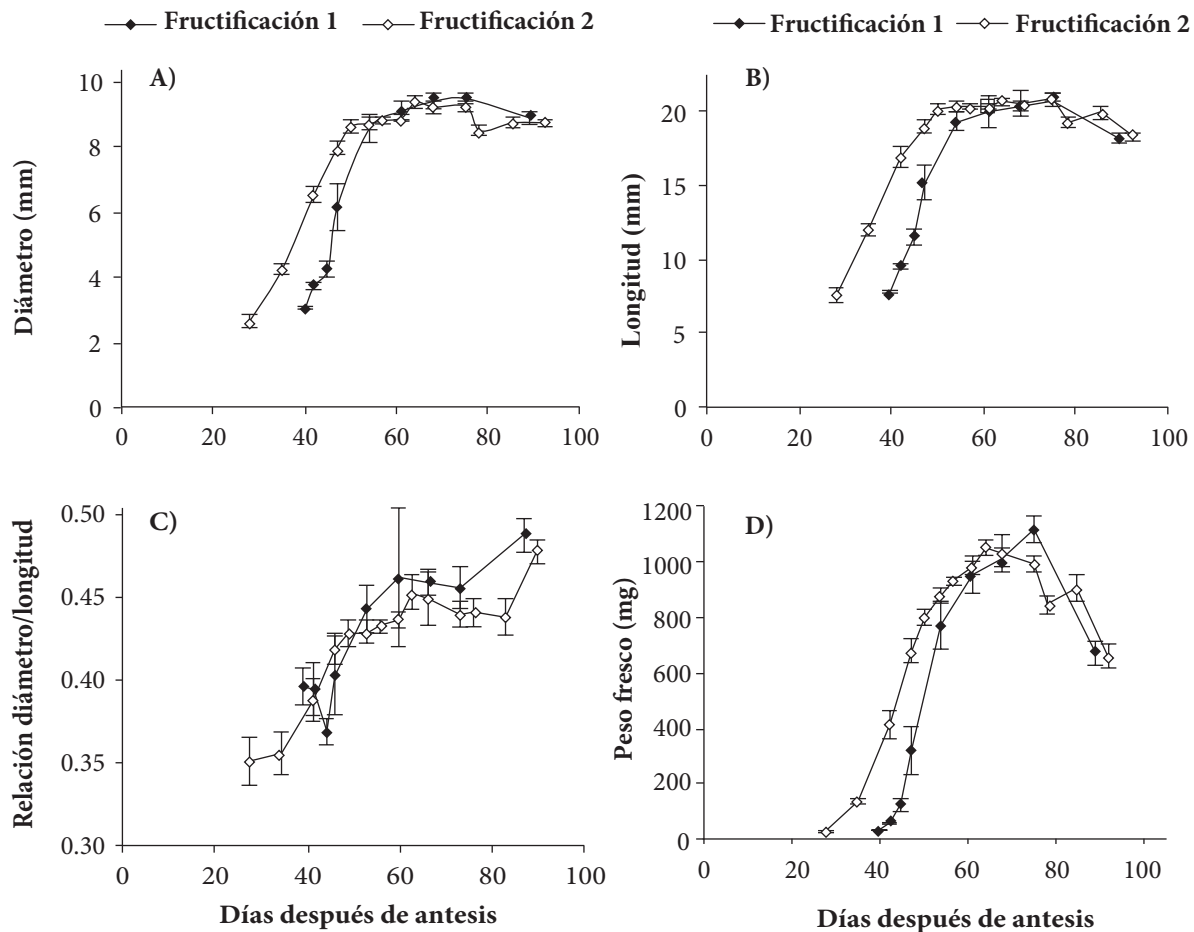


Figura 4. Cambios durante el desarrollo de semilla de *J. curcas* en diámetro (A), longitud (B), relación diámetro/longitud (C) y peso fresco (D). Promedio de tres repeticiones de 10 semillas \pm error estándar.

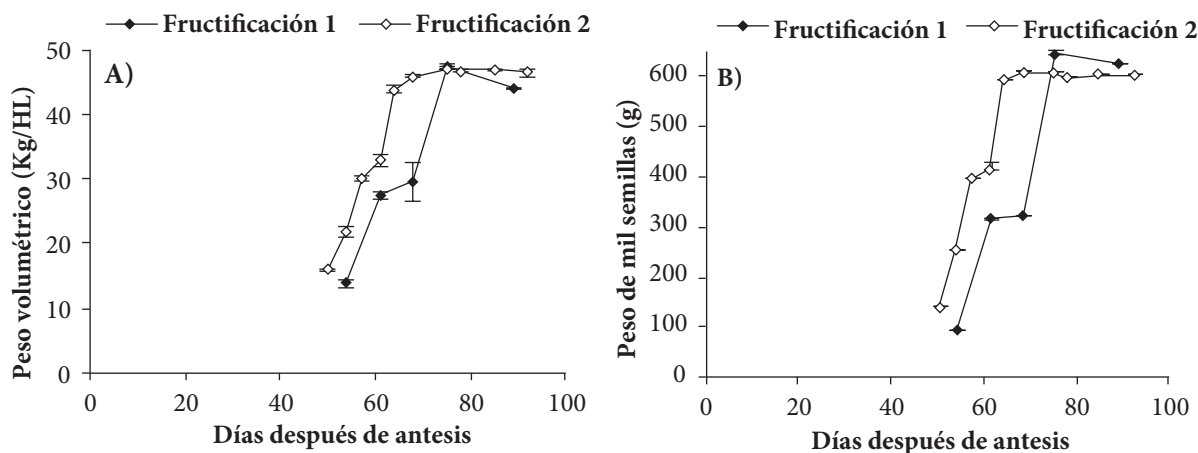


Figura 5. Cambio en peso volumétrico (A) y peso de mil semillas (B) durante el desarrollo de semillas de *J. curcas*. Promedio de tres repeticiones de 250 semillas (A) y ocho repeticiones de 100 semillas (B) \pm error estándar.

el metabolismo; en contraste, la prolongación de esta fase podría deberse a un descenso en la temperatura mínima y media mensual a partir del mes de octubre, que podría reducir la actividad metabólica, así como a una menor precipitación pluvial (Figura 1).

El color de los frutos cambió a medida que avanzó su desarrollo y madurez (Figura 6). Con base en la escala de Muncell, hasta los 68 y 64 dda el color fue verde, con tonos de verde pasto (5GY4/8) a verde limón (2.5GY7/10). Posteriormente se presentaron pigmentos amarillos que van cubriendo el fruto por completo (5Y8/10; 75 dda), lo que coincidió con la máxima acumulación de peso seco. Más tarde aparecieron manchas marrón (7.5YR4/2) que cubren todo el fruto 89 y 92 dda, apariencia que coincidió con frutos secos y dehiscentes. Las semillas presentan testa de color blanco hasta 50 dda, que empieza con tonalidades de color oscuro para alcanzar un negro intenso 60 y 64 dda, en el primero y segundo periodo de fructificación.

El color de fruto se ha recomendado como indicador visual no destructivo de la madurez fisiológica de la semilla en higuera (*Ricinus communis*) (Silva *et al.*, 2009), árbol de los farolitos (*Koelreuteria paniculata*), sabia (*Mimosa caesalpiniaefolia*), ibirá puitá guazú (*Peltophorum dubium*) (Aquino *et al.*, 2006), así como en canela de brejo (*Machaerium brasiliense*) (Guimarães y Barbosa, 2007), y palo de Brasil (*Caesalpinia echinata*) (Aguilar *et al.*, 2007). En el presente estudio, el máximo peso seco de semilla o madurez fisiológica coincide con el color de fruto totalmente amarillo (Muncell, 5Y8/10; 75 dda). Annarao *et al.* (2008) y Silva *et al.* (2011) han asociado el color de fruto de *J. curcas* con el contenido de aceite y germinación.

El análisis de correlación de peso seco de semilla con las

variables de fruto no presentó significancia, excepto para longitud y diámetro en el primer periodo de fructificación (Cuadro 1). En cambio, todas las correlaciones con las variables de semilla resultaron significativas en ambos periodos de fructificación. El contenido de humedad cuya correlación fue significativa y negativa, se debe a que sus valores disminuyen mientras el peso seco aumenta. Esto significa que las variables de semilla aquí evaluadas pueden servir como indicadores de la madurez fisiológica, aunque para efectos prácticos y no destructivos el color amarillo del fruto es el mejor indicador.

CONCLUSIONES

La madurez fisiológica de la semilla basada en la máxima acumulación de peso seco se alcanzó a los 75 y 78 dda para el primero y segundo periodo de fructificación, respectivamente. Las variables cuantitativas de fruto se incrementaron con la madurez, pero sus máximos valores ocurrieron pocos días antes de la madurez fisiológica de la semilla. Las características de semilla alcanzaron valores máximos cerca de la madurez fisiológica, por lo que pueden ser considerados indicadores de madurez fisiológica. La variable más asociada con la máxima acumulación de peso seco de la semilla fue el color amarillo del fruto (Muncell, 5Y8/10; 75 dda), por lo que se propone como un indicador visual confiable y no destructivo de la madurez fisiológica de semillas de *Jatropha curcas* L.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por la beca proporcionada a J. Trinidad Zavala-Hernández para realizar sus estudios de maestría durante el periodo 2011-2013, y al Ing. Evaristo Genis Campos por facilitar su parcela para el presente estudio.


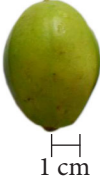
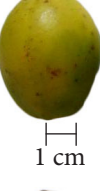
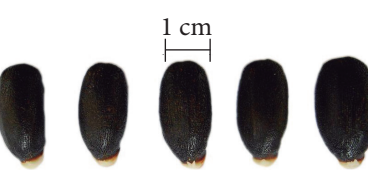
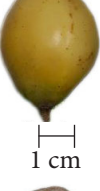


DDA	Fruto	Color visual	Tabla Munsell	Semillas
28		Verde	5GY4/8	
54		Verde claro	5GY6/10	
64		Verde limón con manchas amarillas	2.5GY7/10	
68		Amarillo con pigmentos verdes	5Y8/6	
75		Amarillo	5Y8/10	
85		Fruto húmedo café	2.5Y5/6	
92		Fruto seco café	7.5YR4/2	

Figura 6. Cambios en color de fruto y semilla de *Jatropha curcas* L. durante su desarrollo. DDA = días después de antesis.

Cuadro 1. Correlación de Pearson entre peso seco de semilla y otras dimensiones de las semillas de *Jatropha curcas* L.

Variables	Periodos de fructificación	
	Primero	Segundo
Características de fruto		
Longitud (mm)	0.75*	0.59 ns
Diámetro (mm)	0.73*	0.54 ns
Relación D/L	0.56 ns	0.32 ns
Peso (g)	0.55 ns	0.45 ns
Características de semilla		
Longitud (mm)	0.68*	0.61*
Diámetro (mm)	0.74*	0.71*
Relación D/L	0.81**	0.81**
Peso fresco (mg)	0.72*	0.74*
Peso de 1000 semillas (g)	0.98**	0.99**
Peso volumétrico (kg/HL)	0.97**	0.99**
Contenido de humedad (%)	-0.95**	-0.96**

** , Significativo con $\alpha = 0.01$ y 0.05 , respectivamente; ns, no significativo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguar F. A., M. M. Pinto, A. R. Tavares and S. Kanashiro (2007) Maturation of fruits of *Caesalpinia echinata* Lam. Pau-Brasil. *Revista Árvore* 31:1-6.
- Ahrens D. C. and S. T. Peske (1994) Flutuações de umidade e qualidade em semente de soja após a maturação fisiológica. I. Avaliação do teor de água. *Revista Brasileira de Sementes* 16:107-110.
- Annarao S., O. P. Sidhu, R. Roy, R. Tuli and C. L. Khetrapal (2008) Lipid profiling of developing *Jatropha curcas* L. seeds using 1H NMR spectroscopy. *Bioresource Technology* 99:9032-9035.
- Aquino N. F., M. Bortolini, M. A. Campagnolo, V. L. Ignácio, A. C. Kopper and M. M. Malavasi (2006) Dormência de sementes de *Peltophorum dubium* (Sprengel.) Taubert colhidas em diferentes estádios de desenvolvimento. *Scientia Agraria Paranaensis* 5:31-37.
- Arruda F. P., N. E. M. Beltrão, A. P. Andrade, W. E. Pereira y L. S. Severino (2004) Cultivo de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. *Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas* 8:789-799.
- Basha S. D. and M. Sujatha (2007) Inter and intra population variability of *Jatropha curcas* L. characterized by RAPD and ISSR markers and development of population-specific SCAR markers. *Euphytica* 156:375-386.
- Bewley J. D. and M. Black (1994) Seeds: Physiology of Development and Germination. 2da ed. New York, Plenum Press. 445 p.
- Bradford K. J. (2004) Seed Production and Quality. Department of Vegetable Crops, University of California. Davis, California, U.S.A. 134 p.
- Campton D. E. (1990) Application of biochemical and molecular markers to analysis of hybridization. In: Electrophoretic and Isoelectric Focusing Techniques in Fisheries Management. Whitmore D. H. (ed.). CRC Press, Florida. pp:240-264.
- Carvalho N. M. and J. Nakagawa (2000) Sementes: ciência, tecnologia e produção. 4a ed. Funep, Jaboticabal. 588 p.
- Dias D. C. F. S., F. P. Ribeiro, L. A. S. Dias, D. J. H. Silva and D. S. Vidigal (2006) Tomato seed quality in relation to fruit maturation and post-harvest storage. *Seed Science and Technology* 34:691-699.
- Ellis R. H. and C. Pieta Filho (1992) The development of seed quality in spring and winter cultivars of barley and wheat. *Seed Science Research* 2:9-15.
- García E. (1964) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía-UNAM, México. 217 p.
- FAO/IPGRI, Food and Agriculture Organization of the United Nations/International Plant Genetic Resources Institute (2010) *Jatropha*: A smallholder bioenergy crop, the potential for pro-poor development. *Integrated Crop Management*, vol 8. Rome. doi: Diversity and distribution of genus *Jatropha* in Mexico (2012). <http://www.fao.org/docrep/012/i1219e/i1219e.pdf>
- Guimarães D. M. and J. M. Barbosa (2007) Coloração dos frutos como índice de maturação para sementes de *Machaerium brasiliense* Vogel (Leguminosae – Fabaceae). *Revista Brasileira de Biociências* 5:567-569.
- Harrington J. F. (1972) Seed storage longevity. In: Seed Biology. T. T. Kossolowsky (ed.), Academic Press, New York. Vol. 3. pp:145-245.
- Heller J. (1996) Physic nut (*Jatropha curcas* L.) Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. IBPGR, Roma, Italia. 66 p.
- ISTA, International Seed Testing Association (2005) International Rules for Seed Testing. Seed Science and Technology. International Seed Testing Association. Bassersdorf, Switzerland.
- Jongschaap R. E. E., W. J. Corré, P. S. Bindraban and W. A. Brandenburg (2007) Claims and facts of *Jatropha curcas* L.: global *Jatropha curcas* evaluation, breeding and propagation programme. Plant Research International, Wageningen. 42 p. <http://www.pri.wur.nl>.
- Makkar H. P. S., K. Becker, F. Sporer and M. Wink (1997) Studies on nutritive potential and toxic constituents of different provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chemistry* 45:3152-3157.
- Martínez-Herrera J., P. Siddhuraju, G. Francis, G. Dávila-Ortiz and K. Becker (2006) Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chemistry* 96:80-89.
- SAS Institute (2002) Statistical Analysis System. SAS User's Guide: Statistics. Version 9.2. SAS Institute, Cary, NC.
- Saturnino H. M., D. D. Pacheco, J. Kakida, N. Tominaga and N. P. Gonçalves (2005) Cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.). *Informe Agropecuário* 26:44-78.
- Sena C. M. and M. A. Gariglio (1998) Sementes florestais: colheita, beneficiamento e armazenamento. IBAMA. Brasília, Brasil. 27 p.

- Silva L. B., C. C. Martins, C. G. Machado and J. Nakagawa (2009) Estádios de colheita e repouso pós-colheita dos frutos na qualidade de sementes de mamoneira. *Revista Brasileira de Sementes* 31:50-59.
- Silva L. J., D. C. F. S. Dias, L. A. S. Dias and P. C. Hilst (2011) Physiological quality of *Jatropha curcas* L. seeds harvested at different development stages. *Seed Science and Technology* 39:572-580.
- Taiz L. and E. Zeiger (2006) *Plant Physiology*. 3rd ed. Ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Tekrony D. M. and D. B. Egli (1997) Accumulation of seed vigour during development and maturation. *In: Basic and Applied Aspects of Seed Biology*. Kluwer Academic Publishers. Boston. Vol 30:369-384.
- Webster G. L. (1994) Synopsis of the genera and suprageneric taxa of Euphorbiaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 81:33-144.
- Xu R., Wang R. and A. Liu (2011) Expression profiles of genes involved in fatty acid and triacylglycerol synthesis in developing seeds of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.). *Biomass Bioenergy* 35:1683-1692.
- Zamarripa C. A., H. J. Martínez, C. R. De La Piedra y D. L. S. A. Olivera (2008) Biocombustibles: perspectivas de producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* L., en el trópico de México. Folleto Técnico, INIFAP, México. 30 p.