



# *Jatropha curcas* en México: Avances y Perspectivas de un Cultivo Bioenergético

Guadalupe López Puc  
Alberto Uc Vázquez  
Editores científicos







***Jatropha curcas* en México:  
Avances y Perspectivas  
de un Cultivo Bioenergético**

---

Directorio

**Dr. Inocencio Higuera Ciapara**  
DIRECTOR GENERAL DE CIATEJ

**Dra. Patricia Ocampo Thomason**  
DIRECTORA SEDE SURESTE DE CIATEJ

# ***Jatropha curcas* en México: Avances y Perspectivas de un Cultivo Bioenergético**

---

*Guadalupe López Puc*  
*Alberto Uc Vázquez*  
Editores científicos



Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología  
y Diseño del Estado de Jalisco A.C.,  
Sede Sureste

2018  
Mérida, Yucatán, México

*Jatropha curcas* en México: Avances y Perspectivas de un Cultivo Bioenergético

*Guadalupe López Puc*

*Alberto Uc Vázquez*

D.R. © Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), 2018

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin permiso por escrito del titular de los derechos.

ISBN 978-607-98348-1-4

Cuidado de edición y revisión ortotipográfica

*Alejandrina Garza de León*

Diseño editorial, de cubierta, infografía, gráficos y formación

*Paola Marfil Lara*

Editado e impreso en Mérida, México

## Presentación

La presente obra contiene información de gran relevancia sobre el género *Jatropha*, como punto de partida para el análisis del potencial de cultivo comercial, teniendo en cuenta que México es considerado como centro de origen y dispersión con un amplio acervo genético. La obra describe la diversidad genética y el papel de México en el contexto de las nuevas oportunidades que se presentan para esta especie, considerando que es la única región geográfica en la cual se han encontrado genotipos no tóxicos, lo que está estrechamente vinculado al proceso de domesticación llevado a cabo por culturas prehispánicas. Se presentan datos de los avances en el mejoramiento genético y métodos de producción, manejo de plagas y enfermedades para el cultivo de *Jatropha curcas* en México. Por otra parte, se hace también una descripción de los beneficios ambientales y principios de sostenibilidad que pueden ser alcanzados si se aprovecha el cultivo de manera integral, teniendo como objetivo su utilización como fuente de biomasa para la producción de bioetanol, biodiésel, biogás y bioturbosina. Además, se describen los resultados de los estudios de toxicidad, así como el potencial nutritivo de los subproductos de accesiones de *J. curcas* cultivadas en el noreste de la península de Yucatán. Ocho de las nueve accesiones evaluadas presentaron valores de toxicidad similares o menores a las evaluadas para semillas catalogadas como comestibles o no tóxicas provenientes del estado de Morelos, lo que genera muy buenas perspectivas para el aprovechamiento de la torta desgrasada que resulta de la extracción de aceite como materia prima. Por último, se presentan los protocolos de micropropagación, así como los aspectos más relevantes a tomar en cuenta para generar empresas basadas en el cultivo *in vitro* de *Jatropha curcas*, para la producción a gran escala de plantas élite mejoradas genéticamente. Con estas aportaciones, CIATEJ cumple con su misión institucional de contribuir al desarrollo sostenible de México y, en particular, de la región sureste.

*Dr. Inocencio Higuera Ciapara*  
Director General del CIATEJ

## Agradecimientos

Los coordinadores de este libro extendemos nuestro agradecimiento

Al Fondo sectorial Sagarpa-Conacyt por el financiamiento otorgado al proyecto “Mejoramiento genético de *Jatropha* para generar al menos una variedad con alto rendimiento agronómico, alto contenido de aceite y baja toxicidad para la obtención de biodiésel 2011-05 163502”.

Al Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC, institución líder que ha permitido llevar a cabo el proyecto 2011-05 163502, en sus instalaciones.

A la empresa Agroindustria Alternativa del Sureste SPR de RL de CV; a las instituciones: Centro de Investigación Científica de Yucatán; a la Facultad de Ingeniería Química de la UADY; al Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas AC, Departamento de Soluciones Tecnológicas y a la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por la valiosa colaboración de los autores que participaron en la redacción de esta obra.



## Índice

<b>Capítulo 1</b>	<b>El género <i>Jatropha</i> en México, punto de partida para el análisis del potencial del cultivo comercial de <i>Jatropha curcas</i> L.</b>	<b>17</b>
	Introducción	18
	La familia Euphorbiacea en México, bases botánicas	20
	<i>Jatropha curcas</i> en México	25
	Descripción botánica de la especie	25
	Distribución, abundancia y área potencial para el cultivo	27
	Cultivo comercial de <i>Jatropha curcas</i> en México	35
	La producción comercial de <i>Jatropha</i> en México	35
	Reportes del cultivo comercial de <i>Jatropha</i> en México	39
	Conclusiones y perspectivas	46
	Bibliografía citada	48
<b>Capítulo 2</b>	<b>La diversidad en <i>Jatropha curcas</i> L. y el papel de México en su nueva oportunidad agroindustrial</b>	<b>51</b>
	Introducción	52

<i>J. curcas</i> , revisión de su diversidad genética en Asia y América	54
La diversidad de <i>J. curcas</i> en China	54
Reporte de la diversidad genética en Indonesia	55
<i>Jatropha curcas</i> , su diversidad en India	56
Referencias sobre la diversidad genética en Tailandia	57
Reportes de diversidad en Brasil	59
Referencia de la diversidad genética en México	60
Síntesis sobre la diversidad y dispersión de <i>J. curcas</i>	62
<i>J. curcas</i> , su diversidad más allá de un recurso oleaginoso	64
México y su relación en la diversidad del éster de forbol en <i>J. curcas</i>	68
Conclusiones y perspectivas	74
Bibliografía citada	75
<b>Capítulo 3 Avances en el mejoramiento genético de <i>Jatropha curcas</i> L. Experiencia de la empresa Jatronergy en Yucatán México por ocho años</b>	<b>81</b>
Introducción	82
Conclusiones y perspectivas	95
Bibliografía citada	96

<b>Capítulo 4 Producción y manejo del cultivo de <i>Jatropha curcas</i> en Yucatán, México</b>	<b>97</b>
Introducción	98
<i>Jatropha curcas</i> L.	99
Requerimientos agroecológicos	100
Producción de planta en vivero	102
Producción de planta por semilla	102
Producción de planta por estaca	103
Establecimiento de la plantación	104
Selección del terreno	104
Preparación de terreno	105
Densidad de plantación	105
Plantación con estaca directa	106
Siembra de plantas de vivero con cepellón	107
Híbridos de <i>J. curcas</i> L.	108
Manejo agronómico del cultivo	111
Control de malezas	111
Riego	112
Nutrición	113
Poda	114
Plagas y enfermedades	116
Producción y cosecha de plantaciones de <i>Jatropha</i>	117
Floración y producción	117
Cosecha	118

Manejo poscosecha: despulpado, secado y almacenaje de grano	119
Conclusiones y perspectivas	121
Bibliografía citada	122
<b>Capítulo 5 Plagas y enfermedades de importancia en el cultivo de <i>Jatropha curcas</i> en México</b>	<b>125</b>
Introducción	126
Insecto plaga	127
Piojo harinoso	128
Ácaros fitófagos	130
Ácaro dorado	131
Araña roja	133
Enfermedades	135
Mancha foliar	135
Antracnosis en hoja	138
Roya de la hoja	139
Pudrición del pie	141
Conclusiones y perspectivas	142
Bibliografía citada	144
<b>Capítulo 6 Beneficios ambientales y sostenibilidad</b>	<b>149</b>
Introducción	150
Agroecología y sustentabilidad del cultivo	151
Huella de carbono en el ciclo de vida	153

Sostenibilidad del cultivo de <i>Jatropha</i>	158
Aprovechamiento para la generación de productos secundarios	163
Fuente promisorio para la generación de biocombustibles	167
Producción de biodiésel y bioturbosina	167
Producción de bioetanol	168
Producción de biogás	169
Producción de pellets para combustión	170
Fitorremediación y recuperación de suelos erosionados	170
Conclusiones y perspectivas	172
Bibliografía citada	175
<b>Capítulo 7 Toxicidad y potencial nutritivo de subproductos de <i>Jatropha curcas</i> L.</b>	<b>181</b>
Introducción	182
Usos de <i>J. curcas</i> L.	183
Toxicidad	183
Material residual	184
Resultados experimentales	185
Contenido de ésteres de forbol	185
Composición proximal	189
Composición de aminoácidos	194

Valor biológico y la relación de eficiencia proteica	196
Contenido de almidón	199
Perfil de monosacáridos	200
Conclusiones y perspectivas	202
Bibliografía citada	203
<b>Capítulo 8 Micropropagación de <i>Jatropha curcas</i> L.</b>	<b>207</b>
Introducción	209
Cultivo <i>in vitro</i>	211
Morfogénesis	211
Resultados del proyecto	212
Material vegetal, manejo fitosanitario de la planta madre, selección, desinfección y establecimiento de explantes <i>in vitro</i>	212
Organogénesis de brotes adventicios de explante de hoja de <i>J. curcas</i>	215
Efecto del Tidiazuron (TDZ), concentración del medio basal, condiciones de cultivo y del genotipo	215
Efecto del uso combinado del Ácido naftalenacético (ANA) y Zeatina (ZEA)	219
Efecto del sulfato de adenina (Sad), 6- (y, y-Dimetilalilamino) purina (2ip) y ácido indolacético (AIA)	221

Efecto del tipo de explante	224
Elongación de brotes adventicios	229
Enraizamiento de plántulas obtenidas <i>in vitro</i> de <i>J. curcas</i>	231
Protocolos	236
Conclusiones y perspectivas	237
Bibliografía citada	238
<b>Capítulo 9 Roadmapping para el cultivo <i>in vitro</i> de <i>Jatropha curcas</i>: una visión para 2025</b>	<b>243</b>
Introducción	244
Roadmapping: planificando el futuro	245
Mercados potenciales	246
Aspectos regulatorios de la biotecnología en México	249
El Protocolo de Cartagena	249
Proyectos de investigación	250
La investigación y desarrollo en cultivo <i>in vitro</i> de <i>Jatropha curcas</i>	251
La biotecnología y el cultivo de tejidos vegetales <i>in vitro</i>	251
Productos generados a partir de micropropagación	252
Biología sintética y nanobiotecnología	255
Posibles aplicaciones de biología sintética	255
La nanobiotecnología aplicada a <i>Jatropha curcas</i>	255
Tecnología: empresas de base tecnológica (EBT)	256

Generación de patentes	257
Técnicas y tecnología de punta para análisis de plantas cultivadas <i>in vitro</i>	258
Una aproximación del roadmapping para generar una empresa de base tecnológica <i>in vitro</i> de <i>Jatropha curcas</i>	258
Conclusiones y perspectivas	260
Bibliografía citada	261

# El género *Jatropha* en México, punto de partida para el análisis del potencial del cultivo comercial de *Jatropha curcas* L.

Erick A. Aguilera-Cauich<sup>1\*</sup>, Javier O. Mijangos-Cortés<sup>1</sup>, Daisy Pérez-Brito<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., calle 43 Núm 130 x 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, CP 97205 Mérida, Yucatán, México.

<sup>2</sup> Laboratorio GeMBio (Grupo de Estudios Moleculares aplicados a la Biología), Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., calle 43 Núm. 130 x 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, CP 97205 Mérida, Yucatán, México.

\* Autor de correspondencia: e.a.cauich@gmail.com

## Resumen

En la búsqueda de biocombustibles líquidos, la especie botánica *Jatropha curcas* L. ha figurado por las propiedades de su aceite para la elaboración de biodiésel y bioturbosina. Esta especie pertenece a la familia Euphorbiaceae, que es cosmopolita y cuya mayor diversidad de géneros ha sido reportada en América. En México, el género *Jatropha* lo conforman 45 especies, 77.7% de ellas endémicas, de amplia distribución nacional, y de ésta, 71.1% está asociada con la vegetación de selva baja caducifolia que se encuentra en climas predominantemente cálidos y secos. *J. curcas* se distribuye ampliamente en México, con dos centros de diversidad: el Pacífico y el Golfo. Esta especie presenta una amplia adaptación a diferentes condiciones climáticas y de vegetación entre los 0 y 800 msnm.

La Sagarpa, a través del SIAP, reporta el cultivo comercial de *J. curcas* en Colima, Puebla, Yucatán y Quintana Roo, entre 2009-2016; en este período la mayor super-

ficie sembrada fue de poco menos de 3 mil ha en 2013, localizándose la mayor superficie en Yucatán. Para 2016 la superficie sembrada total fue de 281.5 ha entre los estados de Puebla y Colima, reflejando el abandono del cultivo; a pesar de ello, se observó estabilidad entre la superficie sembrada y la cosechada en dichos estados, entre 2014 y 2016. Lo que se evidencia son rendimientos promedio de 0.6 ton ha<sup>-1</sup> de semilla, valores muy bajos que abren una oportunidad para la introducción de materiales mejorados.

Los reportes de las experiencias de cultivo de *J. curcas* en Michoacán, Yucatán y Chiapas, entre 2009 y 2011, pusieron en evidencia la falta de conocimiento en la especie, su cultivo extensivo y la nula tecnificación y capital humano especializado, que llevaron a tomar supuestos como fundamentos para el análisis financiero y proyecciones de operación, con los resultados del abandono de planes comerciales y la inversión en infraestructura.

## Palabras clave

*Jatropha curcas* L., diversidad, cultivo comercial, viabilidad financiera, bioenergía, biocombustible

## Introducción

En la última década, a nivel mundial, se ha impulsado el uso de energías renovables para combatir el cambio climático. En el caso de los biocombustibles, es posible señalar que el desarrollo tecnológico asociado al sector agropecuario, la necesidad de reducir las emisiones de gases con efecto invernadero y el decremento gradual de las reservas de hidrocarburos en los principales yacimientos, los elevados costos de exploración y extracción en pozos profundos, y la incertidumbre en la cantidad de las reservas a largo plazo, han propiciado el escenario ideal para su promoción (Cortés *et al.*, 2009; Sagarpa, 2009).

Este panorama ha facilitado las adecuaciones y regulaciones de ley para la transición energética, que han permitido y regulado la investigación y el uso de energías renovables (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2008), con la finalidad de sentar las bases para alcanzar la autosuficiencia energética. En este sentido, para la transición energética en el sector transporte y agropecuario, los combustibles líquidos bioetanol y biodiésel son señalados como elementos claves (SENER, BID & GTZ, 2006).

Inicialmente, las especies propuestas como fuente de materia prima para abastecer la producción de bioetanol fueron: caña de azúcar, maíz, remolacha azucarera, sorgo y trigo; y para biodiésel: colza, girasol, maní, palma de aceite y soya (FAO, 2008; SENER *et al.*, 2006). En ambos casos fueron postulados cultivos alimenticios básicos para la alimentación humana, lo que puso en duda la sustentabilidad de los biocombustibles al complicar más la seguridad alimentaria.

Para revertir la competencia entre los cultivos alimenticios y energéticos, como fuentes de aceite para la producción de biocombustibles líquidos, se han propuesto especies oleaginosas sin uso alimenticio, entre las que figura por su gran potencial *J. curcas* (Sagarpa, 2009). Esta especie puede crecer en suelos marginales, es tolerante a la sequía, entre el 40-50% del peso de su semilla corresponde al aceite, el cual en motores de combustión interna puede ser usado directamente como combustible, o mediante el proceso de transesterificación, puede ser transformado en biodiésel y cubre los estándares internacionales de calidad similar al diésel fósil. A lo anterior es posible añadir que los subproductos de la extracción del aceite de *Jatropha* pueden ser incluidos en la cadena de valor, al presentar usos industriales como el caso de la pasta, la cual puede ser aprovechada en la ganadería por su alto contenido de proteína y la testa de la semilla, como fuente de energía por su alto potencial calórico y en usos industriales en farmacéutica, cosméticos y biopesticidas (Kumar & Sharma, 2008).

Este escrito pretende abordar la situación de *J. curcas* como cultivo energético en México, desde una perspectiva diferente, señalando al género *Jatropha* y su amplia distribución y adaptabilidad como eje rector de la inclusión del género con fines energéticos e industriales, al aprovechar su diversidad bio-

lógica y genética, poniendo en perspectiva los resultados y la situación del cultivo de *J. curcas* en México durante los últimos años.

## La familia Euphorbiaceae en México, bases botánicas

La familia botánica Euphorbiaceae tiene una distribución cosmopolita (exceptuando las zonas polares), que por representatividad y para su estudio se agrupa geográficamente en cinco puntos de distribución: América, África, Madagascar, Asia y Australasia.

La mayor cantidad de géneros para esta familia se reportan en América, ya que exhibe 35.0% del total de géneros a nivel mundial, superando a Asia y África que presentan 33.7% y 32.1%, respectivamente. Del total de géneros en América (111 en total), 74.7% son endémicos (Webster, 1994), es decir, que su distribución está confinada a una región geográfica específica (Moreno, 1984), señalando que 83 géneros son de distribución exclusiva para América, al menos de forma natural. Es tan grande la riqueza genética, que se ha designado al continente Americano como el centro de origen, diversificación y endemismo de la familia Euphorbiaceae (Martínez-Gordillo & Morrone, 2005).

En México, que ha sido catalogado como un país megadiverso, por sus múltiples ecosistemas y la biodiversidad que alberga, la familia Euphorbiaceae está representada por 50 géneros (15.77% del total mundial), y un total de 826 especies, entre originarias e introducidas, por lo cual se cataloga como una de las familias botánicas más grandes en este país; donde los principales géneros, por su cantidad de especies, son: *Euphorbia* (241 spp.), *Croton* (124 spp.), *Acalypha* (108 spp.), *Jatropha* (45 spp.) y *Phyllanthus* (41 spp.). La amplia diversidad en esta familia botánica puede evidenciarse por: las formas de crecimiento reportadas (herbáceas anuales y perennes, geófitas, arbustos y árboles); sus formas ecológicas (higrófilas, acuáticas flotantes, xeromorfas y suculentas); su distribución con respecto del nivel del mar (de 0 a 3000 m de altitud); su distribución por diez tipos diferentes de vegetación, y el endemismo en más de 50% de las especies reportadas (Martínez-Gordillo *et al.*, 2002).

Entre esta amplia gama de formas de crecimiento, ecología y amplio rango de

distribución podemos señalar algunas especies mexicanas de la familia Euphorbiaceae conocidas por su valor comercial e industrial como: *Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch o “Nochebuena” propagada como ornamental por todo el mundo; *Euphorbia antisyphilitica* Zucc. o “Candelilla”, cultivada como fuente de cera vegetal, en la región desértica de Chihuahua; especies de *Croton*, como: *C. niveus* Jacq. y *C. psuedoniveus* Lundell, de las cuales se aprovechan los tallos para su uso como estacas en los campos agrícolas; y algunas con usos comestibles como: *Euphorbia delicatula* Boiss., en Jalisco, donde las hojas se usan como condimento; *Euphorbia macropus* (Klotzsh & Garcke) Boiss., en Nuevo León, donde se reporta que el tubérculo se mastica como chicle, y para *J. curcas*, en Veracruz se reporta el consumo de la almendra en la alimentación humana, en ecotipos no-tóxicos (Steimann, 2002), el uso del látex en la medicina tradicional (Martínez, 1979); y en la reciente búsqueda de combustibles líquidos, su aceite se utiliza como materia prima para la elaboración de biodiésel y bioturbosina (Achten *et al.*, 2008), razón por la cual el género *Jatropha* ha tomado gran relevancia en México y el mundo.

Este género está representado a nivel mundial por 188 especies, de ellas en México se encuentran 45, de las cuales 77.7% son estrictamente endémicas (Cuadro 1), razón por la cual México es considerado como centro de diversidad secundario del género *Jatropha* (Steimann, 2002). Este género se distribuye ampliamente por el territorio nacional, evidencia de esto es el reporte de su presencia en 28 de los 32 estados que conforman la República Mexicana (Cuadro 1).

Por otra parte, su distribución se asocia principalmente a la vegetación de selva baja caducifolia (SBC), ya que 71.1% del total de especies reportadas para México fueron localizadas en este tipo de vegetación.

### Cuadro 1. Listado de las especies del género *Jatropha* reportadas en México, señalando datos de distribución geográfica por estado y el tipo de vegetación en la que se reporta

Especie del género <i>Jatropha</i>	Distribución por estado	Tipo de vegetación	Forma de vida
<i>J. alamanii</i> Müll. Arg. <sup>(E)</sup>	Oax	SBC, SMS, BE	Arbusto
<i>J. andrieuxii</i> Müll. Arg. <sup>(E)</sup>	Gro, Oax, Pue	SBC	Arbusto

Continuación de Cuadro 1...

Especie del género <i>Jatropha</i>	Distribución por estado	Tipo de vegetación	Forma de vida
<i>J. bartlettii</i> Wilbur <sup>(E)</sup>	Jal	SBC, BQ	Árbol
<i>J. bullockii</i> E.J. Lott <sup>(E)</sup>	Jal	SBC	Arbusto
<i>J. cardiophylla</i> (Torr.) Müll. Arg.	Mor, NL, Son	SBC, BE	Arbusto
<i>J. cathartica</i> Terán & Berland	NL, Tam	-	Arbusto
<i>J. chamelensis</i> Perez-Jim <sup>(E)</sup>	Jal	SBC, SMS	Árbol
<i>J. ciliata</i> Sessé ex Cerv. <sup>(E)</sup>	DF, Méx, Oax, Pue	SBC	Arbusto
<i>J. cinérea</i> (Ortega) Müll. Arg.	BCS, Jal, Sin, Son	SBC	Arbusto
<i>J. contrerasii</i> J. Jiménez Ram. & Martínez-Gordillo <sup>(E)</sup>	Gro	SBC	Árbol
<i>J. konzattii</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Oax	SBC	Arbusto
<i>J. cordata</i> (Ortega) Müll. Arg. <sup>(E)</sup>	Chi, Dur, Jal, Mich, Sin, SLP, Son, Zac	SBC, BE	Arbusto
<i>J. cuneate</i> Wiggins & Rollins	BCN, Sin, Son	-	Arbusto
<i>J. curcas</i> L.	Chp, Gro, Jal, Mich, Mor, Nay, Oax, Pue, Sin, Tab, Ver, Yuc	SBC	Árbol
<i>J. dehganii</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Jal	SBC	Arbusto

Continuación de Cuadro 1...

Especie del género <i>Jatropha</i>	Distribución por estado	Tipo de vegetación	Forma de vida
<i>J. dioica</i> Cerv.	BCN, Chi, Coa, DF, Dur, Gro, Gto, Hgo, Méx, Mich, NL, Pue, Roo, SLP, Tam, Zac	-	Arbusto
<i>J. elbae</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Gro	SBC	Árbol
<i>J. fremontii</i> Standl. <sup>(E)</sup>	Oax	-	Arbusto
<i>J. galvanii</i> J. Jiménez Ram. & L.M. Contr. Jim. <sup>(E)</sup>	Gro, Jal	SBC	Árbol
<i>J. gaumeri</i> Greenm. <sup>(E)</sup>	Cam, Roo, Yuc	SBC, SMS	Árbol
<i>J. giffordiana</i> Dehgan & G.L. Webster <sup>(E)</sup>	BCN	-	Arbusto
<i>J. gossypifolia</i> L.	Oax, Roo, Sin, Ver	SBC, SMS, BE	Hierba
<i>J. hintonii</i> Wilbur <sup>(E)</sup>	Zac	-	Arbusto
<i>J. krusei</i> J. Jiménez Ram. & Martínez-Gordillo <sup>(E)</sup>	Gro	SBC	Arbusto
<i>J. macrorhiza</i> Benth.	Chi, Son		Hierba
<i>J. malacophylla</i> Standl. <sup>(E)</sup>	Chi, Jal, Oax, Sin, Son	SBC, SMS	Arbusto
<i>J. mcvaughii</i> <sup>(E)</sup>	Jal, Sin	SBC	Árbol
<i>J. moranii</i> Dehgan & G.L. Webster <sup>(E)</sup>	BCN	-	Arbusto
<i>J. neopauciflora</i> Pax <sup>(E)</sup>	Oax, Pue	SBC	Arbusto
<i>J. oaxacana</i> J. Jiménez Ram. & R. Torres <sup>(E)</sup>	Oax	SBC, BQ	Arbusto
<i>J. ortegae</i> Standl. <sup>(E)</sup>	Sin	-	Árbol

Continuación de Cuadro 1...

Especie del género <i>Jatropha</i>	Distribución por estado	Tipo de vegetación	Forma de vida
<i>J. pereziae</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Mich	SBC	Árbol
<i>J. platyphylla</i> Müll Arg.	Jal, Mich, Nay, Sin	SBC, SMS	Arbusto
<i>J. podagrica</i> Hook.	Chp, Gro, Oax, Tab, Ver	SBC	Hierba
<i>J. pseudocurcas</i> Müll. Arg. <sup>(E)</sup>	Chp, Jal, Oax, Tab, Ver	SBC	Arbusto
<i>J. purpurea</i> Rose <sup>(E)</sup>	Sin, Son, BCN	-	Arbusto
<i>J. riojae</i> Miranda <sup>(E)</sup>	Pue	-	Arbusto
<i>J. rufescens</i> Brandegees <sup>(E)</sup>	Pue	-	Arbusto
<i>J. rzedowskii</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Oax, Pue	SBC	Arbusto
<i>J. stephanii</i> J. Jiménez Ram. & M. Martínez <sup>(E)</sup>	Mich	SBC	Árbol
<i>J. sympetala</i> S.F. Blake & Standl <sup>(E)</sup>	Oax	SBC	Árbol
<i>J. tehuantepecana</i> J. Jiménez Ram. & A. Campos Vilb. <sup>(E)</sup>	Oax	BPQ	Árbol
<i>J. tlalcozotitlanensis</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Gro	SBC	Arbusto
<i>J. vernicosa</i> Brandegees <sup>(E)</sup>	BCN	SBC	Arbusto
<i>J. websteri</i> J. Jiménez Ram. <sup>(E)</sup>	Gro	SBC	Arbusto

<sup>(E)</sup> Especie de distribución endémica; BCN: Baja California Norte; BCS: Baja California Sur; Cam: Campeche; Chi: Chihuahua; Chp: Chiapas; Coa: Coahuila; DF: Ciudad de México; Dur: Durango; Gro: Guerrero; Gto: Guanajuato; Hgo: Hidalgo; Jal: Jalisco; Méx: México; Mich: Michoacán; Mor: Morelos; Nay: Nayarit; NL: Nuevo León; Pue: Puebla; Roo: Quintana Roo; Sin: Sinaloa; Son: Sonora; SLP: San Luis Potosí; Tab: Tabasco; Tam: Tamaulipas; Ver: Veracruz; Yuc: Yucatán; Zac: Zacatecas; BE: Bosque espinoso; BPQ: Bosque *Pinus-Quercus*; BQ: Bosque de *Quercus*; SBC: Selva baja caducifolia; SMS: Selva mediana subcaducifolia.

El alto nivel de endemismo no parece ser un factor limitante para su distribución, 81.25% de las especies reportadas como endémicas fueron localizadas en Selva baja caducifolia (SBC), sólo *J. tehuantepecana* J. Jiménez Ram. & A. Campos Vilb., endémica de Oaxaca, se localizó únicamente en el Bosque de *Pinus-Quercus* (BPQ). Por su parte, la distribución de *J. alamanii* Müll. Arg. (endémica de Oaxaca) y *J. gossypifolia* L. (distribuida en Oaxaca, Quintana Roo, Sinaloa y Veracruz) se reportó en la vegetación de SBC, Selva mediana subcaducifolia (SMS) y Bosque espinoso (BE) (Cuadro 1). Por otro lado, las especies con más amplia distribución geográfica fueron *J. dioica* L. y *J. curcas*, con presencia en 16 y 12 diferentes entidades federativas; la distribución de esta última se asocia a la vegetación de SBC (Cuadro 1).

La presencia del género *Jatropha* por la vegetación de SBC nos permite señalar gran plasticidad y adaptabilidad del género, ya que los climas asociados en México a la vegetación de SBC son: Cálidos subhúmedos, Semicálidos subhúmedos, Templados subhúmedos, Secos cálidos, Secos semicálidos y Secos templados; en los cuales se registra un rango de precipitación media anual entre 700 y 1200 mm; la temperatura media anual oscila entre 18 a 28 °C, con variaciones puntuales dependiendo de regiones específicas (Trejo, 1999).

## *Jatropha curcas* en México

### Descripción botánica de la especie

Arbusto o árbol caducifolio y monoico, en ocasiones dioico; de 1 a 5 m de alto. Su tronco tiene de 14 a 18 cm de diámetro (Figura 1, A - C, y K). La corteza es de color gris o rojizo y presenta escamas delgadas de color verdoso ceniciento. La disposición de las ramas es alterna, con un largo de 15 a 20 cm y de 3 a 5 cm de diámetro (Figura 1, D). La raíz es pivotante (si se reproduce por semilla) y se observan pocas ramificaciones.

Hojas ovadas, a veces levemente lobuladas, con 3 a 7 lóbulos agudos, de 10 a 25 cm de largo, 9 a 15 cm de ancho; base ampliamente cordada, glabrescentes en el envés; peciolos de 8 a 15 cm de largo, glabros; estípulas obsoletas (Figura 1, E).

La inflorescencia es un dicasio terminal de 10 a 25 cm de largo, monoica y por lo general con mayor cantidad de flores masculinas que femeninas; en ocasiones pueden encontrarse flores hermafroditas, en algunos casos plantas dioicas con flores sólo femeninas (Figura 1, F y G).

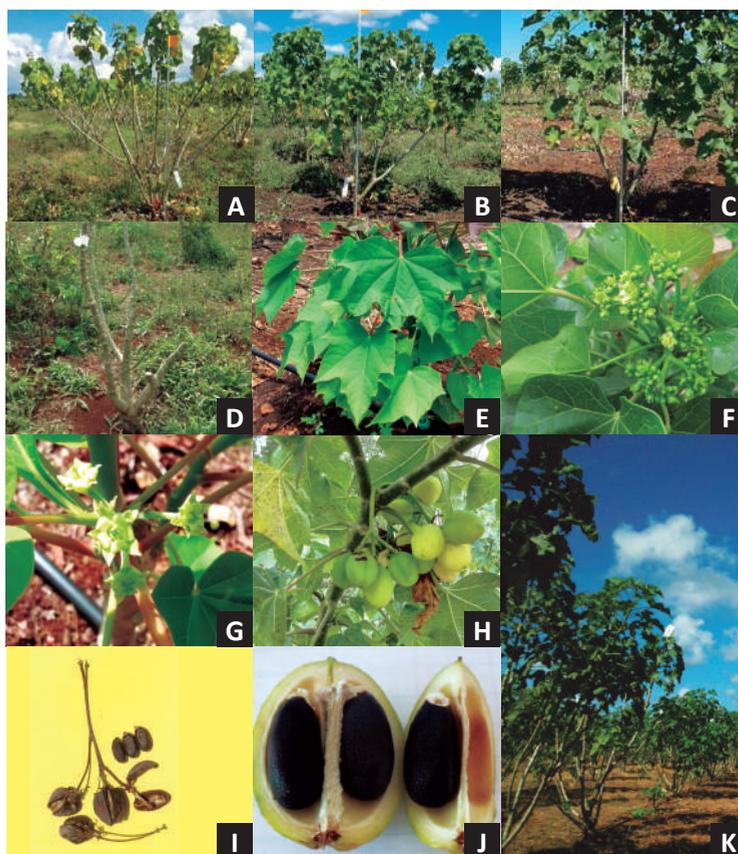


Figura 1. Descripción gráfica de las principales estructuras botánicas de *J. curcas*, presentando en: (A), (B) y (C) El hábito de crecimiento; (D) La estructura y forma de sus tallos; (E) La forma de sus hojas; (F) Inflorescencia con flores masculinas y femeninas; (G) Inflorescencia con sólo flores femeninas; (H) Frutos en estadios de inmadurez; (I) Frutos y semillas secas; (J) Semillas frescas, y (K) Crecimiento en una plantación comercial.

Las flores son unisexuales y amarillentas, pentámeras, con sépalos enteros y pétalos fusionados basalmente, de 5 a 6 mm de largo; hirsutos por dentro, verdosos o blanco-amarillentos; con 10 estambres; anteras de 1 a 1.6 mm de largo; ovario glabro. Las flores masculinas se localizan en la periferia de la inflorescencia, las flores femeninas son menos numerosas que las masculinas y se ubican en el centro de la inflorescencia. En México el período de floración se reporta de mayo a julio, aunque con manejo agronómico ésta puede extenderse hasta septiembre.

El fruto: una cápsula casi esférica, de color marrón oscuro al madurar, de 1.5 a 3 cm de diámetro, es dehiscente y trilobular, con una semilla en cada cavidad (Figura 1, H y J). Para México el período de fructificación se reporta en los meses de julio a noviembre (Gómez-Pompa, Krömer, & Castro-Cortés, 2010).

## Distribución, abundancia y área potencial para el cultivo

A pesar de que *J. curcas* es ampliamente distribuida en las regiones tropicales y subtropicales del mundo (Heller, 1996), y que se presentan reportes de esta especie dentro de listados florísticos y como parte de la flora útil de diferentes países en África (Belayneh & Bussa, 2014) y Asia (Kabir *et al.*, 2014), hay evidencias botánicas de que *J. curcas* es nativa de México y Centroamérica. Estudios recientes a nivel molecular revelan que México es probablemente el centro de origen de la especie (Victor Pecina-Quintero *et al.*, 2014) y el Continente Americano, específicamente México, ha sido el centro de dispersión de la especie hacia África y Asia (Li *et al.*, 2017; Maghuly *et al.*, 2015).

En México se presenta una amplia distribución y se destacan dos centros de diversidad, que corresponden a la vertiente del Pacífico, que incluye los estados de: Sinaloa, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas; y el segundo al Atlántico, abarcando los estados de Veracruz hasta Yucatán (Jiménez, 1995). Información de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) señala que los estados con mayor cantidad de reportes sobre la presencia de la especie fueron Chiapas, Veracruz, Sinaloa y Yucatán (Cuadro 2).

Para el centro de diversidad del Pacífico, el estado de Chiapas presentó la mayor cantidad de reportes (24.31%) y junto con Sinaloa presentan el 35.68% del total de reportes a nivel nacional. Por su parte, en el Atlántico, el estado de Veracruz presentó la mayor cantidad de reportes (20.79%) y junto con Yucatán presentan el 30.99% de los reportes nacionales para la especie.

Chiapas, Sinaloa, Veracruz y Yucatán presentan el 66.67% del total de reportes de *J. curcas* L. en el ámbito nacional, lo que señala su distribución en altitudes de 0 a 2,200 msnm, esto permitiría su establecimiento (potencia) desde zonas costeras hasta los valles de la Ciudad de México; con respecto de la temperatura media anual el rango mínimo y máximo reportado oscila de 16 a 28 °C respectivamente, y la precipitación media anual fluctúa entre 384 y 1,216 mm; características que comienza a restringir la distribución de la especie.

Los estados de Chiapas, Sinaloa, Veracruz y Yucatán representan los puntos de mayor presencia para *J. curcas* en México, por lo que deberían ser también los puntos con mayor diversidad de la especie, este supuesto se sustentó mediante un estudio con base molecular realizado en Chiapas, en el cual se evaluaron 88 accesiones distribuidas en siete regiones y 27 sitios de colecta; como resultado se encontró una amplia diversidad genética, representada por 566 fragmentos amplificados, de los cuales 510 resultaron polimórficos (90.1%), 13 únicos (2.2%) y 85 raros (15.0%), lo que puede resumirse en una frase como, una amplia reserva genética (Pecina-Quintero *et al.*, 2011).

**Cuadro 2. Distribución por la Republica Mexicana de *J. curcas* señalando las entidades federativas con reporte de avistamiento según los registros del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de la Conabio en 2015**

Entidad federativa	Cantidad de registros por entidad	Cantidad de registros a nivel municipio		Reporte de abundancia nacional (%)
		Total de municipios	Municipios con reporte	
Chiapas	62	119	23	24.31

Continuación de Cuadro 2...

Entidad federativa	Cantidad de registros por entidad	Cantidad de registros a nivel municipio		Reporte de abundancia nacional (%)
		Total de municipios	Municipios con reporte	
Veracruz	53	212	25	20.79
Sinaloa	29	18	6	11.37
Yucatán	26	106	13	10.20
Guerrero	17	81	11	6.67
Puebla	11	217	6	4.31
Quintana Roo	11	10	3	4.31
Oaxaca	9	570	7	3.53
Morelos	7	33	3	2.75
Nayarit	5	20	5	1.96
San Luis Potosí	5	58	5	1.96
Tamaulipas	4	43	3	1.57
Campeche	4	11	3	1.57
Jalisco	3	125	2	1.18
Tabasco	3	17	2	1.18
Colima	2	10	2	0.78
Michoacán	2	113	2	0.78
Hidalgo	1	84	1	0.39
México	1	125	1	0.39

Para Veracruz se reportó el estudio molecular de 65 accesiones distribuidas en 11 regiones representativas del estado; como resultado se encontró una baja diversidad, pero se observaron diferencias entre accesiones relacionadas con su toxicidad, separando tóxicas de no tóxicas y observando subgrupos dentro de las accesiones no tóxicas (Zavala del Angel *et al.*, 2016). En el contexto de una zona geográfica que reporta el uso etnobotánico de *J. curcas* en la alimentación humana, como sucede en Veracruz, este resultado lejos de ser desalentador aporta

evidencias de la domesticación de la especie, y los grupos dentro de las accesiones no tóxicas apuntan al aislamiento de genes, como resultado de la selección y que, de ser así, evidenciaría el acervo genético de la especie, relacionado a la ausencia o baja producción de éster de forbol causante de la toxicidad.

En Sinaloa se evaluaron poblaciones silvestres con respecto de caracteres morfológicos de interés agronómico como: altura, diámetro de copa, número de ramas y número de semilla, su peso y tamaño; como resultado se reportaron semejanzas morfológicas entre los individuos de cada una de las poblaciones evaluadas, señalando alta similitud morfológica entre ellas y diversidad genética entre poblaciones, el resultado del análisis de correlación entre caracteres morfológicos (altura, diámetro de copa y basal, y número de ramas) y factores ambientales (temperatura máxima, precipitación humedad relativa, altitud y velocidad del viento) presentó una correlación altamente significativa e inversamente proporcional entre la temperatura y el desarrollo de la planta, evidenciado por el menor porte de las poblaciones localizadas en sitios con temperaturas máximas promedio superiores a 36.8 °C con respecto de aquellas que se localizaron en sitios con temperaturas máximas promedio de 32.4 y 33.5 °C; por su parte el porte de las plantas y la precipitación y humedad relativa presentaron una correlación altamente significativa y directamente proporcional, reportando mayor desarrollo de las poblaciones en sitios con la mayor precipitación y humedad relativa, lo que concluye que el desarrollo de *J. curcas* es limitado por la temperatura y favorecido por la precipitación y humedad relativa (Araiza-Lizarde *et al.*, 2016).

Por su parte, en Yucatán se cuenta con trabajos sobre la valoración de diversidad mediante caracteres agronómicos, incluyendo accesiones mexicanas colectadas en Yucatán y Chiapas, así como otras procedentes de Guatemala, El Salvador, Honduras y Brasil. Estos estudios encontraron diferencias genéticas asociadas a caracteres de porte de la planta y rendimiento, señalando un bajo efecto del ambiente sobre los caracteres rendimiento de aceite y peso de semilla (Aguilera-Cauich *et al.*, 2015). Estos reportes señalan la abundancia y caracterización de la especie, pero es necesario revelar la diversidad genética de *J. curcas* para recabar mayor información sobre su domesticación y utilizar este conocimiento para consolidar el potencial agroindustrial de la especie para su cultivo extensivo.

El estudio sobre la distribución del género *Jatropha* en México realizado por Fresno-Ramírez & Orozco-Ramírez (2013), propone ocho ecorregiones, de las cuales la presencia de *J. curcas* se registra en tres de ellas, que se describen en el Cuadro 3 y su distribución y localización se representa en la Figura 2, A.

**Cuadro 3. Características de las ecorregiones propuestos para la distribución natural de *J. curcas* en México por Fresno-Ramírez y Orozco-Ramírez, basado en el estudio de diversidad y distribución del género *Jatropha***

Características	Ecorregiones con presencia de <i>J. curcas</i>		
	1	4	6
Elevación (msnm)	< 600	< 200	< 800
<b>Clima</b>			
Cálido subhúmedo	•	•	•
Semiseco muy cálido	•		
Cálido húmedo			•
Semicálido húmedo			•
<b>Suelo</b>			
Regosol	•	•	•
Litosol	•	•	•
Cambisol	•		•
Vertisol	•		
Rendisol		•	
Acrisol			•

Continuación de Cuadro 3...

Características	Ecorregiones con presencia de <i>J. curcas</i>		
	1	4	6
Áreas geográficas	Costa del Pacífico	Península de Yucatán	Golfo de México
› Vegetación	› SCSE	› SSP › SSC	› Planicie costera con SP › Lomeríos con SP  › Zona Pacífico  › Sierra de los Tuxtlas con SP › Sierra y lomeríos con SC y BE › Planicie y lomeríos costeros del Soconusco y Sierra Madre del Sur con SP, BC, BE, BM › Lomeríos planicies costeras de Nayarit SP en Jalisco

SC: Selva caducifolia; SE: Selva espinosa; SSP: Selva subperennifolia; SSC: Selva subcaducifolia; SP: Selva perennifolia; BE: Bosque de encinos; BC: Bosque de conífera; BM: Bosque mixto.

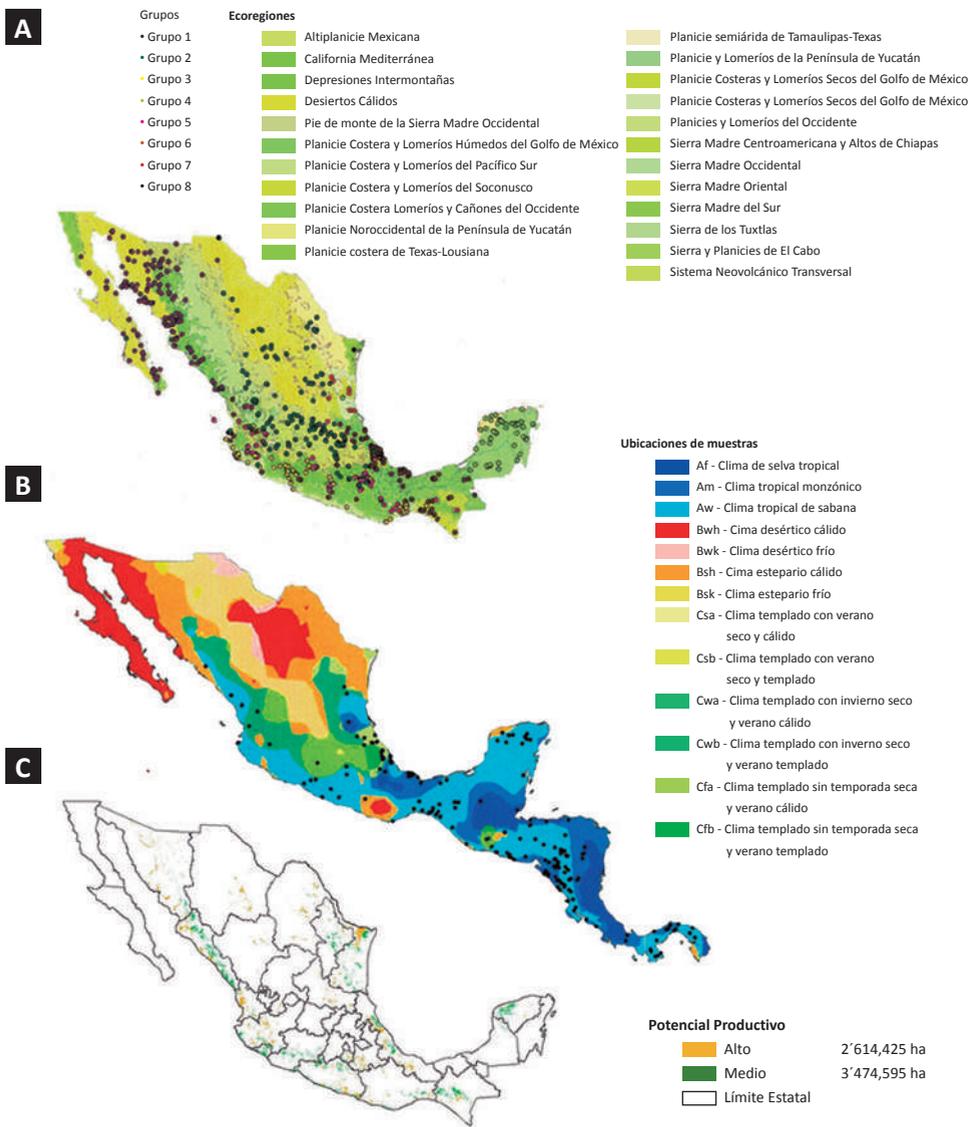


Figura 2. Ilustración de (A) Distribución del género *Jatropha* en México (Fresnedo-Ramírez & Orozco-Ramírez, 2013), (B) Distribución de *J. curcas* asociada a regiones climáticas (Maes *et al.*, 2009), y (C) Distribución del potencial productivo de *J. curcas* en el territorio nacional según el INIFAP (INIFAP, 2012).

Como resultado de la distribución de *J. curcas* en México es posible señalar que la dispersión de esta especie se da entre los 0 a 800 msnm, lo que reduce la distribución de la especie con respecto de la altitud sobre el nivel del mar ya que se ha asumido su distribución hasta los 2,200 msnm.

Un estudio sobre la distribución de *J. curcas* en México y Centroamérica con respecto del clima y las zonas geográficas de distribución natural de la especie encontró que: 84.7% de la distribución de la especie se observó en climas tropicales  $A_w$  (52.7%),  $A_m$  (27.4%), y  $A_f$  (4.6%), seguido de 12.8% en climas templados  $C_{fa}$  (6.6%),  $C_{wa}$  (3.3%),  $C_{wb}$  (2.1%), y  $C_{fd}$  (0.8%) y por último solamente 2.5% de los reportes de distribución se observaron en climas áridos y semiáridos ( $B_{sh}$ ) como se representa en la Figura 2 B; esta misma perspectiva de análisis fue aplicada a la distribución de plantaciones comerciales de *J. curcas* reportando que 50.6% fueron establecidas en climas tropicales, seguido de climas templados (29.6%) y áridos y semiáridos (19.7%) (Maes *et al.*, 2009).

Por su parte, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha señalado como área de distribución potencial para el cultivo comercial de *J. curcas* a nivel nacional, 6.08 millones de hectáreas, de las cuales 3.47 millones de ellas son señaladas con potencial medio y 2.61 millones con alto potencial (Figura 2, C), señalando en la región del Pacífico para su cultivo los estado costeros de Sinaloa a Chiapas y en la región del Golfo los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán.

Los estudios señalados anteriormente, desde su particular perspectiva, presentan superficies para el establecimiento de plantaciones comerciales de *J. curcas* en regiones similares, al presentar características edafoclimáticas favorables para el desarrollo y establecimiento de la especie; podría decirse que se tiene la fórmula para la selección de áreas para el establecimiento y desarrollo del cultivo comercial, pero esto es aún más complicado ya que el desarrollo de una industria verde o renovable debe tomar en cuenta la interacción de aspectos ecológicos, socio-culturales y económicos que permitan el “desarrollo sustentable” de la industria, ya que el mercado de biocombustibles líquidos demanda grandes volúmenes de materia prima, que se estima se incrementarán año con año, al suplir gradualmente el uso de combustibles fósiles, principalmente en el sector transporte, con productos como biodiésel y bioturbosina, en mezclas cada vez mayores.

Uno de los retos en la distribución de áreas para el cultivo de bioenergéticos debe ser expandir las fronteras del establecimiento del cultivo hacia zonas degradadas y/o sitios no aptos para agricultura y ganadería, inclusive reactivar la economía de zonas marginadas que cuenten con permisos de uso del suelo agrícola, pecuario o forestal, inclusive proyectando dentro de estas áreas el establecimiento de plantas de extracción, transformación y abastecimiento de biocombustibles, en regiones con alta demanda de biocombustibles líquidos.

El reporte de distribución natural del género *Jatropha* se asocia a la vegetación de selva baja caducifolia (Cuadro 1), en el cual se presentan ecosistemas con características edafoclimáticas no adecuados para la agricultura comercial y donde la ganadería extensiva es un recurso económico poco amigable con el ambiente, por lo que el desarrollo de cultivos energéticos podría brindar una solución económica y la explotación sustentable basada en el desarrollo de materiales genéticos adaptados a las condiciones ecológicas de esta vegetación, con diseños tecnológicos y un programa de manejo agroecológico integral podría ser la clave para el futuro agroindustrial de los biocombustibles.

## Cultivo comercial de *Jatropha curcas* en México

### La producción comercial de *Jatropha* en México

En México, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) tiene como objetivo el ejercicio de políticas nacionales para apoyar, producir, aprovechar, promover, vincular e impulsar el desarrollo y aprovechamiento integral del campo y de los mares, relacionando políticas nacionales con la actividad agropecuaria y marina a pequeña y gran escala. Después de la aprobación y entrada en vigor de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos el gobierno federal y los gobiernos estatales han realizado campañas para el establecimiento y cultivo de especies con fines energéticos. Según los registros públicos de la Sagarpa a través del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), el registro del cultivo comercial de *J. curcas* en México inició en 2009 y entre ese año y 2016 cuatro estados reportaron su cultivo (Figura 3).

En México, según reportes del SIAP, el estado de Yucatán fue el primero en adoptar el cultivo de *J. curcas* con una superficie reportada como sembrada de 416 ha en 2009. En 2013 se reportó la mayor cantidad de hectáreas sembradas de *J. curcas* en México, con un valor máximo total de 2,994.5 ha, superficie distribuida entre los estados de Yucatán, Quintana Roo y Puebla con 2,424, 341 y 229.5 ha sembradas respectivamente (Figura 3, A).

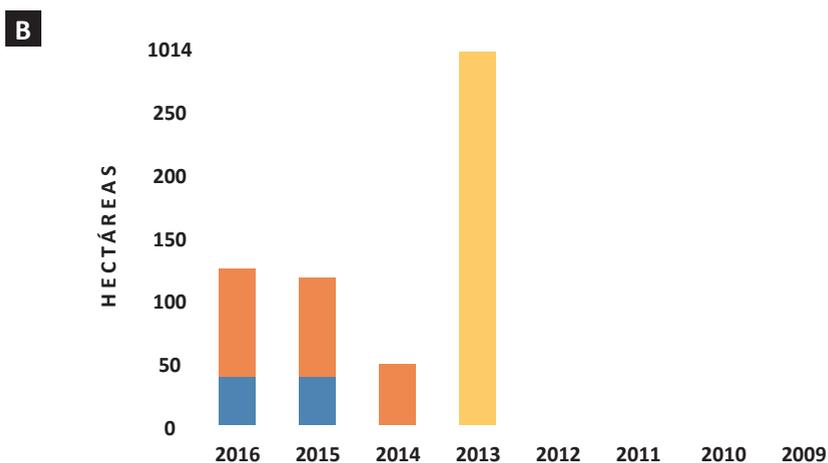
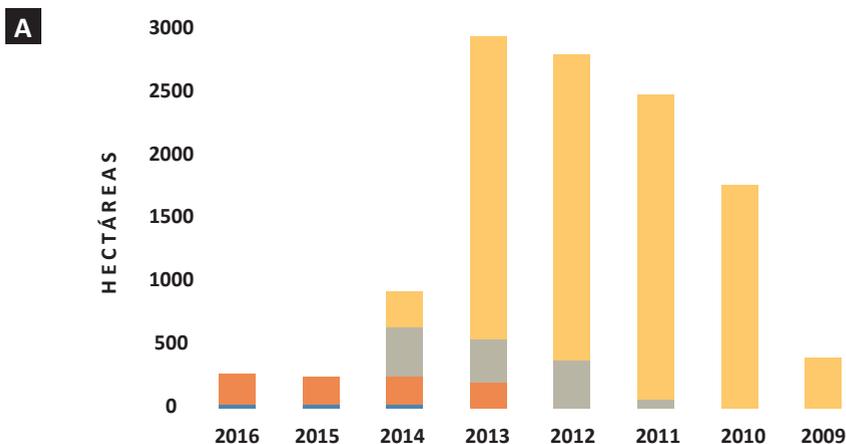
En el estado de Quintana Roo el registro de siembra de *J. curcas* inició en 2011 con 86 ha, y el último registro de superficie sembrada fue en 2014 con 400 ha; entre 2012 y 2014 el promedio de superficie sembrada fue de 375.6 ha. A partir de 2013 y hasta el 2015 el estado de Puebla reportó una superficie sembrada de 229.5 ha, presentando variación en 2016 al incrementar la superficie a 241.5 ha. Por su parte, el estado de Colima ha registrado una superficie sembrada de 40 ha entre 2014 a 2016 (Figura 3, A).

A pesar de reportes de superficies sembradas entre 2010 y 2013 de 1,800 a 2,994.5 ha respectivamente (Figura 3, A), estos valores no se reflejaron en la superficie cosechada y valores de producción, ya que los datos reportados fueron nulos entre 2009 y 2012 (Figura 3, B y C). Por lo consiguiente, la inversión realizada para el establecimiento de superficies comerciales de *J. curcas* en Yucatán y Quintana Roo no fueron recuperadas durante el período señalado.

Por otra parte, en 2013 Yucatán reportó una superficie total cosechada de 1,014 ha, con un valor de cosecha de \$6.82 millones de pesos (Figura 3, B y C) y un rendimiento promedio de 1.68 ton ha<sup>-1</sup>, lo que pudo ser un precedente positivo para el cultivo, de no haber sido el primer y último reporte de superficie cosechada en los primeros cuatro años después del establecimiento (Figura 3, B).

Con respecto de la situación del cultivo comercial de *J. curcas* en el estado de Quintana Roo, se reportó el establecimiento entre 2011 y 2014, a pesar de ello el SIAP no presentó reportes de superficie cosechada durante todo el período (Figura 3, B), lo que nos lleva a suponer que dichas plantaciones fueron abandonadas, al igual que las de Yucatán, con la diferencia de que en Quintana Roo la inversión no fue recuperada.

Según los primeros reportes del SIAP, en México las primeras inversiones para el establecimiento del cultivo de *J. curcas* entre 2009 y 2012 no presentaron el resultado esperado, al no reportar ingresos por la venta de productos cosechados, finalizando el cultivo en Yucatán y Quintana Roo como una superficie total sembrada de 2,765 ha, y una inversión fallida al abandonar el cultivo, a pesar del reporte de 2013, que señaló un valor de producción de \$6.8 millones de pesos en Yucatán.



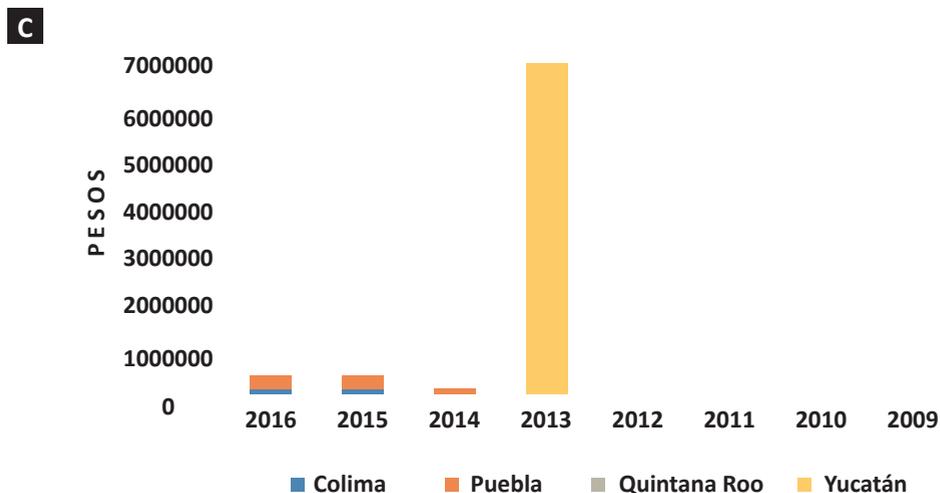


Figura 3. Registros del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Sagarpa usados para señalar: (A) Superficie sembrada, (B) Superficie cosechada, y (C) Valor de la producción de *J. curcas* en México entre 2009 y 2016.

Fuente: SIAP, <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> [27 de febrero de 2018]; Elaborado por Erick A. Aguilera-Cauchich

Por último, el estado de Colima reportó el establecimiento de 40 ha en 2014 y la misma superficie para 2015 y 2016 (Figura 3, A); para 2015 y 2016 se reportó la cosecha de 40 ha en ambos años, con valor de la producción de \$130 y \$118 mil pesos, respectivamente, y rendimientos de 0.5 y 0.7 ton ha<sup>-1</sup>. En Puebla se reportó 229.5 ha sembradas en 2014 y 2015 y 241.5 ha en 2016, y un incremento anual gradual en la superficie cosechada con valores de 50, 79 y 85.5 ha entre 2014 a 2016, respectivamente.

A partir de 2014 los reportes del cultivo de *J. curcas* dieron un ligero cambio en comparación con el período 2009-2013, Puebla y Colima establecieron plantaciones que han presentado cierta estabilidad en cosecha y valor de producción, a pesar de ello con el reporte de dos años sería adelantado realizar aseveraciones al respecto del futuro comercial de la especie en México.

Lo que es posible señalar, es un rendimiento promedio por hectárea de 0.6 toneladas para *J. curcas* entre 2015 y 2016, en general es un rendimiento bajo para

un cultivo perenne que, en comparación con otras especies oleaginosas como higuera y palma de aceite en el mismo período, evidencia y acentúa la baja competitividad del cultivo. Como ejemplo, datos del SIAP sobre el cultivo de higuera y palma de aceite en 2016 señalan un rendimiento promedio de 1.6 y 12 ton ha<sup>-1</sup> respectivamente. Por otra parte, las perspectivas para el cultivo de *Jatropha* no son desalentadoras del todo ya que parte de la producción de aceite de estos cultivos (higuera y palma de aceite) cuentan ya con un mercado para su producto y éste se vincula directamente con el uso humano.

El potencial del cultivo de *Jatropha* presenta una alternativa viable para un nuevo nicho de mercado, aceites como materia prima para biocombustibles o uso industrial que no compite con el de uso humano, mercado que cada vez está más cerca de consolidarse en México.

Estos datos señalan una oportunidad para el cultivo de *Jatropha* en México y como áreas de oportunidad están: el mejoramiento genético para ofertar variedades o híbridos, que se adapten a las condiciones edafoclimáticas de las regiones señaladas como promisorias para su cultivo; el desarrollo de paquetes tecnológicos capaces de incrementar el rendimiento y rentabilidad del cultivo sin sacrificar la sustentabilidad (cultural, socioeconómica y ambiental); el desarrollo de tecnología asociada a la producción agrícola, la extracción de aceite y su transformación, y el uso integral de subproductos procedentes del área agrícola, la extracción de aceite y la industrialización de productos y subproductos creando y abasteciendo nuevas cadenas de valor.

## Reportes del cultivo comercial de *Jatropha* en México

A pesar de que el cultivo de *J. curcas* se reporta en México desde 2009, son pocos los estudios de carácter científico que presentan de manera integral el establecimiento comercial de esta especie con fines energéticos dentro del territorio nacional al abordar temas relacionados con su impacto social, económico y ambiental permitiendo un análisis del cultivo en México.

Hinojosa y Skutsch (2011) reportan el caso de Michoacán donde en 2007 inició el cultivo comercial de *J. curcas* con participación de capital privada y recursos pú-

blicos del gobierno estatal, con ello se instaló una planta productora de biodiésel entre las empresas Pro Palma y Daimler Chrysler, con una capacidad de generar 9 millones de litros al año. En 2008, se promovió el cultivo con participación del programa ProÁrbol de la Conafor (Comisión Nacional Forestal) y una planta procesadora de biodiésel en cooperación con la empresa Jatro Biofuels con una inversión de 200 millones de dólares. Al momento de la publicación de la investigación, los autores señalan que no hay datos sobre la producción de semilla o aceite y de la operación de las plantas productoras de biodiésel. Como resultado se realizó una reconversión de zonas agrícolas, desde unidades de riego hasta parcelas de temporal con agricultura de subsistencia, donde se dejó de cultivar limón (4 ha), sorgo y maíz con la promesa de compra de la producción de semilla pelada de *J. curcas* a precios de hasta 25 pesos por kg, lo que no sucedió y llevó a la pérdida de aproximadamente de 25 toneladas de productos, lo que representa una pérdida de entre 28 y 150 mil pesos por temporada; ante estas pérdidas se describen como alternativa de los productores la venta de sus terrenos, el incremento de deforestación para recuperar las superficies perdidas y abandonar el cultivo para iniciar otros nuevos.

Según los antecedentes presentados relacionados con la distribución natural de *J. curcas*, su asociación a regiones ecogeográficas y climáticas, hay una baja presencia de la especie en Michoacán y la Sagarpa marca espacios limitados para su cultivo, a pesar de que son señalados como alto potencial, los cuales debieron estar asociados a áreas destinadas para la agricultura, lo que se evidencia en el párrafo anterior por la pérdida de cultivos asociados a la alimentación, llevando a una conversión del área agrícola con un cultivo y cadena de valor fundamentada en estudios teóricos sin fundamentos científicos que, al eliminar áreas productivas destinadas a la alimentación humana, eliminaron el sentido de desarrollo sustentable asociado a la producción de biocombustibles, la reconversión de superficies debe centrarse en recuperar tierras degradadas o abandonadas, que propicien su recuperación en el mediano plazo y permitan incorporar en policultivo especies anuales con valor alimenticio; una opción adicional sería el uso de variedades adaptadas a las condiciones específicas de las regiones de interés.

Para el estado de Yucatán, Rucoba García *et al.* (2013) reportaron el análisis del impacto social, ambiental y económico del establecimiento de *Jatropha* en un sistema de monocultivo. Como resultado, se estimó un alto beneficio social

a corto plazo, por la generación de empleos y alta remuneración del sistema de producción, pero al mediano y largo plazos los beneficios serán medianos o bajos, ya que la sobreexplotación asociada al monocultivo se vería reflejada en el desgaste del suelo y el consecuente incremento de la demanda de insumos, provocando la reducción del ingreso a causa de la disminución de la rentabilidad. Se estimó un beneficio ambiental medio a largo plazo en un sistema de monocultivo debido al aprovechamiento limitado de los recursos y mejoría o conservación del agroecosistema, un impacto alto se observa a corto plazo en suelos degradados y sin cobertura, al proteger el suelo de la erosión eólica e hídrica, contribuir a los procesos biológicos y fisicoquímicos al propiciar la infiltración y retención de agua, e incrementar el contenido de materia orgánica en la capa superficial; por último, se determinó un impacto económico con alto beneficio económico al corto plazo ya que en el mediano y largo plazos al reflejarse el impacto ambiental los costos de producción se elevarán disminuyendo la rentabilidad.

Los resultados de este estudio señalan que los beneficios sociales, ambientales y económicos del cultivo de *Jatropha* son a corto y mediano plazos en un sistema de producción en monocultivo, si este sistema de producción se plantea con una vida útil de 23 años (SENER *et al.*, 2006) y se proyecta el establecimiento potencial de 6 millones de hectáreas a nivel nacional (Figura 2), en menos de 10 años se tendría el colapso de una industria que, de presentar bases sólidas para el aprovechamiento racional de suelo, agua y todos los elementos fisicoquímicos y biológicos asociados la planta y no sólo a su aceite y endospermo, que en proporción representa menos del 20% de la biomasa total, consolidando las bases que permitan su incursión en industrias asociadas a la producción de energía, fármacos, polímeros, pesticidas, etc., con ello diversificando el mercado y consolidando su permanencia más allá de producir bioenergía.

Uno de los estados con mayor cantidad de análisis sobre el proyecto de introducción del cultivo de *J. curcas* en México es Chiapas. Huerta *et al.* (2010) presentan el resultado de evaluar la viabilidad del proyecto de biodiésel a base de *Jatropha*, desde el cultivo hasta su industrialización, determinando la rentabilidad y su utilización como modelo energético. La evaluación del cultivo de *Jatropha* se basó en un rendimiento por hectárea de semilla, para

los primeros cinco años, de 0.3, 1, 3, 4, y 5 toneladas para cada año, respectivamente, en plantaciones con una vida útil de 30 años, con ello los autores señalaron para la evaluación financiera del cultivo que: la utilidad neta sería de \$108,291 pesos; de la relación beneficio-costos por cada peso invertido se obtendrán 63 centavos de beneficio; la relación beneficio-inversión neta indicó que por cada peso invertido se obtendrá un beneficio neto total de 4.57 pesos; la rentabilidad promedio se estimó en 38% aproximadamente. Una TIR (Tasa Interna de Retorno) de 38.79% en el escenario base y de 28.52% en el escenario de disminuir el precio del producto en 15%, lo que en conjunto indicó que el cultivo sería rentable.

Para la evaluación financiera de la planta de extracción de aceite se tomaron los siguientes supuestos: una vida útil de 15 años; con un ingreso de \$487,720,000 de pesos por la venta de aceite y los desechos como abono orgánico durante los 15 años de vida útil; una inversión inicial de \$51,355,290 pesos por maquinaria y adecuación del terreno (a fondo perdido); el precio de aceite a \$13 pesos por kilogramo, y una tasa de actualización del 12%. Se determinó que: se debería obtener una utilidad neta de \$37,668,922 pesos; la relación beneficio-costos espera que por cada peso invertido se obtendrán 16 centavos de beneficio; la relación-beneficio inversión neta indicó que por cada peso invertido se obtendrá un beneficio neto total de 3.81 pesos; la rentabilidad promedio del proyecto sería del 49% aproximadamente; la TIR en situación base fue de 49.44% y con un decremento del valor del producto alcanzaría un valor de 10.46%, resultando sensible a la disminución del precio de venta.

La evaluación de la planta productora de biodiésel se realizó con los siguientes fundamentos: vida útil de la planta de 15 años; el ingreso total por la venta de biodiésel durante este período sería de \$2'492,830,575.00 (sin incluir la venta de glicerina); una inversión inicial de \$104,637,783.48 pesos por adquisición de la maquinaria y acondicionamiento del terreno, a fondo perdido; un precio por litro de biodiésel de \$23.50 pesos, y \$6 pesos el kg de glicerina. Se reportó sobre la rentabilidad que: se estimó una utilidad neta de \$47,712,809.41 pesos; la relación beneficio-costos baja señaló que por cada peso invertido se obtendrán \$4 centavos de beneficio; la relación beneficio-inversión neta indicó que por cada peso invertido se obtendrá un beneficio neto total de \$1.51 pesos; la rentabilidad promedio del proyecto sería de 19% apro-

ximadamente; se reportó una TIR de 19.26%; la TIR con una disminución del precio del producto de 15% presentó un valor de 4.71%, condicionando el proyecto a esta variable.

Se concluyó que habría rentabilidad para el proyecto global con ciertas restricciones en la extracción de aceite y transformación. A pesar de los resultados y conclusiones presentadas, la base del análisis presentó un panorama demasiado optimista, señalando rendimiento de semilla de hasta 5 ton ha<sup>-1</sup> y precio del aceite y biodiésel de \$13 y \$23.50 pesos respectivamente, en un México donde, en retrospectiva, se sentaban las bases para la inclusión de energías renovables y la transición energética, pero ahora, a cinco años de haberse aprobado la reforma energética, que permite la liberación del precio de los combustibles, la participación de particulares en la venta e importación de combustibles líquidos, el valor promedio del diésel fósil en \$17.93 pesos (los primeros 60 días de 2018), y la demanda nacional e internacional de biocombustibles; siendo así que las proyecciones financieras y análisis de factibilidad económica requieran un marco de evaluación actualizado, tanto en los aspectos antes mencionados, como en el desempeño agrícola y potencial industrial de las especies energéticas señaladas como potenciales, brindando la oportunidad, en el caso de *J. curcas*, no sólo de producir aceite, glicerina y biodiésel, sino de incluir productos en mercados emergentes como el de biomoléculas para industrias como la farmacéutica, de cosméticos, pesticidas y polímeros, los cuales por su valor agregado podrían ser los productos principales.

Por su parte, Valero *et al.* (2011) analizaron la aceptación del proyecto de biocombustibles en Chiapas, México, desde la perspectiva rural (productores) posterior al primer año de establecimiento. Como resultado, los productores que aceptaron participar en el proyecto, señalaron que esto se debió a: la rentabilidad de la propuesta por el monto de ingreso prometido (34.8%); la presencia del subsidio de \$6,300.00 pesos por hectárea (18.8%); el precio de la *Jatropha* sobre el del maíz (10.1%); la alternativa de trabajo a largo plazo (10.1%); la percepción de seguridad al contar con un mercado del producto asegurado (7.2%); los argumentos restantes apuntaron a diversos aspectos positivos. Por otro lado, los productores que rechazaron participar en el proyecto argumentaron: poseer poco terreno y éste ser utilizado para cultivo de autoconsumo (22.4%); no encontrarse en el ejido durante la inscripción al

proyecto (20.4%); su actividad principal es la ganadería o renta de pastura (14.3%); la producción que permite la rentabilidad del cultivo es hasta el tercer o cuarto año (10.2%); la responsabilidad y compromiso que implicaba la participación en el proyecto (8.2%); los argumentos restantes apuntaron a diversos aspectos negativos.

Al cabo del primer año de establecimiento del cultivo, la percepción en favor del proyecto fue la siguiente: 60% de los participantes señalaron al menos un punto positivo del proyecto, 24% no realizó declaraciones en favor o en contra por ser un período de prueba; 12% no señaló ningún aspecto positivo y sólo 4.4% señaló que todo el proyecto era positivo. Sobre la percepción negativa del proyecto, en el mismo período se evidenció lo siguiente: 58% indicó al menos un factor negativo que le causa preocupación y decepción hacia el proyecto; 20% se halló totalmente inconforme con el proyecto; 20% no señaló inconformidad alguna; 2% no emitió un juicio porque el proyecto aún está a prueba. Los resultados señalan mayor descontento hacia el proyecto (20%) que aceptación (4.4%).

Sobre el desarrollo de las plantaciones, de las 29 parcelas visitadas ocho reportaron una germinación mayor de 81% y de ellas sólo cinco registraron plantas con alturas mayores a 80 cm; el resto de las parcelas mostraron un desarrollo poco satisfactorio, 15 tuvieron un porcentaje de germinación entre 0 y 40% y las plantas presentaron alturas menores a los 60 cm. Los productores señalaron que las razones de estos resultados fueron la mala calidad de la semilla, el retraso en la entrega de semilla que propició una siembra extemporánea, información insuficiente sobre el manejo de la plantación y la cadena de producción, personal técnico insuficiente y poco capacitado en la identificación y manejo de plagas y enfermedades; además, se identificó mala organización institucional, falta de planeación en todos los niveles y el uso de germoplasma procedente de la India, el cual evidenció su mala calidad en campo.

Soto *et al.* (2018) abordaron el tema con una estrategia análoga a la anterior para el análisis del cultivo de *Jatropha* en el estado de Chiapas, entrevistando a productores y recabando su percepción sobre el proyecto; llegaron a resultados similares, los productores deciden adoptar un cultivo nuevo, en el cual no tenían experiencia, por las promesas de la rentabilidad y la

aportación de subsidios durante los primeros años del cultivo. Durante el proceso de establecimiento y desarrollo del primer ciclo de cultivo, como resultado del incumplimiento de pagos y la falta de organización institucional llevó a modificar la percepción de los productores, quienes comenzaron a dudar sobre la rentabilidad comercial y como efecto de su continuidad en el proyecto.

Los resultados anteriores evidencian no la incapacidad de una especie para ser utilizada como cultivo energético o la nula factibilidad de los cultivos energéticos en México, sino que evidencian la falta de conocimiento científico y técnico sobre una especie semidomesticada, sobre su biología, fisiología y el comportamiento agronómico de ésta al ser sometida a un manejo extensivo en monocultivo, la falta de estudios en economía y administración sobre la especie y una nueva cadena de valor que fundamenten y promuevan el desarrollo e innovación de especies mejoradas, estrategias de cultivo, tecnificación de la producción, cosecha, extracción, transformación, almacenamiento y distribución de productos y subproductos.

Valdés *et al.* (2014) analizaron los esquemas de soporte técnico y financiero de los primeros proyectos de cultivo de *Jatropha* señalando que en Chiapas, Michoacán, Yucatán y Quintana Roo el apoyo financiero programado para estos proyectos, desde su establecimiento hasta alcanzar su rentabilidad, fue insuficiente; la misma situación se presentó con la asesoría técnica, ya que al inicio de estos proyectos no se tenían precedentes ni estudios técnicos al respecto, provocando que eventos inesperados se tradujeran en pérdidas económicas y de viabilidad de los proyectos. Para aminorar estas situaciones se deben considerar períodos más largos de apoyo económico y técnico. El caso de Veracruz fue diferente, los pequeños productores rechazaron la semilla importada y utilizaron la semilla autóctona y el conocimiento tradicional sobre su cultivo, ya que la variedad de *Jatropha* no-tóxica se cultiva de manera tradicional en este estado, lo que permitió establecer, cosechar y vender semilla. Quizá los resultados sobre el rendimiento no se reportan por ser cultivos a pequeña escala.

El análisis realizado a los esquemas agrícolas y sus consecuencias ecológicas señalaron que todas las plantaciones se han establecido en esquemas de mo-

nocultivo en tierras agrícolas, sustituyendo el cultivo de maíz y frijol, o se han deforestado áreas para su establecimiento, lo que no ha permitido obtener datos sobre los beneficios ecológicos relacionados con la recuperación de suelos marginales, además de que la introducción de germoplasma sin control ha traído plagas y enfermedades no reportadas para México.

Los reportes anteriores evidencian la necesidad de generar planes y estrategias a nivel nacional y regional adaptados a los requerimientos particulares, con material genético certificado, programas validados e infraestructura, que incluya capital humano especializado, lo que puede resumirse en, mayor participación científico técnica en cooperación con el productor.

## Conclusiones y perspectivas

México cuenta con el acervo genético de *J. curcas*, evidenciado por su amplia distribución en los ecosistemas de México en dos centros de dispersión, la domesticación de la especie representada por variedades no-tóxicas (libres o con bajo contenido de éster de forbol) y su determinación como centro de origen y dispersión; además de esto, en México se reporta alto endemismo del género.

Estudios relacionados con la distribución natural de la especie han determinado las características edafoclimáticas para el establecimiento de la especie con fines comerciales, señalando regiones con potencial alto y medio para su cultivo dentro del territorio nacional; la superficie de cultivo asociada al establecimiento comercial de *Jatropha* podría ser ampliada, al desarrollar materiales genéticos especializados por región que, por su adaptación, permitieran aprovechar zonas con bajo potencial agropecuario, esto al aprovechar la diversidad genética del género mediante el mejoramiento genético por hibridación interespecífica u otra técnica de recombinación genética, al combinar el rendimiento y calidad de aceite de *J. curcas* con la capacidad de adaptación de una especie endémica del género en una región determinada que, si bien el rendimiento no fuera incrementado sustancialmente, las ganancias económicas se verían reflejadas en la disminución de la inversión por establecimiento y mantenimiento del cultivo y en la mayor cantidad de

superficie aprovechable para el mismo fuera de áreas con potencial productivo. Aunque el desarrollo e implementación de esta propuesta es a mediano y largo plazos, hay que tomar en cuenta que la conversión hacia la no dependencia del petróleo y sus derivados (de los cuales está inundado el mercado de productos y servicios), está cada vez más cerca y es un nicho de oportunidad que no sólo abre la posibilidad de combustibles alternativos sino toda una amplia gama de necesidades de bioproductos.

A pesar de que todos los proyectos para el establecimiento comercial de *Jatropha* en México han sido abandonados por falta de viabilidad económica y financiera, los resultados evidencian que en su momento la falta de conocimiento fue sustituida por supuestos y especulaciones sobre el rendimiento, comportamiento y manejo de la especie en condiciones de monocultivo, lo que llevó a proyecciones financieras y programas operativos a no reflejar la realidad de los requerimientos en ambos sentidos. Ahora, a casi 10 años del primer intento de establecer plantaciones comerciales de *Jatropha* en México, el cultivo cuenta con el respaldo de instituciones, especialistas, conocimiento con base científica, desarrollo tecnológico y la historia de proyectos anteriores, que nos dan las bases para resarcir, mejorar e innovar, brindando un panorama interdisciplinario para revertir los resultados y proyectar el establecimiento de *J. curcas* como cultivo multipropósito con base agroindustrial.

## Bibliografía citada

- Achten, W.M.J., Verchot, L., Franken, Y.J., Mathijs, E., Singh, V.P., Aerts, R. & Muys, B. 2008. “*Jatropha* bio-diesel production and use”. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1063–1084.
- Aguilera-Cauch, E.A., Pérez-Brito, D., Navarrete Yabur, A., López-Puc, G., Castañón Nájera, G., Sacramento Rivero, J.C., Mijangos-Cortés, J.O. 2015. “Assessment of phenotypic diversity and agronomic contrast in American accessions of *Jatropha curcas* L.” *Industrial Crops and Products*, 77, 1001–1003.
- Araiza-Lizarde, N., Alcaraz-Meléndez, L., Angulo-Escalante, M.Á., Reynoso-Granados, T., Cruz-Hernández, P., Ortega-Nieblas, M. & Valdez-Zamudio, D. 2016. “Caracterización y distribución de germoplasma silvestre de *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) en el noroeste de México”. *Polibotánica*, 42, 137–152.
- Belayneh, A. & Bussa, N.F. 2014. “Ethnomedicinal plants used to treat human ailments in the prehistoric place of Harla and Dengego valleys, eastern Ethiopia”. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(18), 1-17.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 2008. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos (*Diario Oficial de la Federación*). México. Retrieved from <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- Cortés Marín, E., Suárez Mahecha, H. & Pardo Carrasco, S. 2009. “Biocombustibles y auto-suficiencia energética”. *Dyna*, 76(158), 101–110.
- FAO. 2008. *El estado mundial de la agricultura y la alimentación*. FAO, Ed. Roma, Italia.
- Fresnedo-Ramírez, J. & Orozco-Ramírez, Q. 2013. “Diversity and distribution of genus *Jatropha* in Mexico”. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 60(3), 1087–1104.
- Gómez-Pompa, A., Krömer, T. & Castro-Cortés, R. 2010. *Atlas de la flora de Veracruz: Un patrimonio natural en peligro*. Aries-Leal, I. Ed. México.
- Heller, J. 1996. *Physic nut. Jatropha curcas* L. *Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*. 1. IPGRI, Ed. Rome.
- Hinojosa Flores, I.D. & Skutsch, M. 2011. “Impacto de establecer *Jatropha curcas* para producir biodiésel en tres comunidades de Michoacán, México, abordado a partir de diferentes escalas”. *Revista Geográfica de América Central, Especial*, 1-15.

- Huerta Reza, D., Garza Bueno, L.E., Vega Valdivia, D.D., Omaña Silvestre, J.M. 2010. "Biodiesel production in the state of Chiapas". *Rev. Mex. de Ec. Agríc. y de los Rec. Nat.*, 3(2), 77–96.
- INIFAP. 2012. *Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México*. INIFAP, Ed., *Televisión educativa. Gob. Mx* (Especial N). Xalapa, Veracruz.
- Jiménez R., J. 1995. "Dos especies nuevas de la sección Loureira Muell. Arg. del género *Jatropha* (Euphorbiaceae)". *Acta Botánica Mexicana*, 30, 1-8.
- Kabir, M.H., Hasan, N., Rahman, M.M., Rahman, M.A., Khan, J.A., Hoque, N.T., Rahmatullah, M. 2014. "A survey of medicinal plants used by the Deb barma clan of the Tripura tribe of Moulvibazar district, Bangladesh". *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1), 1–28.
- Kumar, A. & Sharma, S. 2008. "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review". *Industrial Crops and Products*, 28(1), 1–10.
- Li, H., Tsuchimoto, S., Harada, K., Yamasaki, M., Sakai, H., Wada, N., Fukui, K. 2017. "Genetic Tracing of *Jatropha curcas* L. from Its Mesoamerican Origin to the World". *Frontiers in Plant Science*, 8(September), 1–11.
- Maes, W.H., Trabucco, A., Achten, W.M.J., Muys, B. 2009. "Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L.". *Biomass and Bioenergy*, 33(10), 1481–1485.
- Maghuly, F., Jankowicz-Cieslak, J., Pabinger, S., Till, B.J., Laimer, M. 2015. "Geographic origin is not supported by the genetic variability found in a large living collection of *Jatropha curcas* with accessions from three continents". *Biotechnology Journal*, 10(4), 536–551.
- Martínez-Gordillo, M. & Morrone, J.J. 2005. "Patrones de endemismo y distribución de los géneros de Euphorbiaceae *sensu lato*: un análisis panbiogeográfico". *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana*, 77, 21–33.
- Martínez-Gordillo, M., Ramírez Jiménez, J., Cruz Durán, R., Juárez Arriaga, E., García, R., Cervantes, A., Mejía Hernández, R. 2002. "Los géneros de la familia Euphorbiaceae en México". *Anales del Instituto de Biología*, 73(2), 155–281.
- Martínez, M. 1979. *Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas*. Fondo de Cultura Económica, Ed. México.
- Pecina-Quintero, V., Anaya-López, J.L., Colmenero, A.Z., García, N.M., Núñez Colín, C.A., Solís Bonilla, J.L., Mejía Bustamante, D.J. 2011. "Molecular characterisation of *Jatropha curcas* L. genetic resources from Chiapas, Mexico through AFLP markers". *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1897–1905.

- Pecina-Quintero, V., Anaya-López, J.L., Zamarripa-Colmenero, A., Núñez-Colín, C.A., Montes-García, N., Solís-Bonilla, J.L., Jiménez-Becerril, M.F. 2014. "Genetic structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and probable centre of origin". *Biomass and Bioenergy*, 60, 147–155.
- Rucoba García, A., Munguía Gil, A. & Sarmiento Franco, F. 2013. "Entre la *Jatropha* y la pobreza: Reflexiones sobre la producción de agrocombustibles en tierras de temporal en Yucatán". *Estudios Sociales*, 21(41), 115–141.
- SENER, BID & GTZ. 2006. *Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiésel para el transporte en México*. SENER, Ed. México.
- Soto, I., Ellison, C., Kenis, M., Diaz, B., Muys, B., Mathijs, E. 2018. "Why do farmers abandon *Jatropha* cultivation? The case of Chiapas, Mexico". *Energy for Sustainable Development*, 42, 77–86.
- Steimann, V.W. 2002. *Diversidad y endemismo de la familia Euphorbiaceae en México*, 61, 61–93.
- Valdés Rodríguez, O.A., Pérez Vázquez, A. & Muñoz Gamboa, C. 2014. "Drivers and consequences of the first *Jatropha curcas* plantations in Mexico". *Sustainability (Switzerland)*, 6(6), 3732–3746.
- Valero Padilla, J., Cortina Villar, H.S., Vela Coiffer, M.P. 2011. "El proyecto de biocombustibles en Chiapas: experiencias de los productores de piñón (*Jatropha curcas*) en el marco de la crisis rural". *Estudios Sociales*, 19(38), 120–144.
- Webster, G.L. 1994. "Synopsis of the Genera and Suprageneric Taxa of Euphorbiaceae". *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 81(1), 33–144.
- Zavala del Ángel, I., García-Pérez, E., González-Hernández, D., Pérez-Vázquez, A., Ávila Reséndiz, C. 2016. "Genetic Diversity of *Jatropha curcas* L. in Veracruz State, Mexico, and its Relationships with the Content of Phorbol Esters". *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science*, 5(5), 149–158.

## Documentos impresos y en línea

- Sagarpa. 2009. Programa de Producción Sustentabilidad de Insumos para Bionergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa).

### La diversidad en *Jatropha curcas* L. y el papel de México en su nueva oportunidad agroindustrial

Erick A. Aguilera-Cauich<sup>1\*</sup>, Guadalupe López Puc<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C., calle 43 Núm. 130 x 32 y 34, Col. Chuburná de Hidalgo, CP 97205 Mérida, Yucatán, México.

<sup>2</sup> Biotecnología vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A. C., Sede Sureste. Tablaje Catastral 34338, km 5.5 carretera Sierra Papacal -Chuburná Puerto, Yucatán, México.

\*Autor por correspondencia: e.a.cauich@gmail.com

#### Resumen

*Jatropha curcas* es un arbusto ampliamente distribuido en la región tropical del planeta que, a raíz del uso de su aceite como base para la elaboración de biocombustibles líquidos, ha tomado valor comercial como especie oleaginosa. Mediante estudios realizados con marcadores moleculares como SSR, RAPD, ALFP e ISSR se reportó la diversidad de *J. curcas* en el continente Asiático (China, India, Indonesia y Tailandia) y Americano (México y Brasil); la mayor diversidad genética se reportó en América, específicamente en México y en Brasil; en Asia la diversidad fue media y baja. En México la diversidad y la base genética son amplias, señalando los estados de Chiapas y Veracruz como zonas de diversificación para la especie, proponiendo a Chiapas como el centro de origen. Se menciona gran variedad de moléculas biológicas presentes en diferentes órganos de *J.*

*curcas*, a las cuales se les atribuyen actividades como bactericidas, fungicidas y antiespasmódicos, entre otros; el éster de forbol es uno de los compuestos más conocidos relacionado a esta especie, el cual confiere toxicidad y limita el uso de la almendra como fuente de proteína que, además puede ser utilizado como descriptor biológico ya que se reporta diversidad entre la concentración de esta molécula e incluso permite diferenciar genotipos tóxicos y no tóxicos; en América, específicamente en México, se encuentra la única región geográfica en la que se reporta la presencia de genotipos no tóxicos e inclusive libres de éster de forbol, los cuales se vinculan al proceso de domesticación llevado a cabo por culturas prehispánicas.

## Palabras clave

Diversidad genética, marcadores moleculares, *Jatropha curcas* no tóxica, recursos bióticos, denominación de origen

## Introducción

*Jatropha curcas* es un arbusto o árbol caducifolio y monoico, de 1-5 m de alto, de corteza color gris o rojiza, con escamas delgadas de color verde ceniciento, perteneciente a la familia Euphorbiaceae (Gómez-Pompa *et al.*, 2010), de extensa distribución en México, América Latina y en regiones tropicales y subtropicales del planeta (Heller, 1996), que años atrás se ha catalogado como una especie oleaginosa de importancia económica, esto a partir de la búsqueda de energías líquidas que permitan la transición energética de combustibles fósiles a renovables, figurando esta especie como materia prima potencial para biocombustibles (Koh *et al.*, 2011; Pandey *et al.*, 2012); su valor reside en el aceite de sus semillas y en el biodiésel resultante de su transformación ya que éste puede ser utilizado directamente en motores diésel (Kumar

& Sharma, 2008), además ayuda en la mitigación de la contaminación y se presenta la posibilidad del uso industrial de los subproductos (Gübitz *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2011; Nithiyantham *et al.*, 2012).

Los cultivos como *Jatropha curcas* requieren ser estudiados para realizar mejoramiento genético. De ahí la importancia de realizar la caracterización morfológica, ya que es un método eficaz para medir diversidad en especies y cultivos de interés comercial (Alercia, 2011; Bioversity-International, 2007). En *J. curcas* se han reportado estudios de este tipo en India, Malasia, Cuba, Colombia y México, señalando una diversidad moderada, asociadas principalmente a caracteres vegetativos que describen el porte de la planta y su estructura de ramificación, así como diversidad en caracteres directamente relacionados con la productividad como el rendimiento de semilla y contenido de aceite (Guerrero *et al.*, 2011; Kaushik *et al.*, 2007; Machado, 2011; Shabanimofrad *et al.*, 2013; Wani, Kitchlu, Ram, 2012), al menos el estudio realizado en México refiere ligero efecto del ambiente sobre caracteres morfológicos vegetativos y reproductivos, incluso asociados a rendimiento como contenido de aceite y producción de frutos (Aguilera-Cauich *et al.*, 2015). En India ya se han propuesto descriptores morfológicos para la especie con la finalidad de estandarizar este tipo de estudios.

El uso de ADN en estudios de diversidad genética y mejoramiento genético se ha vuelto habitual (Spooner *et al.*, 2005), las técnicas basadas en la PCR son una herramienta que permite generar perfiles genéticos (huella genética), diferenciar entre individuos, determinar niveles de polimorfismo, identificar y discriminar entre individuos, revelar relaciones genéticas (Burr *et al.*, 1997), comparar individuos con su progenie en la búsqueda de diferencias en el ADN, realizar estudios de diversidad genética entre y dentro de poblaciones e inferir relaciones filogenéticas entre individuos silvestres y cultivados (Kamalesh *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2011; Mahar *et al.*, 2011; Narzary *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2001).

Este estudio tiene como objetivo presentar una perspectiva sobre la diversidad en *J. curcas* con un enfoque molecular para revelar la base genética asociada a las regiones reportadas como áreas de distribución de la especie y señalar el uso potencial de esta diversidad con fines agroindustriales.

## *J. curcas*, revisión de su diversidad genética en Asia y América

### La diversidad de *J. curcas* en China

Uno de los primeros reportes sobre la diversidad de *J. curcas* en China fue el realizado por Sun *et al.*, 2008; en él se caracterizó la diversidad genética mediante 30 microsatélites o SSR (Secuencia Simple Repetida) y 7 ALFP (Polimorfismo en la Longitud de Fragmentos Amplificados), incluyendo 56 accesiones de *J. curcas*, distribuidas en cinco regiones: Guangxi (3), Yunnan (4), Sichuan (1), Hainan (20), Guizhou (28), así como 2 accesiones introducidas de Malasia. Los ALFP reportaron un total de 488 bandas, 70 (14.34%) de ellas polimórficas, con un PIC (Contenido de Información Polimórfica) promedio de 0.983; por su parte, de 30 SSR, sólo 17 amplificaron y solamente uno de ellos reveló polimorfismo, exclusivamente en las accesiones introducidas de Malasia. Los SSR revelaron una base genética inexistente. Usando ALFP se generó un dendograma UPGMA mediante el coeficiente de Jaccard, en él se observó un rango de similitud entre 0.94-1.00. Como resultado es posible señalar la presencia de una base genética limitada entre las accesiones evaluadas.

Cai *et al.*, en 2010, reportaron el análisis de diversidad entre poblaciones para la selección de una colección núcleo de *J. curcas*; se utilizó un total de 229 accesiones distribuidas en seis localidades de China: Guangxi (33), Yunnan (15), Sichuan (12), Hainan (132), Guangdong (9) y Guizhou (28); y 5 accesiones de Birmania (Figura 1). Para ello fueron utilizados 100 iniciadores ISSR (Inter Secuencias Simples Repetidas). 15 ISSR señalaron polimorfismo, revelando un total 169 loci, 127 (75.15%) polimórficos. Se reportó una distancia genética (Nei) entre 0.023-13.256. El análisis de agrupamiento señaló 13 grupos, asociados con la procedencia geográfica, un grupo presentó 72.8% de las accesiones totales, las restantes se distribuyeron en los otros 12 grupos formando conglomerados pequeños de entre 1-18 accesiones. El AMOVA (Análisis Molecular de Varianza) señaló gran variación genética dentro de grupos (87.26%) y baja varianza entre grupos geográficos (12.74%). En conjunto, se apreció nuevamente una relativa baja base genética entre las localidades geográficas pero alelos de interés para su conservación dentro de las poblaciones evaluadas.

Wen *et al.* (2010), reportaron el análisis de la diversidad genética de una colección de 45 accesiones de *J. curcas* distribuidas en cinco poblaciones procedentes de: Indonesia (9), Granada (9), Sudamérica (9), Yunnan, China (9) y Hainan, China (9); para ello se probaron 419 (EST)-SSR (SSR-Etiquetado de Secuencia Expresada) y 182 (G)-SSR (SSR-Genómicos).

En total, 187 (EST)-SSR y 68 (G)-SSR revelaron polimorfismo, pero sólo 36 y 20 SSR, respectivamente, fueron utilizados; se identificaron un total de 216 alelos, 183 (84.72%) polimórficos. El dendograma UPGMA reportó un rango de similitud con el coeficiente de Jaccard entre 0.55-0.92, separando las 45 accesiones en seis grupos; las accesiones procedentes de Sudamérica se distribuyeron en todos los grupos excepto el 3, éste fue conformado únicamente por accesiones procedentes de Hainan, China, el resto de estas accesiones de Hainan se distribuyeron en los grupos 5 y 6. Las accesiones de Yunnan, China, se observaron en los grupos 2, 4, 6; el grupo 1 no presentó accesiones procedentes de China, sólo de Indonesia y Sudamérica. Se reportó una amplia base genética entre las accesiones evaluadas, observando mayor diversidad entre grupos que dentro de ellos.

Los reportes citados señalan una amplia dispersión en *J. curcas* en la región sur de China, a pesar de esto la evidencia señala una reducida base genética.

### Reporte de la diversidad genética en Indonesia

En Indonesia Maftuchah *et al.* (2011) estudiaron el parentesco entre 13 accesiones de *J. curcas* pertenecientes a las provincias de Asembagus - Situbondo mediante RAPD.

Diez iniciadores RAPD fueron utilizados y se reveló polimorfismo en nueve de ellos, presentando de 4 a 10 bandas. El dendograma UPGMA basado en el coeficiente de similitud genética reveló dos grupos en un rango de 0.56-0.91. Se observó una base genética moderada entre las accesiones evaluadas. A pesar de que sólo se presenta un trabajo para representar la diversidad en Indonesia, la base genética reportada es moderada y extrapolando el resultado es posible suponerse un resultado similar en el resto del territorio.

## *Jatropha curcas*, su diversidad en India

Los primeros reportes de diversidad en *J. curcas* para la India se presentaron en 2008, en uno de ellos Ganesh *et al.* (2008) valoraron las relaciones genéticas interespecíficas del género *Jatropha* procedentes de Tamil Nadu; fueron incluidas seis accesiones de *J. curcas* y una accesión representativa de las siguientes especies: *J. ramanadensis* Raman, *J. podagrica* Hook, *J. gossypifolia* L., *J. tanjorensis* J. L. Ellis & Saroja, *J. villosa* Wight, *J. glandulifera* Roxb., y *J. integerrima* Jacq. Se probaron 26 iniciadores RAPD, 18 resultaron polimórficos, amplificando un total de 134 loci, 112 (80.2%) fueron polimórficos y reportaron un PIC promedio de 0.440. Para determinar relación genética se utilizó un dendograma UPGMA mediante el coeficiente de similitud de Jaccard, se revelaron tres grupos, uno formado por *J. glandulifera* Roxb. a una distancia de 0.28, el segundo agrupó todas las accesiones de *J. curcas* entre 0.60-0.91 y en el grupo restante se agrupó el resto de las especies. El resultado evidenció diferencias genéticas interespecíficas y para *J. curcas* alta diversidad entre las acciones evaluadas.

Por su parte Gupta *et al.* (2008) reportaron la diversidad genética entre 13 genotipos elite de *J. curcas* procedentes de cuatro regiones de India; para ello se probaron 20 iniciadores RAPD y 25 iniciadores ISSR, eligiendo 20 RAPD y 14 ISSR. Se reportó que los RAPD amplificaron un total de 735 bandas, 91 (84.26%) polimórficas; los ISSR amplificaron 646 bandas totales, 62 (76.54%) polimórficas. La diversidad genética de Nei reveló para RAPD e ISSR valores de 0.225 y 0.245 respectivamente y el AMOVA indicó mayor variación entre poblaciones dentro de los grupos (65% RAPD+ISSR). Usando RAPD e ISSR el dendograma UPGMA, mediante el coeficiente de similitud de Jaccard, señaló distancias entre accesiones de 0.41-0.89 y se observaron tres grupos. Como resultado se evidenciaron diferencias genéticas amplias, principalmente entre accesiones.

Kumar *et al.*, en 2009, realizaron el análisis de diversidad a 26 poblaciones de *J. curcas* distribuidas en Rajastán mediante 55 RAPD, eligiendo 26 para el análisis. Fueron revelados 6,011 locus, de los cuales 1,859 (30.9%) resultaron polimórficos. El dendograma UPGMA basado en el coeficiente de similitud de Jaccard con los cinco mejores iniciadores, señaló distancias en un rango de 0.63-0.96 y se observaron tres grupos de 2, 8 y 16 accesiones respectivamente. Se reveló una clara diferenciación entre poblaciones, a pesar de pertenecer al mismo estado

(Rajastán), por lo que este estudio vuelve a evidenciar diferencias genéticas en *J. curcas* para India.

En 2013, Kumar *et al.* analizaron la variación intraespecífica entre dos estados, Meghalaya y Assam, utilizando tres sitios de colecta por estado y seis individuos para conformar una población representativa de cada sitio; para ello se utilizaron SPAR. Fueron probados 20 iniciadores RAPD y 11 DAMD, eligiendo 10 RAPD y 8 DAMD. Los RAPD revelaron 61 locus, 51 (83.6%) polimórficos; DAMD reveló 44 locus, 36 (81.8%) polimórficos. El dendograma UPGMA, utilizando el coeficiente de similitud de Jaccard, presentó un rango de 0.15-0.95 (RAPD+DAMD), se revelaron dos grupos; el primero agrupó dos accesiones de la misma procedencia y el grupo restante incluyó al total de las accesiones en subgrupos relacionados con su procedencia geográfica. Esto determina nuevamente una razonable variación genética entre poblaciones de *J. curcas* en India.

Un análisis usando microsatelites (SSR) en germoplasma de *J. curcas* fue reportado por Kumari *et al.* (2013); en el estudio se incluyeron 64 accesiones procedentes de semilla y colectadas en tres diferentes localidades, germinaron 42 y fueron analizadas mediante 32 marcadores SSR. En total, 31 SSR amplificaron y fueron incluidos en la evaluación, entre los 42 genotipos se reveló un total de 68 alelos, 56 (82.35%) polimórficos; y sólo 13 marcadores revelaron alto polimorfismo. El PIC promedio fue de 0.402, el valor más alto fue 0.50. El dendograma UPGMA, mediante el coeficiente de similitud de Dice, presentó un rango de distancia entre 0.82-1.00. En general se reveló una limitada base genética.

En la India se presenta una base genética amplia para *J. curcas* lo cual quedó evidenciado en los reportes anteriores a lo largo de los sitios de colecta reportados, a pesar del reporte de diversidad mediante SSR (Kumari *et al.* 2013) en el cual se reveló baja diversidad; estos reportes revelan diversidad a lo largo del territorio de la India.

### Referencias sobre la diversidad genética en Tailandia

Uno de los primeros reportes sobre la diversidad de *J. curcas* en Tailandia lo realizaron Sirithunya & Ukoskit (2010), en él se compararon 27 accesiones

distribuidas entre 13 localidades del norte, noreste, centro y sur de Tailandia, incluyendo 10 accesiones procedentes de 10 localidades diferentes de Asia, cuatro accesiones de América procedentes de dos localidades y dos accesiones de dos localidades diferentes de África. Se probaron 22 iniciadores SSR, 12 presentaron reproducibilidad y polimorfismo, revelaron 238 loci, 224 (94.1%) polimórficos. El dendograma UPGMA, mediante el coeficiente de similitud de Dice, incluyendo a *J. gossypifolia* L. como agente externo, reportó que *J. gossypifolia* L. fue separada de *J. curcas* a una distancia de 0.50, las accesiones de *J. curcas* se dividieron en dos grupos a una distancia de 0.62, un grupo se conformó por seis accesiones (cinco de la misma procedencia), y el segundo agrupó al resto de las accesiones en subgrupos, sin relación geográfica. Se reportó un AMOVA realizado entre grupos geográficos, cinco en total, cuatro de Tailandia y un grupo que incluyó las accesiones introducidas, se observó baja diferenciación dentro de grupos (16.69%) y alta entre grupos (83.31%). Las accesiones procedentes de Tailandia presentaron relaciones genéticas altas, principalmente entre el norte y noreste, lo que permite señalar una moderada diversidad genética entre las áreas geográficas evaluadas en Tailandia, pero la diferencia genética entre estas y las accesiones introducidas, la cual es más amplia, puede ser de utilidad en programas de mejoramiento genético.

En 2011, Na-ek *et al.* reportaron la diversidad, estructura y diferenciación genética entre una colección de *J. curcas*, mediante SSR, en la que se incluyeron 18 accesiones de Tailandia, cinco de Asia (Camboya, Myanmar, India, Laos y China) y nueve procedentes de México, señaladas como no tóxicas. Se utilizaron 10 iniciadores SSR, éstos revelaron un total de 26 alelos, con ellos la distancia genética de Nei presentó un valor promedio de 0.447 y un valor máximo y mínimo de 0.627 y 0.149, respectivamente. El valor promedio reportado para el PIC fue de 0.379 con valores máximo y mínimo de 0.647 y 0.258, respectivamente. El coeficiente de similitud entre accesiones se distribuyó entre 0.202 y 1.00 con un rango de promedio de 0.438. El dendograma presentó tres grupos, en el primero se agruparon las accesiones mexicanas no tóxicas, en el segundo las accesiones de Tailandia y en el tercero todas las accesiones restantes. El AMOVA reveló mayor variación entre grupos (63.75%) que entre individuos (36.24%). Los análisis realizados presentaron consistencia, señalando diferencias genéticas entre los grupos analizados, pero limitada diversidad entre accesiones de las mismas poblaciones, incluyendo Tailandia.

Laosatit *et al.* (2013) reportaron la caracterización intraespecífica de *Jatropha* y entre géneros al incluir *Riccinus communis* L., utilizando SSR. Para esto se utilizaron semillas de *J. curcas* procedentes de China, México, Tailandia, Vietnam y de *J. gossypifolia* L., *J. integerrima* Jacq., *J. podagrica* Hook y *Riccinus communis* L. Se diseñaron 163 iniciadores SSR, de ellos 135 fueron exitosos y 118 (72.39%) polimórficos. 135 iniciadores se utilizaron para crear un dendograma UPGMA mediante el coeficiente de similitud de Jaccard, se observó un rango de similitud entre 0.06-0.97, en el cual se presentaron dos grupos, uno para *R. communis* L. y otro para *Jatropha* sp. Todas las accesiones de *J. curcas* se agruparon en un mismo subgrupo, del cual las procedencias de México se separaron del resto. Se evidencian diferencias genéticas entre *J. curcas*, incluso se reportó la diferenciación entre procedencias de México.

Basado en los reportes de diversidad realizados al germoplasma distribuido en Tailandia, es posible señalar una base genética amplia.

### Reportes de diversidad en Brasil

Grativol *et al.* (2011) reportaron diversidad entre 332 accesiones de ocho estados y 11 sitios en Brasil, incluidas siete plantaciones comerciales. Para ello se probaron 32 iniciadores ISSR, de los cuales siete fueron seleccionados por su polimorfismo. Se revelaron 104 loci con un total de 21,253 bandas, 19,472 (91%) polimórficas. Se reportó un PIC promedio de 0.260, el mayor valor fue de 0.310 y el menor de 0.190. El índice de diversidad genética de Nei reveló un valor máximo y mínimo de 0.169 y 0.049, respectivamente. El análisis de conglomerados, usando el método UPGMA mediante la distancia genética de Nei, reveló similitud entre 0.07-0.37, y se observaron tres grupos, el primero con 42 accesiones asociadas a su procedencia geográfica (Ariqueme y Aracatuba), el segundo grupo presentó 228 accesiones sin asociarse a la procedencia geográfica y el tercero agrupó 62 accesiones procedentes de dos localidades (Natal y Arcoverde). El AMOVA reveló variación entre grupos (37.4%), entre sitios y dentro de sitios (33.4%) y dentro de sitios (29.0%), muy similar, aunque se observó menor diversidad dentro de sitios de colecta. Se observó una base genética reducida en el estudio.

Otro estudio, realizado por Rosado *et al.* (2010), valoró la diversidad genética en una colección de *J. curcas* verificando patrones de diversidad genética, para ello se incluyeron 192 accesiones colectadas en diferentes regiones geográficas, 29 procedentes de dos bancos de germoplasma y las 163 restantes de colectas silvestres. Para el estudio se utilizaron 96 RAPD y 6 SSR; 12 iniciadores RAPD fueron polimórficos y revelaron 23 loci informativos, dos de los SSR fueron polimórficos. El dendograma UPGMA realizado con el coeficiente de similitud de Jaccard señaló un rango de similitud entre 0.14-1.00, observando con ello gran similitud entre accesiones. Como resultado se reveló limitada diversidad genética y se supone extensa duplicidad entre germoplasma.

A pesar de que los estudios señalados anteriormente reportan un amplio análisis entre regiones para Brasil, la diversidad reportada es baja presentando una baja base genética, aunque podría suponerse que este resultado puede estar influenciado por la inclusión de accesiones procedentes de plantaciones comerciales, el AMOVA reportó baja diversidad entre las fuentes de variación o sitios de colecta, lo que revela y da soporte a la afirmación de baja diversidad.

### Referencia de la diversidad genética en México

Uno de los primeros estudios a una cantidad de accesiones representativas de una región, en México, fue reportado por Pecina-Quintero *et al.* en 2011 con la finalidad de señalar la diversidad genética en germoplasma de *J. curcas* representativo del estado de Chiapas con el objetivo de recabar información para un programa de mejoramiento genético; se incluyeron 88 accesiones distribuidas en 28 poblaciones dentro de nueve grupos de colecta en Chiapas y se utilizaron seis iniciadores AFLP. Se observaron 566 productos de amplificación, 510 (90%) polimórficos; se reportó un PIC promedio de 0.248, con valor máximo y mínimo de 0.325 y 0.161, respectivamente; el dendograma UPGMA, calculado con el coeficiente de similitud de Dice, presentó un rango de similitud entre 0.4-0.9, observando dos grandes grupos y varias accesiones independientes (fuera de ambos grupos) con amplia afinidad a su origen geográfico, el grupo 1 presentó homogeneidad entre procedencias y el grupo 2 con mayor heterogeneidad al contener accesiones de siete de las nueve regiones. El AMOVA reveló mayor variación dentro de poblaciones

(79%) que entre regiones (5%) y entre poblaciones/regiones (16%), revelando alta diversidad genética dentro de poblaciones que entre regiones. El resultado señaló una amplia base genética en el estado de Chiapas, principalmente en las regiones de colecta a lo largo de todo el estado.

Por su parte, Zavala del Ángel *et al.* (2016) reportaron el análisis de diversidad genética en accesiones de *J. curcas* representativas del estado de Veracruz utilizando 12 marcadores microsatélites; fueron incluidas un total de 64 accesiones distribuidas en 10 regiones del estado de Veracruz: Capital (2), Huasteca Alta (5), Huasteca Baja (6), Totonaca (11), Nautla (8), Papaloapan (11), Tuxtla (9), Olmeca (5), Sotavento (5), Montaña (2). Para el análisis fueron seleccionados 6 SSR, que presentaron un PIC entre 0.375 y 0.764 con un valor promedio de 0.522. El dendograma UPGMA, calculado usando el coeficiente de similitud de Jaccard, presentó un rango de similitud entre 0.12-1.00, se observaron cuatro grandes grupos, y cuatro accesiones se diferenciaron del resto al no formar parte de ninguno de ellos; en el grupo con mayor cantidad de accesiones se presentaron ocho subgrupos, observando muy alta similitud genética (1.00) entre algunas de las accesiones. A pesar de observar accesiones similares dentro del estudio, el rango de similitud y la agrupación entre accesiones observado permite señalar alta diversidad genética para el área representativa del estudio en el estado de Veracruz.

Para determinar el nivel de diversidad y relaciones genéticas entre poblaciones de *J. curcas* en México, Pecina-Quintero *et al.* (2014) realizaron un estudio donde incluyeron 175 accesiones distribuidas entre los estados de Hidalgo (4), Morelos (6), Yucatán (8), Oaxaca (10), Michoacán (12), Guerrero (12), Puebla (12), Veracruz (23) y Chiapas (88), usando cuatro combinaciones de AFLP. En total se revelaron 439 fragmentos, 382 (87.01%) fueron polimórficos, se observó el mayor polimorfismo entre accesiones de Chiapas (74.26%) y Veracruz (50.57%). El AMOVA reveló mayor variación entre poblaciones (56%) que dentro de poblaciones (44%), señalando una muy alta diversidad genética en ambos casos. Las relaciones genéticas se determinaron usando un dendograma UPGMA mediante el coeficiente de similitud de Dice, éste señaló dos grandes grupos: el grupo 1 se localizó en un rango entre 0.54-0.99 agrupando accesiones por localidad geográfica, mientras que el grupo 2 se distribuyó entre 0.69-0.99 y presentó mayor homogeneidad observando

pequeños grupos asociados a su distribución geográfica. Se reportó el apareamiento entre poblaciones asociada a su distribución geográfica, señalando como el valor máximo de correlación 0.591 entre Chiapas-Oaxaca y Chiapas-Yucatán. El estudio señala muy amplia diversidad genética en México y dos centros de diversificación en Chiapas y Veracruz; el primero puede ser señalado como centro de diversidad y el segundo de domesticación.

Para México, los estudios reportados presentan información suficiente para señalar amplia diversidad a lo largo de las regiones incluidas en los diferentes estudios, principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz; incluso en el estado de Veracruz, donde se reporta domesticación de la especie la diversidad revelada es amplia.

### Síntesis sobre la diversidad y dispersión de *J. curcas*

Los estudios presentados anteriormente respecto de la diversidad genética de *J. curcas* permiten observar un gradiente de diversidad con respecto de la localización o distribución geográfica de la especie; en América se reporta alta diversidad y ésta disminuye gradualmente al dispersarse la especie por el Pacífico rumbo a Asia (Figura 1).

En América, específicamente en México, se reportó alta diversidad genética, principalmente en los estados de Chiapas y Veracruz, siendo el primero aquel que exhibió la mayor diversidad genética de la especie; este resultado concuerda con la evidencia presentada por los estudios de Li *et al.* (2017) y Sudheer & Reddy (2014), ya que ambos señalan a México como el posible centro de origen y dispersión de *J. curcas* hacia África y Asia (Figura 1), evidencia desarrollada mediante estudios moleculares a través del uso de marcadores moleculares, el primero con SSR y el segundo con RAPD y ALFP.

El estudio reportado por Li *et al.* (2017) fue centrado en analizar a Mesoamérica como el centro de origen de *J. curcas* al comparar accesiones de esta área con respecto de otras procedentes de África y Asia; el resultado evidenció, para esta área geográfica (conformada por la mitad meridional de México, Guatemala, El Salvador, Belice y el occidente de Honduras, Nicaragua y

Costa Rica), una muy alta variación genética, y específicamente el estado de Chiapas fue el área geográfica con la más alta diversidad genética.

Por otra parte, la menor diversidad reportada en todos los estudios referenciados también se presentó en América, específicamente en Brasil (Figura 1), esta situación puede suponerse que estuvo influenciada por la inclusión, en uno de los estudios, de procedencias asociadas a plantaciones comerciales, pero a pesar de ello, al comparar la diversidad dentro de poblaciones, la variación genética resultó baja en ambos reportes, evidencia que permite señalar una muy baja base genética para Brasil.

En ambas propuestas sobre la dispersión de *J. curcas*, el movimiento de germoplasma se inicia en el mismo punto, México, y de ahí el germoplasma fue conducido hacia Cabo Verde en África; en este punto se presentan evidencias de dos vertientes que en ambos casos señalan el traslado de germoplasma hasta llegar a Asia, con respecto de la diversidad en esta última región geográfica se reportó una diversidad genética media y baja, donde los países del sur y sudeste Asiático, conformados por la India, Tailandia e Indonesia, han reportado una diversidad media y China, representando al oriente de Asia, ha reportado baja diversidad (Figura 1).

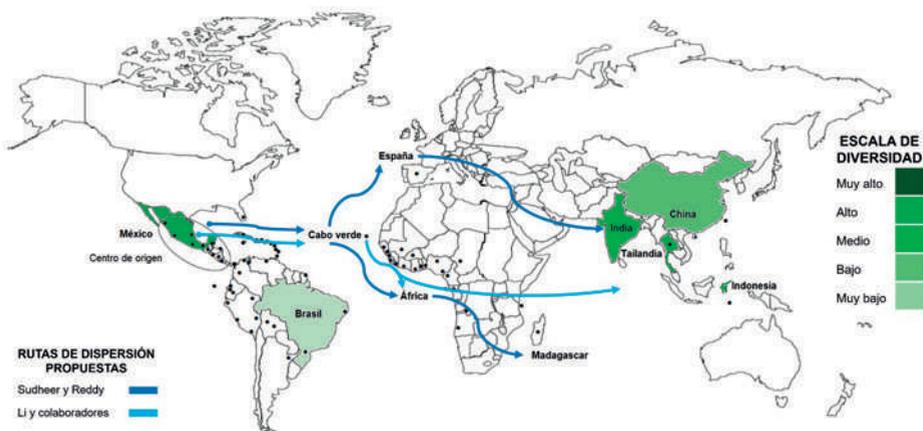


Figura 1. Esquema sobre la diversidad genética y propuestas sobre las rutas de dispersión de *J. curcas* desde su centro de origen.

El grado de diversidad reportado en los estudios señalados revelan que el área de mayor importancia para el estudio genético y desarrollo de *J. curcas*, por su alta diversidad a nivel global, se localiza en México, principalmente en dos áreas geográficas, una de ellas ubicadas en la vertiente del Pacífico distribuida dentro del estado de Chiapas y la segunda en el área del Golfo de México dentro del territorio del estado de Veracruz.

### ***J. curcas*, su diversidad más allá de un recurso oleaginoso**

Desde el reporte de *J. curcas* como especie oleaginosa con potencial industrial como materia prima para la elaboración de biocombustibles líquidos, como el biodiésel (Kumar & Sharma, 2008), los estudios realizados en esta especie se han centrado en potencializar sus características oleaginosas y determinar y evaluar su diversidad en relación con la producción de aceite, pero mucho antes de ser etiquetada como una especie energética los reportes sobre el uso para *J. curcas* eran diversos a lo largo de su área de distribución global, por ejemplo, en África se reportaron usos medicinales para el látex al ser utilizado como astringente en heridas, la semilla o el aceite en el tratamiento del estreñimiento y la hoja en infusión como diurético (FAO, 1986 y Belayneh & Bussa, 2014); en Asia se reportó el uso de las hojas en el tratamiento de dolores dentales, desinflamación de encías e incluso en el tratamiento de la disentería (Kabir *et al.*, 2014); para América en Nicaragua se reportó el uso tópico del látex en el tratamiento de ectoparásitos (Grijalva, 2006), y en Cuba la decocción del tallo se ha reportado como abortivo, antidismenoreico y la corteza como antiinflamatorio (Beyra *et al.*, 1995).

La diversidad de usos reportados en *J. curcas* no es más que evidencia de una vasta fuente de recursos fitoquímicos asociados, los cuales van más allá de la combinación adecuada de ácidos grasos que permitan obtener un metil éster que por su calidad puede ser utilizado como biocombustible al sustituir de manera parcial o total al diésel fósil; y los aminoácidos reportados en la pasta, subproducto de la extracción del aceite.

Evidencia de esta diversidad se observa en el reporte que Devappa *et al.* (2010) realizaron sobre la amplia gama de compuestos fitoquímicos que pueden ser obtenidos de *J. curcas*, entre ellos se mencionan, a grandes rasgos, metabolitos

secundarios (alcaloides y lignanos) y moléculas biológicas (péptidos cíclicos y terpenos), obtenidos de diferentes órganos de la planta, los cuales se enuncian con mayor detalle en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Lista de compuestos químicos presentes en *J. curcas* señalado por Nithiyantham *et al.* (2012)**

Parte de la planta	Composición química
Parte aérea	Ácidos orgánicos, ácido benzoico, ácido protocatecuico, ácido resarcílico, saponinas y taninos.
Corteza del tallo	$\beta$ -amirina, $\beta$ -sitosterol y saponinas taraxerol, esteroides, taninos, glucósidos, alcaloides y flavonoides.
Hojas	Triterpenos ciclicos estigmasterol, $\beta$ -sitosterol, flavonoides (apigenina, vitexina, isovitexina), un dimero de alcohol triterpénico y dos flavonoides glucósicos, alcaloides, saponinas, esteroides, taninos.
Látex	Curcaciolina A, Curcaina (proteasa).
Semilla	Curcina, lectina, éster de forbol, esterases y lipasas.
Almendra	Fitatos, saponinas e inhibidores de tripsina.
Raíz	$\beta$ -sitosterol, marmesina, propazina, curculatiranes A y B, curcusones A-D, diterpenos de jatrolol y jatrololona A y B, cumarina tomentin A y B.

Es posible observar que un compuesto abundante, por su distribución dentro de los órganos de *J. curcas*, son las saponinas, por localizarse en órganos aéreos, corteza, hojas e incluso en la almendra (Cuadro 1), aunque el compuesto más asociado a esta especie es el éster de forbol, presente en la semilla y responsable de la toxicidad en insectos, moluscos, aves y mamíferos, lo que ha limitado el uso de la pasta como fuente de proteína en la dieta.

Entre los diversos compuestos químicos presentes en *J. curcas* (Cuadro 1), a algunos se les atribuye amplia actividad biológica ya que promueven tumores,

presentan actividad citotóxica, antiinflamatoria, antitumoral, molusquicida, insecticida y fungicida, las cuales son descritas de manera más amplia en el Cuadro 2, en el cual es posible observar actividad insecticida en la semilla asociada a Jatrophanol-I y éster de forbol, actividad fungicida en semilla y látex asociadas a  $\beta$ -1, 3-Glucanasa y Jatrophidina, y propiedades relacionadas con la curación de heridas, asociada a la Curcaina presente en el látex; actividades que podrían ser aprovechadas comercialmente con el fin de dar valor agregado al cultivo de *J. curcas*.

Incluso desde una perspectiva biológica, estas moléculas y compuestos pueden ser aplicados en la caracterización y evaluación de accesiones al ser utilizado como descriptor bioquímico y con ello indicar la existencia, ausencia o el flujo de genes específicos para la diferenciación intraespecífica en *J. curcas*.

**Cuadro 2. Reporte general de las actividades biológicas presentes en órganos y partes de la planta *J. curcas* y el compuesto purificado al que se le atribuye el efecto, según la investigación publicada por Devappa *et al.* (2010).**

Parte de la planta	Material de prueba	Propiedad biológica	Compuesto purificado
Planta	Extracto de cloroformo y acetónitrilo	Actividad molusquicida	-
Fruto	Extracto de metanol, cloroformo y éter de petróleo	Tóxico en ratas, causa abortos espontáneos	-
Semilla	Semilla en polvo	Toxicidad oral en gansos, ovejas, terneros y humanos	-
	Semilla en polvo mezclada en la dieta	Tóxico en gallinas	-
	Semilla cruda o cocida	Toxicidad oral en ratas	Curcaina
	Extracto acuoso	Actividad molusquicida	-
	Extracto de metanol	Toxicidad intraperitoneal en ratas	Curcaina
	Extracto de éter de petróleo	Actividad insecticida	Jatrophanol-I
	-	Actividad antifúngica	$\beta$ -1,3-Glucanasa

Continuación Cuadro 2...

Parte de la planta	Material de prueba	Propiedad biológica	Compuesto purificado
Harina (grano)	Mezclada en la dieta	Toxicidad oral en ratas y cerdos	-
Pasta (desgrasada)	Mezclada en la dieta	Toxicidad oral en ratas	-
Aceite	Extracto de metanol y etanol	Actividad molusquicida e insecticida; actividad hemolítica de células rojas en conejos; promotor de tumores en piel de ratones	Éster de forbol (fracción purificada)
	Éter de petróleo	Toxicidad tópica en ratas y conejos; actividad molusquicida, insecticida y huevicida; tóxico en ratas a nivel oral y tópico; efecto abortivo en ratas	Éster de forbol (fracción purificada)
Látex	-	Actividad antiparasitaria, antifúngica, <sup>1</sup> antimalaria; <sup>2</sup> propiedad de curación de heridas <sup>3</sup>	<sup>1</sup> Jatrophiidina, <sup>2</sup> Curcaciclina- B. <sup>3</sup> Curcaina
Partes aéreas	Extracto acuoso	Actividad citotóxica	-
Hojas	Extractos de éter de petróleo y benceno	Actividad insecticida	-
	Extracto de metanol	Toxicidad oral en ratas; actividad citotóxica y antiesquistosómica.	-
	Extracto de diclorometano, metanol y hexano	Actividad antibacteriana	-

Nota: Mismo número en diferente columna señala relación entre caracteres.

## México y su relación en la diversidad del éster de forbol en *J. curcas*

Como fue señalado anteriormente, es posible determinar variación genética dentro de una población usando caracteres no visibles asociados a procesos bioquímicos o sus productos, denominados descriptores bioquímicos, entre los que se pueden mencionar las isoenzimas y en este caso la propuesta del éster de forbol.

Makkar & Becher (2009), al estudiar las propiedades de *J. curcas* como alimento para la ganadería, determinaron diferentes concentraciones de éster de forbol y en algunas variedades la ausencia o no-detectabilidad de éste mediante la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, por sus siglas en inglés), lo anterior señala la presencia de dos grandes grupos, genotipos tóxicos y no tóxicos, determinando esta condición por la concentración o ausencia de éster de forbol, señalando toxicidad en aquellos genotipos que presentaran concentraciones mayores a 0.11 mg g<sup>-1</sup> de éster de forbol mediante HPLC.

Análisis sobre la toxicidad de *J. curcas* realizados en accesiones procedentes de África, Asia y América entre 1997 y 2016 reportaron genotipos tóxicos en los tres continentes evaluados, fueron señaladas concentraciones de éster de forbol (EF) entre 0.153-6.440 mg g<sup>-1</sup> (2.219 en promedio); específicamente en África se reportaron genotipos con concentraciones entre 1.120-6.440 mg g<sup>-1</sup> de EF, en Asia se observaron valores entre 0.870-5.600 mg g<sup>-1</sup> de EF y en América las concentraciones reportadas oscilaron entre 0.153-3.500 mg g<sup>-1</sup>. La mayor concentración de EF se reportó en África (6.440 mg g<sup>-1</sup>) y entre continentes América presentó las menores concentraciones de EF (Cuadro 3).

En América se evaluaron genotipos procedentes de Brasil, Costa Rica, El Salvador, Nicaragua, México y Perú; en este continente los genotipos con menor y mayor concentración de EF fueron procedentes de México (Cuadro 3).

Los reportes sobre la concentración de EF presentados en el Cuadro 3 permiten observar que la procedencia geográfica no se relaciona directamente con la concentración de EF en genotipos señalados como tóxicos; por su parte,

entre genotipos no tóxicos lo observado es diferente ya que todos los genotipos reportados en esta categoría proceden de América, específicamente de México.

Entre los genotipos no tóxicos se pueden identificar dos subcategorías, en la primera se encuentran genotipos con niveles bajos de EF y en la segunda están aquellos genotipos que mediante HPLC no puede ser detectada la presencia de EF.

### Cuadro 3. Dispersión de recursos genéticos de *J. curcas* relacionados con la presencia y ausencia de éster de forbol

Referencia	Continente	País	Estado/ Provincia (Localidad)	Núm. de muestras	Toxicidad	Concentración de éster de forbol (mg g <sup>-1</sup> ) <sup>B</sup>
Makkar <i>et al.</i> , 1997	África	Benín	Cotonú	1	Tóxico	1.710
		Burkina Faso	Kongosi	1	Tóxico	1.710
		Cabo Verde	Fogo	1	Tóxico	1.500
		Ghana	Nyankpala	1	Tóxico	1.290
		Kenia	Kitui	1	Tóxico	3.320
		Senegal	Santhie Ram, Nioro du Rip	2	Tóxico	1.980 <sup>A</sup>
	Tanzania	Mombo	1	Tóxico	1.120	
	Asia	India	Kangra	2	Tóxico	1.190 <sup>A</sup>
			Nasik	1	Tóxico	1.760
		Myanmar	Sink Gaing, Mandalay	1	Tóxico	0.870
América	Costa Rica	Rio Grande	1	Tóxico	1.150	
	México	Veracruz	1	Tóxico	1.020	
		Veracruz (Papantla)	1	No tóxico	ND	
	Nicaragua	Managua	2	Tóxico	2.435 <sup>A</sup>	
Makkar <i>et al.</i> ,1998	América	México	Quintana Roo	3	No tóxica	0.013 <sup>A</sup>
				4	No tóxica	ND

Continuación Cuadro 3...

Referencia	Continente	País	Estado/ Provincia (Localidad)	Núm. de muestras	Toxicidad	Concentración de éster de forbol (mg g <sup>-1</sup> ) <sup>B</sup>
Martínez- Herrera <i>et al.</i> , 2006	América	México	Veracruz (Castillo de Teayo)	5	No tóxico	ND
			Veracruz (Coatzacoalcos)	1	No tóxico	0.080
				4	Tóxico	2.030 <sup>A</sup>
			Veracruz (Papantla)	5	No tóxico	ND
			Veracruz (Yautepec)	5	No tóxico	ND
Basha & Sujatha, 2007	Asia	India	Andhra Pradesh	15	Tóxico	NA
			Haryana	1	Tóxico	NA
			Kerala	1	Tóxico	NA
			Madhya Pradesh	5	Tóxico	NA
			Rajasthan	10	Tóxico	NA
			Tamilnadu	10	-	NA
	América	México	Veracruz	1	No tóxico	NA
Basha <i>et al.</i> , 2009	África	África	-	1	Tóxico	1.170
		Cabo Verde	-	1	Tóxico	2.700
		Egipto	-	1	Tóxico	4.406
		Madagascar	-	9	Tóxico	4.539 <sup>A</sup>
		Uganda	-	1	Tóxico	6.440
	Asia	China	-	4	Tóxico	3.605 <sup>A</sup>
		India	-	19	Tóxico	2.735 <sup>A</sup>
		Vietnam	-	1	Tóxico	5.600

Continuación Cuadro 3...

Referencia	Continente	País	Estado/ Provincia (Localidad)	Núm. de muestras	Toxicidad	Concentración de éster de forbol (mg g <sup>-1</sup> ) <sup>B</sup>	
Basha <i>et al.</i> , 2009	América	El Salvador	-	1	Tóxico	1.230	
		México	-	8	Tóxico	2.328 <sup>A</sup>	
			-	8	No tóxico	0.049 <sup>A</sup>	
			-	12	No tóxico	ND	
Na-ek <i>et al.</i> , 2011	Asia	Camboya	-	1	Tóxico	NA	
		China	-	1	Tóxico	NA	
		India	-	1	Tóxico	NA	
		Laos	-	1	Tóxico	NA	
		Myanmar	-	1	Tóxico	NA	
		Tailandia	-	18	Tóxico	NA	
	América	México	-	9	No tóxico	NA	
Vischi <i>et al.</i> , 2013	América	México	Morelos	6	No tóxico	0.020 <sup>A</sup>	
			Jalisco	1	No tóxico	0.026	
			Quintana Roo	6	No tóxico	0.075 <sup>A</sup>	
			Yucatán	1	No tóxico	0.060	
			Veracruz	1	No tóxico	0.001	
			Hidalgo	1	Tóxico	0.153	
			3	No tóxico	0.029 <sup>A</sup>		
	África	Guinea-Bisáu	Nhacra-Oio	1	Tóxico	3.341	
Continúa: Vischi <i>et al.</i> , 2013	África	Ghana	Volta	1	Tóxico	3.011	
			Senegal	Kaolack	1	Tóxico	2.374
				Thies	1	Tóxico	2.607
				Diurbel	1	Tóxico	2.096
				Kaffrine	1	Tóxico	2.400
			Saint-Louis	1	Tóxico	2.391	
	América	Brasil	Bahía	1	Tóxico	0.918	
			Piauí	1	Tóxico	3.324	
		Perú	Lima	1	Tóxico	3.115	

Continuación Cuadro 3...

Referencia	Continente	País	Estado/Provincia (Localidad)	Núm. de muestras	Toxicidad	Concentración de éster de forbol (mg g <sup>-1</sup> ) <sup>B</sup>
Sanghamitra <i>et al.</i> , 2014	América	México	Veracruz	1	No tóxico	NA
			Yucatán	1	Tóxico	NA
Zavala <i>et al.</i> , 2016	América	México	Veracruz	1	Tóxico	0.430
			(Capital)	1	No tóxico	ND
			Veracruz (Huasteca alta)	5	No tóxico	ND
			Veracruz (Totonaca)	6	No tóxico	ND
			Veracruz (Nautla)	5	No tóxico	ND
			Veracruz	1	No tóxico	ND
			(Papaloapan)	5	Tóxico	0.407 <sup>A</sup>
			Veracruz (Tuxtlas)	1	No tóxico	ND
				5	Tóxico	3.500 <sup>A</sup>
			Veracruz (Olmeca)	2	No tóxico	ND
			Veracruz	2	Tóxico	0.195 <sup>A</sup>
			(Sotavento)	2	No tóxico	ND
Veracruz (Montaña)	1	Tóxico	0.650			

A: Valor promedio en aquellos genotipos que reportan más de dos muestras; B: Extracción por metanol, usando como referencia forbol-12-miristato 13-acetato, determinado por cromatografía líquida de alta eficiencia; ND: Concentración de éster de forbol no determinada por cromatografía líquida de alta resolución; NA: No analizado para determinar la concentración de éster de forbol.

Entre la primera subcategoría la concentración de EF osciló entre 0.001-0.080 mg g<sup>-1</sup>, con genotipos procedentes de los estados de Hidalgo, Jalisco, Morelos, Quintana Roo, Veracruz y Yucatán; por su parte, entre los genotipos con concentración de EF no detectable se asocian principalmente al estado de Veracruz, al presentarse un solo reporte en el estado de Quintana Roo con estas características (Cuadro 3).

Adicional a la información presentada anteriormente, existen registros no publicados del herbario y fibroteca “U Najil Tikin Xiw” del Centro de Investigación Científica de Yucatán, los cuales señalan que en el estado de Yucatán se presentan genotipos no tóxicos con evidencia del uso de la nuez en la alimentación humana; por otro lado, Francis *et al.* (2013) reportaron ge-notipos procedentes de Puebla, Morelos y Veracruz con concentraciones no detectables de EF por HPLC. Lo anterior señala que sólo es posible encontrar genotipos libres de EF en México, distribuidos entre los estados de Veracruz, Puebla, Morelos y Yucatán.

La evidencia sobre el origen de genotipos de *J. curcas* no tóxica, señala la domesticación de la especie por culturas prehispánicas mesoamericanas, evidencia de esto es presentada por Dias *et al.*, 2012, al señalar el área de influencia de la cultura maya como el centro de domesticación de la especie al encontrar referencias que atribuyen el uso de ecotipos para la alimentación humana, lo que supone la ausencia o baja concentración de éster de forbol.

Pero quizá la evidencia más amplia es la presentada por Vera-Castillo *et al.* (2014) mediante el estudio de germoplasma de *J. curcas* no tóxica en la región conocida como Totonacapan, ubicado geográficamente entre los estados de Puebla y Veracruz en México, en esta región se ha reportado el cultivo de *J. curcas* con fines de alimentación humana desde tiempos ancestrales; como parte de los resultados se evidencia que los genotipos no tóxicos son cultivados ya que no se localizaron genotipos silvestres con esta característica. Por otra parte, se propone que la presencia de genotipos no tóxicos en Tabasco, Yucatán y Quintana Roo se asocian a la migración desde el estado de Veracruz, ya que la mayor proporción de accesiones no tóxicas proceden de áreas de influencia de la cultura totonaca, por ello el estado de Veracruz podría ser señalado como el centro de domesticación y dispersión de genotipos no tóxicos de *J. curcas*.

Aun cuando se conoce el potencial inherente en *J. curcas* con respecto del uso de biomoléculas, actualmente el uso industrial de esta especie se relaciona principalmente con el aprovechamiento de su aceite, por lo que es importante señalar que entre genotipos no tóxicos, específicamente libres de EF, se han reportado concentraciones de aceite en la semilla entre 55.1 y 59.2% (García

*et al.*, 2017), resultado que permite señalar la utilidad multipropósito de la especie como fuente de aceite y otras moléculas para el desarrollo agroindustrial de la especie.

## Conclusiones y perspectivas

México exhibe la mayor diversidad genética para *J. curcas*, esta cualidad brinda un escaparate genético amplio, el cual puede ser utilizado para el desarrollo de variedades e híbridos de la especie, con la posibilidad de elegir y direccionar el avance genético de la especie hacia mejora agronómicas e incluso direccionar ésta hacia nuevos mercados para el aprovechamiento de una o más moléculas biológicas.

Es evidente que la presencia de organismos libres de éster de forbol o con baja presencia de éste se limita a México y que su desarrollo o domesticación se vincula directamente con culturas prehispánicas como la totonaca o la maya, las cuales se distribuyeron geográficamente en el área de Mesoamérica donde actualmente se localiza México.

Estas dos situaciones brindan una posición estratégica para México en los niveles académico y comercial, desde el estudio genético, bioquímico y aislamiento de genes hasta el desarrollo de organismos mejorados con especificidad para la industria energética, farmacéutica, agroindustrial, etcétera.

Incluso es viable señalar la posibilidad de la protección intelectual de genotipos libres de éster de forbol mediante la secuenciación de su genoma e incluso promover el registro de la denominación de origen de estas variedades para México, ya que hay evidencia que vincula el desarrollo de variedades no tóxicas con la actividad humana, asociando éstas a regiones geográficas delimitadas. La secuencia y el contexto que se plantean en el inicio de este libro, tiene como objetivo general la reconsideración de *Jatropha curcas* como especie agroindustrial en México, incluso se propone la comercialización y regulación de genotipos mexicanos no tóxicos en el mercado nacional e internacional.

## Bibliografía citada

- Aguilera-Cauich, E.A., Pérez-Brito, D., Navarrete Yabur, A., López-Puc, G., Castañón Nájera, G., Sacramento Rivero, J.C., Mijangos-Cortes, J.O. 2015. "Assessment of phenotypic diversity and agronomic contrast in American accessions of *J. curcas*". *Industrial Crops and Products*, 77, 1001–1003.
- Alercia, A. 2011. *Key Characterization and Evaluation Descriptors: Methodologies for the Assessment of 22 Crops*. Rome, Italy: Bioversity International.
- Basha, S.D., Francis, G., Makkar, H.P.S., Becker, K., Sujatha, M. 2009. "A comparative study of biochemical traits and molecular markers for assessment of genetic relationships between *J. curcas* germplasm from different countries". *Plant Science*, 176(6), 812–823.
- Basha, S.D. & Sujatha, M. 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(3), 375–386.
- Belayneh, A. & Bussa, N.F. 2014. "Ethnomedicinal plants used to treat human ailments in the prehistoric place of Harla and Dengego valleys, eastern Ethiopia". *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(18), 1–17.
- Beyra, Á., León, C. del C., Iglesias, E., Ferrándiz, D., Herrera, R., Volpato, G., Álvarez, R. 1995. "Estudios etnobotánicos sobre plantas medicinales en la provincia de Camagüey (Cuba)". *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 61(2), 185–204.
- Bioversity-International. 2007. *Developing crop descriptor lists*. Bioversity (Bioversity). Roma, Italia: Bioversity International.
- Burr, M.D. & Pepper, I.L. (1997). "Variability in presence–absence scoring of AP PCR fingerprints affects computer matching of bacterial isolates". *Journal of Microbiological Methods*, 29(1), 63–68.
- Cai, Y., Sun, D., Wu, G., Peng, J. 2010. "ISSR-based genetic diversity of *Jatropha curcas* germplasm in China". *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1739–1750.
- Devappa, R.K., Makkar, H.P.S. & Becker, K. 2010. "*Jatropha* toxicity-A review". *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews*, 13(6), 476–507.
- Dias, L.A.S., Missio, R.F., Dias, D.C.F.S. 2012. "Antiquity, botany, origin and domestication of *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae), a plant species with potential for biodiesel production". *Genetics and Molecular Research*, 11(3), 2719–2728.

- FAO. 1986. *Some medicinal forest plants of Africa and Latin America*. Rome: FAO Forestry Department.
- Francis, G., Oliver, J. & Sujatha, M. 2013. "Non-toxic *Jatropha* plants as a potential multipurpose multi-use oilseed crop". *Industrial Crops & Products*, 42, 397-401.
- Ganesh Ram, S., Parthiban, K.T., Senthil Kumar, R., Thiruvengadam, V., Paramathma, M. 2008. "Genetic diversity among *Jatropha* species as revealed by RAPD markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55(6), 803-809.
- García Alonso, F., García Pérez, E., Pérez Vázquez, A., Ruiz-Rosado, O. 2017. "Oil content in *J. curcas* non-toxic accesses in Veracruz, Mexico". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(3), 635-648.
- Gómez-Pompa, A., Krömer, T. & Castro-Cortés, R. 2010. *Atlas de la Flora de Veracruz: Un patrimonio natural en peligro*. I. Aries-Leal, Ed. (Primera). México: Comisión del Estado de Veracruz para la Commemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana.
- Grativol, C., Lira-Medeiros, C.D.F., Silva Hemerly, A., Gomes Ferreira, P.C. 2011. "High efficiency and reliability of inter-simple sequence repeats (ISSR) markers for evaluation of genetic diversity in Brazilian cultivated *J. curcas* accessions". *Molecular Biology Reports*, 38(7), 4245-4256.
- Grijalva Pineda, A. 2006. *Flora Util - Etnobotanica de Nicaragua*. MARENA, Ed. (Primera). Managua, Nicaragua.
- Gübitz, G., Mittelbach, M. & Trabi, M. 1999. "Exploitation of the tropical oil seed plant *J. curcas*" *Bioresource Technology*, 67, 73-82.
- Guerrero, J.A., Campuzano, L.F., Rojas, S., Pachon-García, J. 2011. "Caracterización morfológica y agronómica de la Colección Nacional de Germoplasma de *Jatropha curcas* L." Morphological and Agronomic Characterisation of the *Jatropha curcas* L. Colombian Germplasm collection. *Orinoquia*, 15(2), 131-147.
- Gupta, S., Srivastava, M., Mishra, G., Naik, P., Chauhan, R., Tiwari, S., Monteros, M.J. 2008. "Analogy of ISSR and RAPD markers for comparative analysis of genetic diversity among different *Jatropha curcas* genotypes". *African Journal of Biotechnology*, 7(23), 4230-4243.
- Heller, J. 1996. *Physic nut. J. curcas Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1*. IPGRI, Ed. Rome.
- Johnson, T.S., Eswaran, N. & Sujatha, M. 2011. "Molecular approaches to improvement of *Jatropha curcas* Linn. as a sustainable energy crop". *Plant Cell Reports*, 30(9), 1573-1591.

- Kabir, M.H., Hasan, N., Rahman, M.M., Rahman, M.A., Khan, J.A., Hoque, N.T., Rahmatullah, M. 2014. "A survey of medicinal plants used by the Deb barma clan of the Tripura tribe of Moulvibazar district, Bangladesh". *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(19), 1–28.
- Kaushik, N., Kumar, K., Kumar, S., Kaushik, N., Roy, S. 2007. "Genetic variability and divergence studies in seed traits and oil content of *Jatropha* (*J. curcas*) accessions". *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 497–502.
- Koh, M.Y. & Mohd Ghazi, T.I. 2011. "A review of biodiesel production from *J. curcas* oil". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2240–2251.
- Kumar, A. & Sharma, S. 2008. "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*J. curcas*): A review". *Industrial Crops and Products*, 28(1), 1–10.
- Kumar, S., Kumaria, S. & Tandon, P. 2013. "SPAR methods coupled with seed-oil content revealed intra-specific natural variation in *J. curcas* from Northeast India". *Biomass and Bioenergy*, 54, 100–106.
- Kumar Sharma, S., Kumar, S., Rawat, D., Kumaria, S., Kumar, A., Rama Rao, S. 2011. "Genetic diversity and gene flow estimation in *Prosopis cineraria* (L.) Druce: A key stone tree species of Indian Thar Desert". *Biochemical Systematics and Ecology*, 39(1), 9–13.
- Kumar, R.V., Tripathi, Y.K., Shukla, P., Ahlawat, S.P., Gupta, V.K. 2009. "Genetic diversity and relationships among germplasm of *J. curcas* revealed by RAPDs". *Trees - Structure and Function*, 23(5), 1075–1079.
- Kumari, M., Grover, A., Yadav Vikas, P., Arif, M., Ahmed, Z. 2013. "Development of EST-SSR markers through data mining and their use for genetic diversity study in Indian accessions of *J. curcas*: A potential energy crop". *Genes and Genomics*, 35(5), 661–670.
- Laosatit, K., Tanya, P., Saensuk, C., Srinives, P. 2013. "Development and characterization of EST-SSR markers from *Jatropha curcas* EST database and their transferability across *Jatropha*-related species/genus". *Biologia*, 68(1), 41–47.
- Li, H., Tsuchimoto, S., Harada, K., Yamasaki, M., Sakai, H., Wada, N., Fukui, K. 2017. "Genetic Tracing of *J. curcas* from Its Mesoamerican Origin to the World". *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–11.
- Machado, R. 2011. "Morphological and productive characterization of *J. curcas* provenances". *Pastos y Forrajes*, 34(3), 267–280.
- Maftuchah, Zainudin, A., Dyah Purwati, R., Sudarmo, H. 2011. "Genetic characterization of several promising accession of *Jatropha curcas* L. based on rapd marker". *Jurnal Littri*, 17(2), 83–88.

- Mahar, K.S., Rana, T.S., Ranade, S.A., Meena, B. 2011. "Genetic variability and population structure in *Sapindus emarginatus* Vahl from India". *Gene*, 485(1), 32–39.
- Makkar, H.P.S., Aderibigbe, A.O. & Becker, K. 1998. "Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors". *Food Chemistry*, 62(2), 207–215.
- Makkar, H.P.S., Becher, K., Sporer, F., Wink, M. 1997. "Studies on Nutritive Potential and Toxic Constituents of Different Provenances of *Jatropha curcas*". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45, 3152–3157.
- Martínez-Herrera, J., Siddhuraju, P., Francis, G., Dávila-Ortiz, G., Becker, K. 2006. "Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *J. curcas* from Mexico". *Food Chemistry*, 96(1), 80–89.
- Na-ek, Y., Wongkaew, A., Phumichai, T., Kongsiri, N., Kaveeta, R., reewongchai, T., Phumichai, C. 2011. "Genetic diversity of physic nut (*J. curcas*) revealed by SSR markers". *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 14(2), 105–110.
- Narzary, D., Mahar, K.S., Rana, T.S., Ranade, S.A. 2009. "Analysis of genetic diversity among wild pomegranates in Western Himalayas, using PCR methods". *Scientia Horticulturae*, 121(2), 237–242.
- Nithiyantham, S., Siddhuraju, P., Francis, G. 2012. "Potential of *Jatropha curcas* as a Biofuel, Animal Feed and Health Products". *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 89(6), 961–972.
- Pandey, V.C., Singh, K., Singh, J.S., Kumar, A., Singh, B., Singh, R.P. 2012. "*Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2870–2883.
- Pecina-Quintero, V., Anaya-López, J.L., Colmenero, A.Z., García, N.M., Núñez Colín, C.A., Solís Bonilla, J.L., Mejía Bustamante, D.J. 2011. "Molecular characterisation of *J. curcas* genetic resources from Chiapas, México through AFLP markers". *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1897–1905.
- Pecina-Quintero, V., Anaya-López, J.L., Zamarripa-Colmenero, A., Núñez-Colín, C.A., Montes-García, N., Solís-Bonilla, J.L., Jiménez-Becerril, M.F. 2014. "Genetic structure of *J. curcas* in Mexico and probable centre of origin". *Biomass and Bioenergy*, 60, 147–155.
- Rosado, T.B., Laviola, B.G., Faria, D.A., Pappas, M.R., Bhering, L.L., Quirino, B., Grattapaglia, D. 2010. "Molecular markers reveal limited genetic diversity in a large germplasm collection of the biofuel crop *J. curcas* in Brazil". *Crop Science*, 50(6), 2372–2382.
- Sanghamitra, K., Oramas, R.V. & Prasad, R.N. 2014. "Comparative Yield and Oil Quality of Toxic and Non-Toxic Mexican *Jatropha curcas* Grown in the Same Agroclimatic Conditions". *American Journal of Plant Sciences*, 5, 230–234.

- Shabanimofrad, M., Rafii, M.Y., Megat Wahab, P.E., Biabani, A.R., Latif, M.A. 2013. "Phenotypic, genotypic and genetic divergence found in 48 newly collected Malaysian accessions of *J. curcas*". *Industrial Crops and Products*, 42(1), 543–551.
- Silva, L.M., De Oca, H.M., Diniz, C.R., Fortes-Dias, C.L. 2001. "Fingerprinting of cell lines by directed amplification of minisatellite-region DNA (DAMD)". *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 34(11), 1405–1410.
- Sirithunya, P. & Ukoskit, K. 2010. "Population Genetic Structure and Genetic Diversity of *Jatropha curcas* Germplasm as Investigated by 5'-anchored Simple Sequence Repeat Primers". *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 13(3), 147–153.
- Spooner, D., van Treuren, R., de Vicente, M.C. 2005. *Molecular markers for genebank management* (IPGRI Tech). Roma, Italia: International Plant Genetic Resource Institute.
- Sudheer Pamidimarri, D.V.N. & Reddy, M.P. 2014. "Phylogeography and molecular diversity analysis of *J. curcas* and the dispersal route revealed by RAPD, AFLP and nrDNA-ITS analysis". *Molecular Biology Reports*, 41(5), 3225–3234.
- Sun, Q.B., Li, L.F., Li, Y., Wu, G.J., Ge, X.J. 2008. "SSR and AFLP markers reveal low genetic diversity in the biofuel plant *Jatropha curcas* in China". *Crop Science*, 48(5), 1865–1871.
- Vera-Castillo, Y.B., Cuevas, J.A., Valenzuela-Zapata, A.G., Urbano, B., Gonzáles-Andrés, F. 2014. "Biodiversity and indigenous management of the endangered non-toxic germplasm of *J. curcas* in the Totonacapan (Mexico), and the implications for its conservation". *Genetic Resources and Crop Evolution*, 61, 1263–1278.
- Vischi, M., Raranciuc, S. & Baldini, M. 2013. "Evaluation of genetic diversity between toxic and non toxic *J. curcas* accessions using a set of simple sequence repeat (SSR) markers". *African Journal of Biotechnology*, 12(3), 265–274.
- Wani, T.A., Kitchlu, S. & Ram, G. 2012. "Genetic variability studies for morphological and qualitative attributes among *J. curcas* accessions grown under subtropical conditions of North India". *South African Journal of Botany*, 79, 102–105.
- Wen, M., Wang, H., Xia, Z., Zou, M., Lu, C., Wang, W. 2010. "Development of EST-SSR and genomic-SSR markers to assess genetic diversity in *J. curcas*". *BMC Research Notes*, 3(42), 1–8.
- Zavala del Ángel, I., García-Pérez, E., González-Hernández, D., Pérez-Vázquez, A., Ávila Reséndiz, C. 2016. "Genetic Diversity of *Jatropha curcas* L. in Veracruz State, Mexico, and its Relationships with the Content of Phorbol Esters". *Global Advanced Research Journal of Agricultural Science*, 5(5), 149–158.



## Capítulo 3

### Avances en el mejoramiento genético de *Jatropha curcas* L.

Experiencia de la empresa Jatronergy en Yucatán México por ocho años

\*Carlos Cecilio Góngora-Canul y  
Gregorio Martínez-Sebastián

Agroindustria Alternativa del Sureste SPR de RL de CV,  
calle 60 Diagonal Núm 490 x 59 y 61, Depto. 6, Col. Parque  
Industrial Yucatán, Mérida, Yucatán México, CP 97300. \*

\*carlos.gongora @agroindustria.com.mx

### Resumen

*Jatropha curcas* L. o piñón mexicano es un cultivo que llamó la atención hace dos décadas por su potencial en la producción de aceite y su posterior conversión a biocombustibles. Sin embargo, el cultivo no tuvo éxito en todo el mundo debido a la falta de materiales genéticos mejorados y la falta de conocimiento agronómico. Actualmente existen avances en el mejoramiento genético y la tecnología para su cultivo en México y en el mundo. Jatronergy ha realizado mejoramiento genético desde el año 2012, apostando a la hibridación. Está ampliamente demostrado que los materiales silvestres, variedades de polinización libres, etc., no incrementan los rendimientos de grano y aceite. La estrategia emprendida debe ser la generación de parentales homocigotos mediante autopolinización o doble haploidía (DH), formación de grupos heteróticos y posteriormente la formación

de híbridos F1. Jatronergy ha demostrado la superioridad en rendimiento con una heterosis de más de 400% de híbridos F1 comparado a los materiales silvestres. Todo material generado debe evaluarse por varios años y en varios ambientes para determinar su estabilidad o interacción con el ambiente. El avance ha sido tal, que Jatronergy ya vende semilla híbrida comercial registrada ante las autoridades competentes que garantizan los rendimientos deseados por los agricultores. La comercialización de semillas conlleva a establecer una estrategia de protección intelectual varietal dado que la planta híbrida se puede reproducir vía asexual, por lo que los compradores firman un convenio de confidencialidad con la empresa. Finalmente, el avance en el mejoramiento genético abre la posibilidad de diversificar la agricultura en ciertas regiones del país y del mundo como un cultivo alternativo y que tiene un potencial de usos más allá de la generación de combustibles, como alimento, biopolioles, etcétera.

## Palabras clave

*Jatropha*, mejoramiento genético, biodiésel

## Introducción

*Jatropha curcas* L. es un cultivo con potencial para la producción de biocombustibles, biopoliuretano, proteína para consumo animal y otros subproductos (King *et al.*, 2009). Sin embargo, no ha podido consolidarse como un cultivo con un proceso agrícola convencional, dado que enfrenta aún muchas dificultades, como la falta de su conocimiento técnico para su cultivo, falta de variedades con rendimientos óptimos, incertidumbre de mercado, falta de

mecanización en la siembra y cosecha, los cuales derivan en una falta de interés para su cultivo. La falta de materiales genéticos con rendimientos óptimos es un área de oportunidad aún en desarrollo, pero ya con avances significativos en México y diferentes partes del mundo (Figura 1A y B; Figura 2) (Góngora-Canul, 2015).

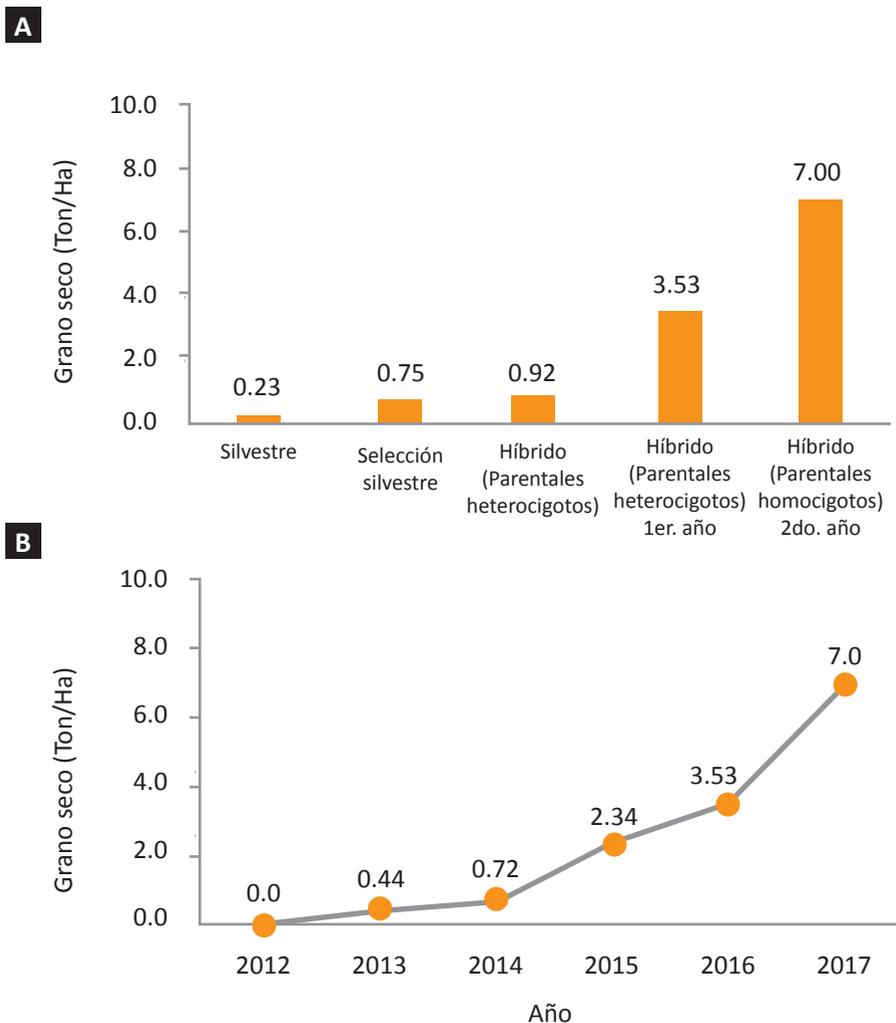


Figura 1. A) Rendimiento de diferentes tipos de selección genética, y B) progreso del rendimiento y mejoramiento genético de Jatronergy en Yucatán, México por varios años.

La mayoría de las investigaciones realizadas respecto del mejoramiento genético se han basado principalmente en la selección masal, el que consiste en la selección de plantas no mejoradas (silvestres, orígenes, accesiones, etc.), con rendimientos sobresalientes (número de frutos y semillas) y posteriormente coleccionar semillas de esas plantas individuales para siembra. Sin embargo, esta metodología tiene grandes limitantes y se ha comprobado que no es una opción viable para incrementar el rendimiento en *J. curcas* y otros cultivos (Aguilera-Cauich *et al.*, 2015). La razón biológica radica en que los frutos o semillas seleccionadas de esas plantas tienen un alto nivel de segregación (o variación fenotípica y genotípica), es decir, sólo contiene 50% de información genética de la madre (carga materna) y el otro 50% de su información genética del padre se desconoce, ya que se desconoce el origen del polen que fertilizó al óvulo, y ese grano de polen tiene altas posibilidades de producir una planta que no tenga rendimientos sobresalientes, si esto último ocurre, el rendimiento de plantas provenientes de semillas coleccionadas de plantas seleccionadas se reducirá. Además, aun cuando el polen provenga de otra planta con rendimientos sobresalientes como el de la madre, los rendimientos no se incrementarían en gran medida, ya que ambos padres son heterocigotos (diferentes alelos en su doble cadena de ADN), y la probabilidad de que exista la combinación (fertilización aleatoria) o reacomodo alélico de la fusión óvulo-polen que produzca una semilla que origine una planta con mayor rendimiento de semilla, es casi improbable por las millones de posibles combinaciones alélicas (recombinación) entre los gametos femenino y masculino (distribución aleatoria independiente de cromosomas) y el intercambio de genes o ADN entre cromosomas homólogos (crossing over) durante la meiosis (Figura 2) (Ahoton & Quenum, 2012)



Figura 2. Progreso del mejoramiento genético expresado en el incremento en el número de frutos por rama logrado por Jatronergy.

En *J. curcas*, la formación de híbridos de cruza intraespecíficas (diferentes accesiones de la misma especie de *J. curcas*) e interespecíficas (cruzas de diferentes especies del género *Jatropha*, p.e: *J. curcas* x *J. integerrima*) ya se han realizado (Putranto *et al.*, 2014). Sin embargo, ninguna de estas opciones ha demostrado incremento en el rendimiento por heterosis o vigor híbrido (fenómeno en que el individuo producto de la cruce de dos parentales supera en biomasa, velocidad de desarrollo y fertilidad a ambos padres) (Tar *et al.*, 2011). El incremento de rendimiento no ocurre porque los genomas de ambos parentales están heterocigotos y la infinidad de combinaciones alélicas para que produzca un individuo con rendimientos sobresalientes es casi imposible de que ocurra.

La opción de mejoramiento genético más viable y probada en *Jatropha* y otros cultivos sería realizar la hibridación verdadera, el cual consiste primero en producir las líneas parentales homocigotas por medio de endogamia (Góngora-Canul *et al.*, 2017) tradicional como la autopolinización hasta por cinco o más generaciones o por el método de dobles haploides (DH) y posteriormente hacer cruza híbridas (Figura 3).

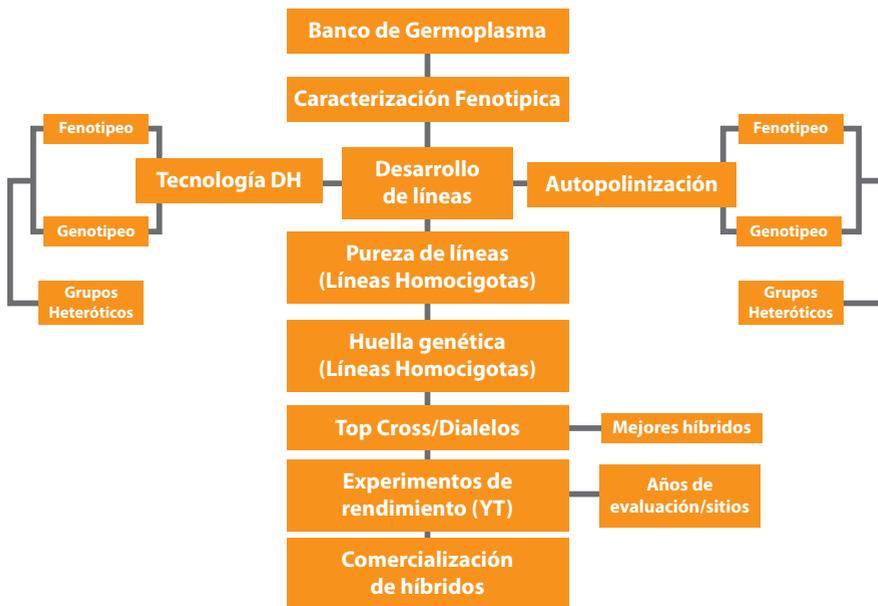


Figura 3. Estrategia de mejoramiento genético seguido por Jatronergy.

La producción de líneas endogámicas por autopolinización consiste en utilizar el polen de una flor para polinizar una flor de la misma planta (autógama, monoica) hasta cinco generaciones para purificar o lograr las homocigosis por fijación alélica; cabe resaltar que se deben seleccionar los mejores individuos o poblaciones en cada dosis de autopolinización para caracteres importantes como rendimiento, sanidad, altura de planta, etc. Este método es muy tardado, puede tomar hasta cinco años hasta llegar al nivel de endogamia S5 (96.87%) (Figura 4).



Figura 4. Proceso de autopolinización de plantas de *Jatropha curcas*.

Por otro lado, el método de doble haploidía (DH) consiste primeramente en la inducción de una planta haploide a partir de un óvulo no fertilizado o un grano de polen por métodos biotecnológicos la cual contendrá sólo la mitad de cromosomas ( $n$ ). Posteriormente, se duplica el set de cromosomas ( $2 \times n$ ) usando compuestos antimitóticos como colchicina, orizalina, etc. La diferencia de este método con el anterior es que el método de DH asegura el 100% de homocigosis, menor tiempo y más barato. Las plantas DH deben someterse a una prueba de citometría de flujo para corroborar que tales plantas están compuestas de células DH. Para acelerar el proceso de aclimatación de las plantas DH éstas pueden ser injertadas sobre plantas diploides conocidas por su rusticidad, capacidad de germinación, resistencia a sequía, etc. En México como en otras partes del mundo esta tecnología se está desarrollando en *Jatropha*, sin embargo, en otros cultivos como el maíz esta tecnología ya está estandarizada. Jatronergy está en proceso de registro de la patente de producción de plantas DH de *Jatropha* (Method for generating stable haploids of *Jatropha curcas* L. PCT/MX2016/050022, WO2017111574A1) (Figura 5).



Figura 5. Proceso de producción de plantas dobles haploides de *Jatropha curcas* L.

Una vez obtenidas las líneas endogámicas por cualquiera de los métodos, el siguiente paso es la caracterización fenotípica y genotípica de las líneas (aunque se puede hacer desde el banco de germoplasma original con materiales genéticos silvestres de donde se derivaran tales líneas). La caracterización fenotípica consiste en la toma de caracteres como rendimiento, altura de planta, sanidad, número de ramas, etc. (Figuras 6 y 7). Posteriormente, por medio de herramientas estadísticas, genéticas tradicional o molecular se separan grupos heteróticos que comparten ciertas características. Tal separación de grupos de materiales genéticos se puede realizar utilizando información del ADN mediante herramientas moleculares como los marcadores moleculares polimórficos como los SNPs, RFLPs, AFLPs y los SSRs (Xia *et al.*, 2018; Alipour *et al.*, 2017). Hasta los avances que se tienen hoy en día, el proceso de endogamia en *J. curcas* ha mostrado clara depresión endogámica sin que esto afecte la capacidad reproductiva de la planta.



Figura 6. Proceso de generación de líneas homocigotas de *Jatropha curcas* mostrando disminución de altura por depresión endogámica; en la figura de la izquierda es la accesión silvestre con más de 3 m de altura y la foto de la derecha es la línea derivada de la silvestre con un nivel de endogamia S4 con 1.5 m de altura desarrollado por Jatronergy.

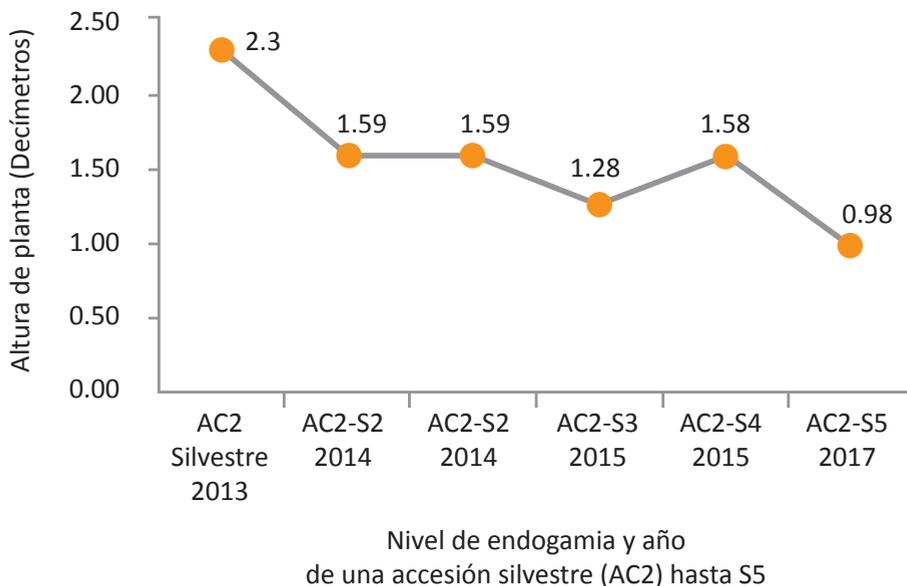


Figura 7. Disminución de altura por depresión endogámica en el proceso de generación de líneas homocigotas a partir de materiales silvestres hasta S5

Una vez separados los grupos heteróticos fenotípica y genotípicamente, se seleccionan parentales de los grupos más distantes genéticamente para realizar las cruza para la formación de híbridos F1 para asegurar que tales híbridos F1's expresen vigor híbrido o heterosis. La heterosis es el aumento en vigor y ésta se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$(\%)h = (F1i - MPi) / MPi \times 100$$

Donde  $h$  = Valor de heterosis (%), del carácter a evaluar,  $F1i$  = Valor obtenido para el carácter a evaluar en el Híbrido  $i$ ,  $MPi$  = Valor promedio entre ambos padres del Híbrido  $i$ , para el carácter evaluado. El Cuadro 1 muestra valores reales del porcentaje de heterosis de diferentes híbridos F1's, evidenciando que la mejor opción son las cruza de padres homocigotos con niveles de endogamias avanzados.

**Cuadro 1. Valores de heterosis (%) de la variable total de frutos cosechados en diferentes híbridos**

Tipo de Material genético	Material genético	Parentales y nivel de endogamia	Valor promedio de F1	Valor promedio de parentales	Heterosis (%) (# frutos cosechados)
Híbrido verdadero	ALJCH01	S3/S2	252.0	81.0	211.1
Híbrido verdadero	ALJCH03	S3/S2	487.0	95.5	409.9
Mestizo	P123/ ALJCH0X	Silvestre/ S4	2.80	73.77	-96.2
Híbrido no verdadero	C182	Silvestre/ Silvestre	185.07	99.13	86.7
Híbrido no verdadero	C192	Silvestre/ Silvestre	91.33	75.33	21.2
Híbrido no verdadero	R219	Silvestre/ Silvestre	302.32	211.9	44.0

Finalmente, estos híbridos tienen que evaluarse en diferentes ambientes y diferentes ciclos (al menos tres años) para asegurar su estabilidad (Figura 8). Las líneas homocigotas deben estar plenamente identificadas y rastreadas por medio del uso de un sistema de pedigrí y pedigrí fuente.



Figura 8. Estados y sitios de evaluación de híbridos precomerciales y comerciales marca Jatronergy, antes de salir al mercado para determinar su estabilidad en tiempo y espacio.

Los valores de heterosis también pueden expresarse en otros caracteres como los relacionados al tamaño de una semilla individual como lo refleja en la Figura 9, A. Se observa que el peso promedio de un grano de una muestra de n=100 del F1 supera a ambos parentales incluyendo al progenitor femenino y masculino, así como al parental silvestre precursor del parental femenino. También existen diferencias entre pesos promedios de grano de diferentes híbridos (Figuras 9, B y C) diferencia de tamaño y forma del parental hembra, macho, grano F1y progenitor material silvestre.

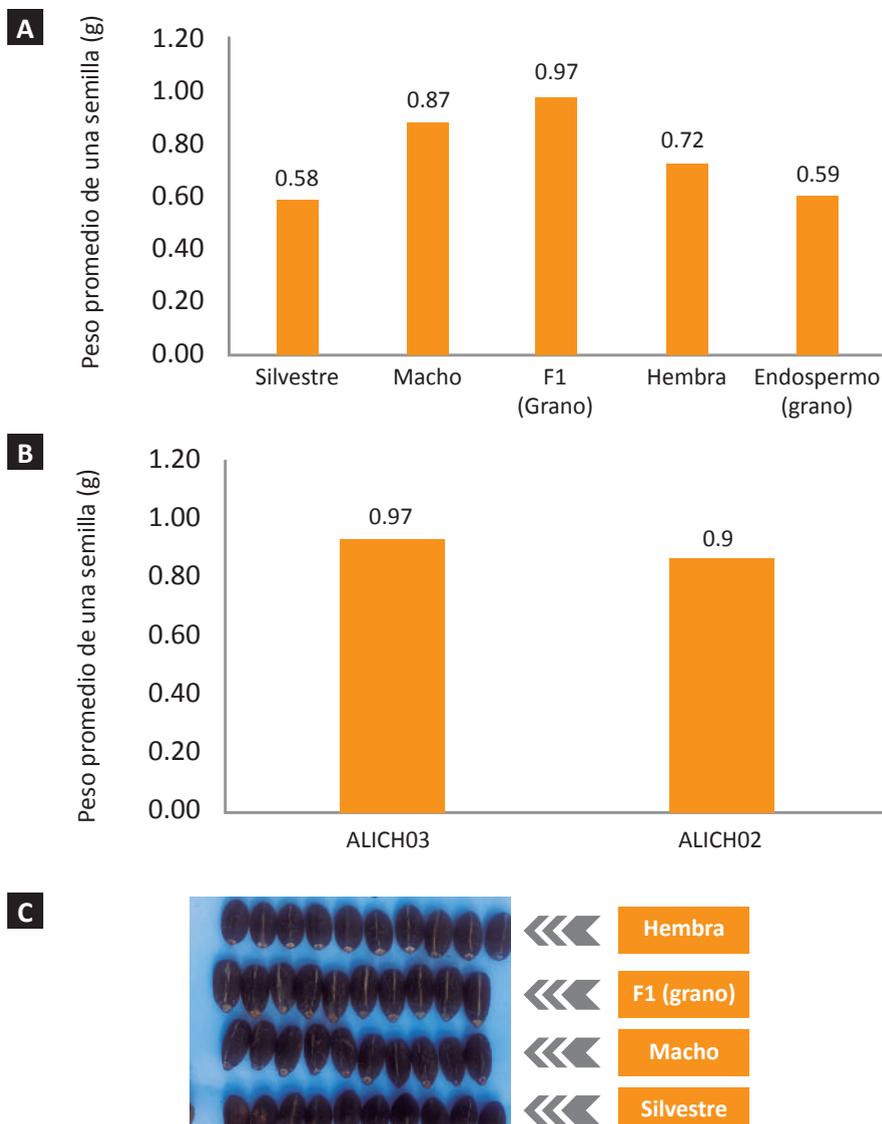


Figura 9. (A) Heterosis del peso de un grano ( $n=100$ ) del parental hembra, macho, grano F1 y peso del endospermo, (B) Peso de promedio de un grano de  $n=100$  de dos híbridos comerciales, y (C) Diferencia de tamaño y forma del parental hembra, macho, grano F1 y material silvestre.

Una vez generadas las líneas o híbridos con las características deseadas, éstos pueden volver a generarse tanto por vía sexual o asexual. En el caso de las líneas, consiste en realizar una dosis más de autopolinización o clonarse por estacas o esquejes, y en el caso de los híbridos consistiría en volver a realizar las cruza de los parentales clonados en lotes aislados de otros materiales no deseados que puedan contaminar la polinización natural al parental femenino. Para ello es necesario que el parental femenino sea dioico con el gen nativo FOF (female only flower), un tipo de esterilidad masculina nuclear, y el parental macho sea monoico (Figura 10) (Góngora-Canul *et al.*, 2017).



Figura 10. Lote de producción de semilla híbrida, aislado, mostrando un diseño de siembra de los parentales hembra y macho; y la biología floral de los parentales hembra con el gen FOF (dioico) y el parental macho monoico y fruto híbrido.

La reproducción asexual de líneas e híbridos es más viable para lotes de pequeña escala con fines experimentales, pues los costos de producción pueden ser altos. Ya que para lotes de grandes dimensiones de producción de semilla híbrida a escala comercial sería la siembra directa de plantas clonadas o incluso siembra directa de semilla. La reproducción asexual, por ser un proceso de clonación, los individuos producidos de una planta madre y padre homocigotos respectivamente, llevan exactamente la misma información genética y por ende aseguran la uniformidad en el rendimiento y logran que se mantenga si el ambiente es propicio y con un manejo agronómico adecuado.

El procedimiento de mejora genética mencionada anteriormente es un camino de mediano o largo plazo (hasta cinco años), pero con garantía de ser una alternativa a superar los rendimientos pobres del cultivo reportados en México y en el mundo que ha llevado al fracaso de pequeños y grandes proyectos. En México, la empresa Agroindustria Alternativa del Sureste, bajo la marca Jatronergy, cuenta ya con líneas parentales homocigotas y semilla híbrida comercial que coloca a México dentro de los pocos países que ofrecen semilla híbrida certificada. Los materiales genéticos mejorados comerciales son: *ALJCO1*<sup>®</sup>, *ALJCH01*<sup>®</sup>, *ALJCH02*<sup>®</sup> y *ALJCH03*<sup>®</sup>. Los híbridos comerciales ya se han sembrado de manera comercial o experimental (adaptación) en otros estados como Yucatán, Campeche, Tabasco, Sinaloa, Coahuila, Guanajuato y Baja California Sur (Figura 11). Jatronergy está desarrollando líneas e híbridos no tóxicos (esteres de forbol) colectados en Morelos y Oaxaca.

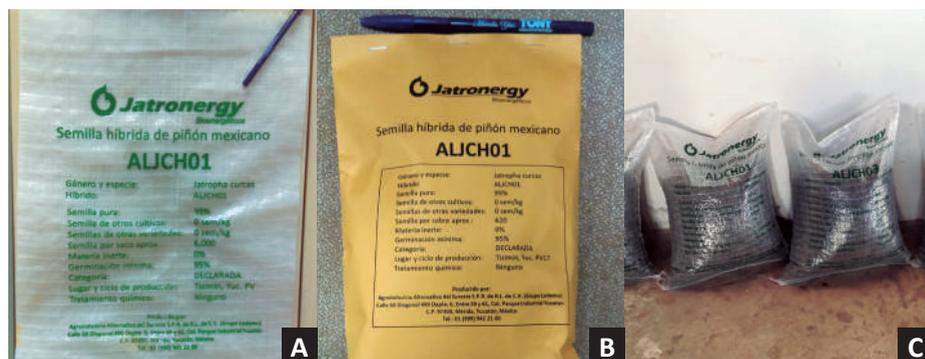


Figura 11. (A) Sacos de semilla híbrida comercial de *Jatropha curcas* marca Jatronergy y (B) Presentación 0.5 kg y (C) presentación de 5 kg de los híbridos comerciales ALJCH01 y ALJCH03.

La comercialización y uso de material genético mejorado (con reproducción sexual o asexual), con título de obtentor, deben ser protegidos en su propiedad intelectual y regulados por las autoridades locales como el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) para garantizar que cumplan con sus rendimientos óptimos, su calidad y otras características deseables como cultivo. Esto debe ser una corresponsabilidad de las autoridades competentes, productores y empresas productoras de semillas mejoradas.

El mejoramiento genético de *Jatropha* y sus técnicas de cultivo han avanzado en los últimos diez años elevando los rendimientos hasta 4x (7.0 ton/año de semilla seca) más comparado a los materiales silvestre. Jatronergy es una de las cuatro compañías, junto JOil, Jatropower y Jatrosolutions a nivel mundial, que ofrece semillas híbridas de *J. curcas* y servicios tecnológicos agronómicos.

## Conclusiones y perspectivas

Se ha avanzado en el mejoramiento genético de *Jatropha curcas* L. en México y en el mundo, esto se ha reflejado en disponibilidad comercial de materiales mejorados de *J. curcas*. Es indispensable considerar que uno de los métodos más efectivos que han incrementado el rendimiento es la hibridación intraespecífica con parentales homocigotos distantes genéticamente. Sin embargo, los híbridos deben ser evaluados por varios años y en diferentes sitios para asegurar su estabilidad antes de liberarlos al mercado. Con estos avances en el mejoramiento genético se han alcanzado hasta 6.0 ton/ha de semilla seca, lo cual, puede motivar a la siembra del cultivo sin tener la incertidumbre, como en años pasados, de que los materiales sembrados tendrán un pobre desempeño. Pese a los avances del mejoramiento genético y tecnología sobre su cultivo, aún faltan áreas de oportunidad como tener híbridos de alto rendimiento no tóxicos en el que el aceite, la pasta o el endospermo puedan ser utilizados para la alimentación humana o animal, o materiales que produzcan distintas calidades de aceite para propósitos diferentes, p.e. aceites para biocombustibles, para polioles, para emulsiones, etcétera.

## Bibliografía citada

- Aguilera-Cauich, E.A., Pérez-Brito, D., Navarrete, Y.A., López-Puc, G., Castañón, N.G., Sacramento, R.J., Rubio, A.C., Uc-Vázquez, A., Góngora-Canul, C., Mijangos-Cortés, J.O. 2015. "Assessment of phenotypic diversity and agronomic contrast in American accessions of *Jatropha curcas* L." *Industrial Crops and Products*, 77(23), 1001-1003.
- Ahoton, L.E. and Quenum, F. 2012. "Floral Biology and Hybridization Potential of Nine Accessions of Physic Nut (*Jatropha curcas*) L. Originating from three continents". *Tropicultura*, 30(4), 193-198.
- Alipour A., Tsuchimoto S., Fukui K. 2017. "Molecular Markers in *Jatropha*: Current Status and Future Possibilities". In: Tsuchimoto S. (eds.) *The Jatropha Genome. Compendium of Plant Genomes*. Springer, Cham. 288 pp.
- Góngora-Canul, C.C. 2015. "*Jatropha curcas* Varieties and its potential to produce biofuel". In: Sagarpa (Eds.), *Proceeding, of the International Congress of Jatropha curcas L.*, Cuernavaca, Morelos, Mexico, pp. 29-30,
- Góngora-Canul, C., Aguilera-Cauich, E.A. and Martínez-Sebastián, G. 2017. "Assessment of the flowering biology of the novel 'female only flower' trait in *Jatropha curcas* L." *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 9 (12), 208-216.
- Putranto, D.H., Tongkra, T., Chutteang, C., Sridokchan, C. 2014. "Growth and Physiological Response of *Jatropha* Interspecific Hybrid (*Jatropha curcas* x *J. integerrima*) under Salt Stress" *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 4 (2), 54-59.
- Tar, M.M., Tanya, P. and Srinives, P. 2011. "Heterosis of agronomic characters in *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.)". *Kasetsart Journal (Natural Science)* 45(4), 583-593.
- Xia, Z., Zhang, S., Wen, M., Lu, C., Sun, Y., Zou, M., Wang, W. 2018. "Construction of an ultrahigh-density genetic linkage map for *Jatropha curcas* L. and identification of QTL for fruit yield". *Biotechnol. Biofuels*, 11 (3), 3-10.

### Producción y manejo del cultivo de *Jatropha curcas* en Yucatán, México

Gregorio Martínez Sebastián<sup>1</sup>, Carlos Cecilio Góngora Canul<sup>1\*</sup>, Alberto Uc Vázquez<sup>2</sup>, Guadalupe López Puc<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Agroindustria Alternativa del Sureste SPR de RL de CV, calle 60 Diagonal Núm 490 Depto. 6, Parque Industrial Yucatán, Mérida, Yucatán, CP 97300 Tel. 999 9422100.

<sup>2</sup> Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Sede Sureste. Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, tablaje catastral 31264, km 5.5 carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto, Yucatán, México, CP 97302. Tel. 01 999 9202671.

Autor de correspondencia: \*carlos.gongora@agroindustria.com.mx

#### Resumen

Como resultado de la investigación y desarrollo de la empresa Agroindustria Alternativa del Sureste en experimentos agronómicos específicos como: densidad de plantación, fertilización, riego, control de plagas y enfermedades, asociación de cultivos, entre otros, en una superficie plantada de 1,500 hectáreas de *J. curcas* a partir de 2010, junto con el acompañamiento de personal científico del CIATEJ (Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.) Sede Sureste, se integró información útil para la producción del cultivo de *Jatropha* en la península de Yucatán, con el objetivo de que sirva de guía técnica y contribuya a contar con plantaciones productivas y sustentables.

Bajo un enfoque de procesos y mejores prácticas para la producción de *J. curcas*, se describe el cultivo de *Ja-*

*trophia*, incluyendo los temas siguientes: la producción de planta en vivero por semilla y propagación vegetativa a través del enraizamiento de estacas; labores de preparación de terreno, densidades de siembra, plantación por estacas y plantas con cepellón, siembra directa de semillas, control de malezas, riego, fertilización, podas, floración y producción, cosecha, despulpado de frutos, secado y almacenaje de grano.

Adicionalmente, se describen cinco variedades (híbridos) de *Jatropha* para registro ante el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), mismos que pueden generar rendimientos de grano de 1.5 a 3.5 ton/ha en su primer ciclo de producción y más de 6 ton/ha en el segundo ciclo utilizando el sistema de producción que se describe en este capítulo.

## Palabras clave

*Jatropha curcas*, producción, manejo del cultivo

## Introducción

La planta de *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) crece bajo condiciones tropicales y subtropicales, puede tolerar condiciones de sequía y baja fertilidad del suelo; considerando su capacidad para crecer en suelos pobres, puede ayudar a la recuperación de tierras erosionadas y aumentar la fuente de empleo en estas regiones. Debido a que sus productos y derivados no se utilizan en la alimentación humana y además no se considera como un cultivo forrajero, no compite con cultivos de valor comercial o alimentario. El interés actual de esta especie se debe principalmente a su uso potencial como cultivo bioenergético, ya que de sus semillas se puede extraer aceite con buenas características para la producción de biodiésel, polioles, emulsiones, etcétera (Hawkins y Wigglesworth, 2017). La pasta obte-

nida como subproducto en el proceso de extracción de aceite, actualmente está siendo investigado para su aprovechamiento integral en la alimentación animal.

Como parte del proyecto “Mejoramiento genético de *J. curcas* para generar al menos una variedad con alto rendimiento agronómico, alto contenido de aceite y baja toxicidad para la producción de biodiésel”, Clave: Sagarpa-Conacyt 163502 , se realizaron diversos ensayos de campo para determinar las mejores condiciones para el cultivo de *J. curcas*, entre los que sobresalen los experimentos agronómicos como: densidad de plantación, fertilización, riego, podas, control de plagas y enfermedades, asociación de cultivos, entre otros. Los resultados principales y más importantes se integran en este documento elaborado por personal de la empresa Jatronergy en colaboración con investigadores del CIATEJ. Los ensayos se desarrollaron en la región de Tizimín, Yucatán, y fueron validados en las localidades de: Mérida, Yucatán; Hecelchakán, Campeche, y Emiliano Zapata, Tabasco, con el objetivo de generar información que sirva de guía técnica para el cultivo de *J. curcas* en la región y contribuya al empleo de buenas prácticas del cultivo (Pérez-Vázquez *et al.*, 2013) para contar con plantaciones productivas y sustentables.

### *Jatropha curcas* L.

*J. curcas* es una especie perenne, monoica, perteneciente a la familia de las Euphorbiaceae, nativa de México y Centroamérica, ampliamente cultivada en Centroamérica, África y Asia. En México se distribuye naturalmente en forma silvestre en los estados de Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Morelos, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, Sinaloa, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán. Las primeras plantaciones comerciales se establecieron en 2006 en los estados de Chiapas y Michoacán, entidades que impulsaron programas de desarrollo para la producción de biocombustibles; también existen plantaciones en los estados de Sinaloa, Yucatán, Veracruz, Morelos, Oaxaca, Tamaulipas y San Luis Potosí (Díaz-Fuentes, 2015; Valdés *et al.*, 2014; Zamarripa *et al.*, 2008).

Las frutas son cápsulas inicialmente verdes, desde que se forman hasta que inicia su maduración. Las dimensiones del fruto son de 2.5 a 4 cm de largo por tres cm de ancho, elipsoidales y lisas, que cuando maduran van cambian-

do a amarillas y posteriormente a café oscuro. La planta según la variedad puede producir varias cosechas durante el año, si la humedad del suelo es adecuada y las temperaturas son suficientemente altas (25-33 °C). Cada inflorescencia produce un racimo de 10 frutos o más, dependiendo del material genético. El desarrollo del fruto necesita de 60 a 90 días desde la floración hasta que madura (Toral *et al.*, 2008).

Las semillas de *J. curcas* poseen de 32-40% de aceite que puede ser convertido a biodiésel mediante transesterificación de los ácidos grasos. La conveniencia de conversión del aceite de *J. curcas* a biodiésel ha sido claramente demostrada por diversos investigadores (Foidl *et al.*, 1996; Francis *et al.*, 2005; Trabucco *et al.*, 2010; Tiwari *et al.*, 2007; Teniente *et al.*, 2011). Actualmente, el aceite se está evaluando para la producción de poliuretano (Hawkins y Wigglesworth, 2017).

Los frutos producen tres almendras negras, cada una aproximadamente de dos cm de largo y un cm de diámetro, las dimensiones de las semillas varían en una misma planta y puede ser mayor entre las semillas de plantas con diferente procedencia. Los rangos de peso de las semillas varían entre los 0.50 y 0.90 gramos cada una, con un promedio de 1,333 semillas por kilogramo. La semilla se cosecha cuando la cápsula está madura (fruto color amarillo o café).

Las semillas generalmente no son comestibles debido a que contienen componentes tóxicos como los ésteres de forbol y curcinas. Sin embargo, algunos reportes mencionan la existencia de materiales genéticos comestibles en algunas regiones de México. Las semillas consisten en una testa dura que representa alrededor de 37% en peso total y un grano blanco y suave que representa el 63% restante. Las semillas secas tienen un contenido de humedad de 7% y 32 a 40% de aceite (Achten *et al.*, 2008).

## Requerimientos agroecológicos

*J. curcas* se desarrolla preferentemente en regiones localizadas al nivel del mar hasta una altitud de 1500 metros sobre el nivel del mar. Crece en un clima

tropical o subtropical, en la actualidad el cultivo crece en áreas tropicales de todo el mundo, con una precipitación pluvial desde 200 hasta 1500 mm anuales. La planta no tolera períodos largos con exceso de humedad en el suelo (máximo una semana, mismo que representaría un impacto negativo en la producción). Resiste largos períodos de sequía, hasta un año sin precipitaciones cuando la planta se encuentra establecida. Pero la planta en los primeros meses de su establecimiento es muy sensible a la falta de humedad en el suelo, primero se defolia, después se estrangulan los tallos y posteriormente muere. Es importante considerar que, aunque la planta resiste los períodos secos, la productividad se ve afectada (Maes *et al.*, 2009) y la susceptibilidad a enfermedades también.

Por otro lado, el cultivo de *J. curcas* se desarrolla adecuadamente a una temperatura media de 18 a 24 °C, y puede soportar heladas de corta duración y temperaturas máximas mayores a 40 °C. La planta requiere luminosidad para un desarrollo óptimo, ya que el sombreado reduce la velocidad de crecimiento y fructificación, por lo que, si el cultivo de *J. curcas* se asocia con otros cultivos, esta última especie no debe superar la altura de la *Jatropha* para evitar el sombreado.

La planta de *J. curcas* crece adecuadamente sobre suelos aireados y con buen drenaje. Los suelos más adecuados son los de textura franco arenoso y franco limoso por tener un buen drenaje y suministro de nutrientes. Los suelos de textura fina (arcillosos) sólo son adecuados en condiciones con baja precipitación y adecuada pendiente, en este caso *J. curcas* puede ser muy productiva, porque estos suelos cuentan con un buen suministro de nutrientes, pero deficiente drenaje. Considerando que la planta no tolera el exceso de humedad en el suelo, la producción en suelos de textura arcillosa es solamente adecuada cuando no existe saturación de humedad por períodos largos.

Por otra parte, los suelos de textura gruesa (arena, franco arenoso, arena franca) son suelos que drenan rápidamente por lo que requiere de mayor frecuencia de agua. Estos suelos por lo general tienen un contenido bajo de nutrientes, por lo que necesitará más fertilización para mantener su productividad.

El pH del suelo adecuado para el cultivo de *Jatropha* es de 5.5 a 8.5. El crecimiento de la planta es limitado en condiciones de mayor acidez o alcalinidad.

*Jatropha* puede sobrevivir en suelos poco profundos, con bajo contenido de nutrientes, salinidad y humedad limitada, sin embargo, su crecimiento y producción serán limitados. Los mayores niveles de nutrientes y materia orgánica en el suelo se traducen en una mayor producción (Zamarripa *et al.*, 2008).

### Producción de planta en vivero

La producción de plantas en condiciones de vivero debe realizarse en función a las necesidades de superficie a plantar. Las plantas de *Jatropha* se pueden producir por semilla o asexualmente por estacas y esquejes. A continuación, se describen los procesos de producción de cada sistema.

### Producción de planta por semilla

El proceso de producción de planta por semilla implica las etapas siguientes: germinación de la semilla y trasplante en bolsa, preparación de sustrato y llenado de bolsas, crecimiento y mantenimiento de plantas y preparación de las plantas para siembra y salida de vivero.

La semilla de *J. curcas* no tiene una germinación uniforme, por lo que se recomienda germinar en charolas o huacales con peat moss como sustrato y humedad a capacidad de campo, condiciones de sombreado y temperatura ambiente. Bajo estas condiciones, las semillas germinan a los 5 días y deben trasplantarse en bolsas con sustrato. Se recomienda repetir esta actividad 10 días después de la germinación de las primeras semillas y procurando mantener la humedad del sustrato aplicando riegos cuando sea necesario, lo anterior asegura la germinación de todas las semillas viables.

Para el crecimiento de plantas de *Jatropha* recién germinadas se sugiere utilizar el sistema de bolsa negra para plantas de 10 x 20 cm (capacidad para 1 kg de sustrato aproximadamente). El sustrato que ha funcionado es suelo cribado y mezclado con estiércol composteado de bovino, en una proporción de 3:1. Las plantas recién sembradas en la bolsa deben mantenerse durante tres semanas bajo una malla sombra de 50%, con riegos diarios para mantener la humedad del suelo a capacidad de campo. Además, se recomienda la aplicación de fertilizantes foliares o en drench semanalmente, con macro

y micronutrientes, en especial con mayor concentración de fósforo para incrementar el volumen del sistema radicular. Realizar monitoreos diariamente sobre síntomas de plagas y enfermedades y aplicar control en caso de requerirse de acuerdo con la guía de plagas y enfermedades de *Jatropha* (Uc-Vázquez *et al.*, 2018).

Las plantas propagadas por semilla alcanzan la altura y vigor adecuados para el trasplante en campo de 6 a 8 semanas después de la germinación. Para lo cual se sugiere realizar una aplicación foliar de insecticida y fungicida como preventivo. Además de realizar riego pesado antes de la salida de planta a campo. La planta lista para el trasplante debe tener mínimo 1 cm de diámetro medido a la altura del cuello y debe tener de 30 a 50 cm de altura y sin presencia de plagas o enfermedades.

### Producción de planta por estaca

La producción de plantas por estacas es un método asexual que permite clonar a plantas seleccionadas como sobresalientes por características de interés, como productividad, resistencia o tolerancia a enfermedades, mantener a la planta original para fines de investigación y/o conservación, entre otras. Con este método se obtiene en promedio 80% de enraizamiento y el procedimiento es el siguiente:

Selección y obtención de estacas a partir de plantas de campo, siembra de estacas en bolsas con sustrato, crecimiento de plantas en vivero, preparación para el trasplante y salida de las plantas del vivero.

La propagación por estacas de *J. curcas* se realiza generalmente en el período de sequía ya que la humedad en verano favorece el desarrollo de enfermedades, entre los que sobresale la pudrición del pie, por lo que el porcentaje de enraizamiento es menor a 50%. La propagación por estacas inicia con la selección de ramas lignificadas de los materiales genéticos que se requieren propagar. Cortar a una longitud de 25 cm, las ramas mayores a 1.5 cm de diámetro. Preparar bolsas de 10 x 20 cm con la mezcla de sustrato compuesto por tierra y estiércol (3:1) y humedecer a capacidad de campo. Colocar las estacas al centro de la bolsa enterradas a 5 cm de profundidad. Algunos autores reportan el uso de

reguladores de crecimiento para el enraizamiento (Dardon-Zunun *et al.*, 2015) sin embargo, bajo nuestras condiciones los enraizadores no fueron utilizados.

Las estacas recién sembradas en la bolsa deben colocarse bajo una malla sombra (50%) al menos durante tres semanas, durante el cual se recomienda mantener el riego de las plantas a capacidad de campo a partir de que se observan brotes vegetativos en las estacas. Aplicar fertilizantes (macro y micronutrientes en fórmulas compuestas) en drench una vez por semana a partir de la fecha de inicio de riegos. Realizar monitoreos continuos sobre plagas y enfermedades y, en caso de que se detecten algún síntoma, aplicar manejo integral de acuerdo con la *Guía de plagas y enfermedades* (Uc-Vázquez *et al.*, 2018).

Las plantas propagadas mediante estaca, generalmente alcanzan el tamaño y vigor adecuados para el trasplante en campo entre 8 y 10 semanas después de la siembra de la estaca en bolsas con sustrato. Se sugiere realizar la aplicación foliar de insecticida y fungicida como preventivo, además de un riego pesado antes de la siembra de las plantas en campo.

Las plantas obtenidas mediante estaca enraizada deben presentar, antes del trasplante en campo, brotes vigorosos con al menos 10 cm de longitud, lo que implica de 30 a 50 cm de altura total de la planta, sin presencia de plagas o enfermedades y con un sistema radical fortalecido que mantiene compacto el cepellón al retirarla bolsa al momento de la siembra en campo (Martínez *et al.*, 2018).

## Establecimiento de la plantación

### Selección del terreno

La plantación de *Jatropha* debe establecerse en terrenos con pendiente menor del 12%, no inundables, de acceso fácil y ubicados en regiones con alto o mediano potencial productivo para *Jatropha* (Zamarripa y Díaz, 2008).

Una vez definido el predio, realizar el reconocimiento y mapeo con GPS del predio. Posterior al mapeo, planear la infraestructura de caminos de toda el área susceptible de ser cultivado, considerando que se requerirán brechas (ca-

minos) para extraer la cosecha y realizar el mantenimiento de la plantación. Se sugieren brechas de 6 m de ancho delimitando cada hectárea a plantar (Martínez *et al.*, 2018).

### Preparación de terreno

En las áreas definidas para establecer el cultivo de *Jatropha* se deben realizar las actividades siguientes:

Eliminar la maleza en forma manual o mediante el uso de tractor agrícola con desvaradora, en función de la superficie y disponibilidad de personal y equipo.

El barbecho se realiza en suelos compactados por uso agrícola y donde los suelos tengan una profundidad mayor a 50 cm. Consiste en arar el suelo para remover de 25 a 30 centímetros la capa superficial. El objetivo es mejorar sus condiciones físicas, además de incorporar los residuos vegetales existentes.

El rastreo se realiza para remover la capa superficial del suelo, facilitando un mejor desarrollo de las raíces de las plantas establecidas. También permite al suelo la retención de la humedad por mayor tiempo. Esta actividad se realiza con la rastra accionada por tractor agrícola. Dependiendo de la textura del suelo, se pueden realizar uno o dos pasos. Se pueden rastrear suelos donde se ha hecho el barbecho o directamente en suelos sin barbechar y donde la pedregosidad del suelo lo permita (Martínez *et al.*, 2018).

### Densidad de plantación

La densidad de plantación constituye uno de los elementos que más influye en los rendimientos agrícolas. Todos los cultivos requieren una densidad óptima, determinada por el área necesaria para un adecuado desarrollo de cada planta. Si el área resulta insuficiente ocurre una competencia entre las plantas por los elementos esenciales para su desarrollo: nutrientes, agua y luz, lo que disminuye la productividad. Por otro lado, establecer el cultivo con un menor número de plantas, los recursos son subutilizados por el cultivo, de ahí la importancia de optimizar la cantidad de plantas a establecer por unidad de superficie.

El número de plantas de *J. curcas* sembradas por hectárea depende de la altura promedio y del porte o hábito de crecimiento (erguido, semierguido o abierto) de la variedad a establecer. Los arreglos topológicos (espaciamientos) más utilizados son de 3 m x 2 m (1,667 plantas/ha) y 3 m x 1.5 m (2,222 plantas/ha). Sin embargo, también se han evaluado densidades de siembra mayores a 5,000 plantas por hectárea, en plantas de porte bajo y espaciamientos de 4 m x 1.5 m cuando se asociaron cultivos de *Jatropha*-maíz para permitir el paso de la sembradora de maíz. Más detalles de las densidades, dependiendo de la variedad, se pueden encontrar en el reporte de Martínez y colaboradores (2018).

### Plantación con estaca directa

El establecimiento del cultivo de *J. curcas*, a partir de siembra directa de las estacas en campo, implica la siembra de estacas cortadas de la planta y llevadas a la siembra sin el enraizamiento previo en vivero. Este método de siembra ofrece algunas ventajas debido a que se evita el establecimiento y mantenimiento de las plantas en vivero. Sin embargo, los porcentajes de sobrevivencia de las plantas en campo son menores, comparados con la sobrevivencia de estacas enraizadas, la cual es cercana al 100% cuando ésta se realiza en el período seco. Sin embargo, algunos autores reportan que la floración se induce antes en plantas propagadas por estaca en comparación con las plantas propagadas por semilla (Mejía *et al.*, 2015).

El establecimiento de la plantación mediante siembra directa de estacas en campo se debe realizar en el período de sequía en los meses de marzo y abril ya que en el período lluvioso las estacas suculentas son más susceptibles a la pudrición del pie por lo que los porcentajes de enraizamiento son muy bajos. Para este propósito se requiere seleccionar plantas con ramas maduras (del ciclo de crecimiento del año previo), cortar las estacas de 50 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro mínimo. Las estacas cortadas deben ser protegidas con papel periódico o cualquier otro material que evite el daño físico, en caso de ser necesario el material debe almacenarse en un área sombreado por un corto tiempo. La siembra de las estacas en el campo se realiza colocando las estacas en los puntos predeterminados entre 10 y 15 cm de profundidad, apisonando alrededor de la misma para eliminar espacios de aire y mantenerla firme en el suelo (Figura 1).



Figura 1. Plantación realizada con estacas. A) En proceso de plantación, B) Inicio de brotación de estaca.

### Siembra de plantas de vivero con cepellón

El establecimiento de una plantación de *J. curcas* con plantas de vivero implica el uso de plantas generadas por semilla o por estacas enraizadas, la ventaja principal de utilizar este tipo de material en campo resulta en que las plantas con un sistema radical desarrollado y follaje permiten un rápido crecimiento de las plantas después de su establecimiento en campo.

El establecimiento de plantas con cepellón debe realizarse al inicio del período de lluvias, cuando el suelo esté con humedad para que las plantas sobrevivan e inicien un rápido crecimiento. Cuando se cuenta con sistema de riego en la plantación se puede plantar durante todo el año. Sin embargo, hay que considerar que durante el invierno las plantas disminuyen su crecimiento y pueden ser afectadas por otros factores físicos o bióticos. El proceso de plantación implica lo siguiente:

Apertura de cepas con pico, pala o barreta de dimensiones mayores al tamaño de cepellón; solicitud y recepción de planta del vivero; transporte de la planta al sitio a planta; distribuir las plantas colocando una en cada cepa;

retirar la bolsa de la planta de vivero, colocarla en la cepa, cubrir con suelo y apisonarla alrededor de la planta (Figura 2).



Figura 2. Plantación de *J. curcas*: (A) Apertura de cepas y proceso de plantación, (B) Plantación de un año de edad, en período de crecimiento vegetativo.

Actualmente se está desarrollando una técnica de siembra mecanizada utilizando una sembradora de maíz, modificando los platos que permitan la siembra de la semilla de *J. curcas* y de maíz, para contar con un cultivo intercalado y aprovechar el suelo con cultivo anual en el período en que las plantas de *Jatropha* son pequeñas.

### Híbridos de *J. curcas*

El principal objetivo del mejoramiento genético en *J. curcas* es producir híbridos para incrementar la productividad de grano y aceite para hacer rentable el cultivo para la producción de biocombustibles y otros subproductos. Desde 2012 CIATEJ en colaboración con Agroindustria (Jatronergy) desarrollaron un proyecto para obtener nuevas variedades con apoyo del fondo Sagarpa-Conacyt; en el marco de este proyecto se obtuvieron dos híbridos: *J. curcas* Ochkan con una producción de 4 ton de semillas por ha, y *J. curcas* Sikilté, con la obtención de hasta 4.5 ton/ha. Simultáneamente, Jatronergy generó híbridos y desarrolló el método de dobles haploides, para posteriormente la realización de las cruces de polinización controlada. Con los híbridos obtenidos la producción se incremen-

tó de 100 kg/ha en 2012 a más de 4 ton/ha en 2016 con los híbridos ALJCH01 y ALJCH03.

La selección de los híbridos se realizó tomando en cuenta la producción, tolerancia a enfermedades (pudrición de raíz, mancha de fruto y mancha foliar), porte bajo de la planta, dehiscencia del fruto, entre otros caracteres. Los híbridos fueron evaluados en experimentos de pruebas de rendimiento en diferentes localidades (ambientes) para determinar su adaptación y productividad. En el Cuadro 1 se presentan las características de cinco híbridos generados (Góngora Canul *et al.*, 2018). En la Figura 3 se muestra el aspecto de los frutos de los híbridos.

**Cuadro 1. Características agromorfológicas de híbridos de *J. curcas* desarrollados por Jatronergy\* y CIATEJ-Jatronergy\*\***

Característica /Hibrido	<i>J. curcas</i> ALJCH01*	<i>J. curcas</i> ALJCH03*	<i>J. curcas</i> Var ALJC01*	<i>J. curcas</i> Sikilte**	<i>J. curcas</i> Ochkan**
Rendimiento año 1 (ton/ha)	3.5	3.5	1.5	1.1-2.0	0.9-2.1
Rendimiento promedio año 2 (ton/ha)	6.0	6.0	3.5	4.5	4.0
Rendimiento por planta (kg)	1.6	1.6	0.7	0.6-1.0	0.4-1.0
Plantas /ha	2,200	2,200	2,200	2,200	2,200
Porte	Semierguida	Semierguida	Abierta	Semierguida	Semierguida
Altura	2.03	2.10	2.10	1.91	1.71
Núm. de ramas principales	5.4	5.0	4.5	5.0	5.0
Tolerancia a enfermedades	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Intermedia	Intermedia

Continuación Cuadro 1...

Característica /Híbrido	<i>J. curcas</i> ALJCH01*	<i>J. curcas</i> ALJCH03*	<i>J. curcas</i> Var ALJC01*	<i>J. curcas</i> Sikilte**	<i>J. curcas</i> Ochkan**
Tolerancia a sequía y temperaturas bajas	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena
Tipo de inflorescencias	Mayormente masculinas	Mayormente masculinas	Mayormente masculinas	Sólo flores femeninas (FOF)	Mayormente masculinas
Peso medio de una semilla (g)	0.89	0.97	0.73	0.94	0.86
Número de semillas/kg	1,116	1,031	1,370	1,064	1,163

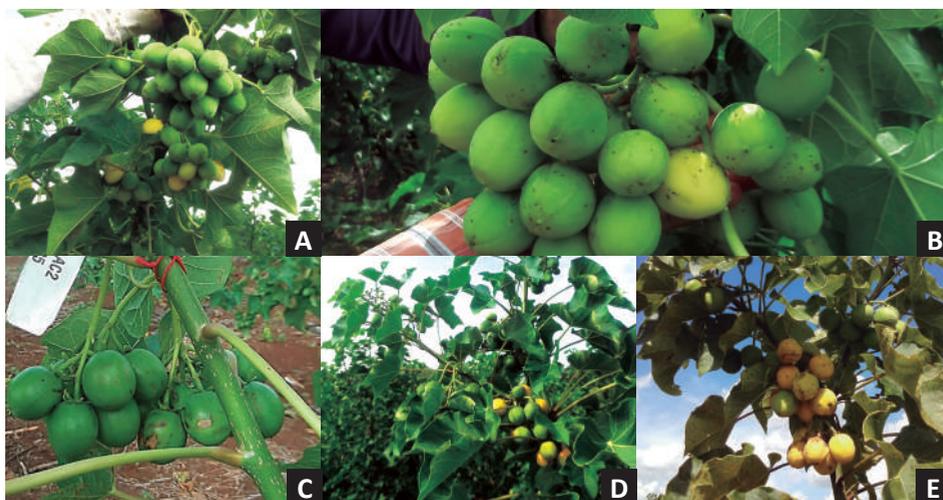


Figura 3. Híbridos de *J. curcas*: (A) ALJCH01, (B) ALJCH03, (C) ALJC01, (D) Sikilte, (E) Ochkan.

## Manejo agronómico del cultivo

En diferentes trabajos publicados se reporta la evaluación de prácticas culturales para *J. curcas*, llegando a la conclusión de que la planta necesita un deshierbe oportuno, apropiada fertilización, irrigación y poda. Con estas prácticas el rendimiento puede mejorarse.

### Control de malezas

Las operaciones regulares de deshierbe permiten que la planta tenga acceso a los recursos del suelo, evitando malezas competitivas (Kumar *et al.*, 2016). La competencia resulta en la disminución del crecimiento de las plantas, el nitrógeno en las hojas, el potencial de agua, la calidad y rendimiento de los frutos. Las malezas pueden ser hospederas de enfermedades y plagas, que también dificultan la irrigación y la cosecha. Los efectos mencionados hacen que sea una necesidad el manejo de malezas en la producción de *J. curcas*.

En terrenos mecanizables es posible aplicar un herbicida preemergente antes de establecer la plantación, con esto se mantendrá limpia durante los primeros 60 días. En el período de lluvias comprendido de mayo a octubre para Yucatán, México, el crecimiento de malezas es acelerado, por lo que aquí es donde se deben concentrar las actividades de control. El control de malezas se puede realizar mediante chapeo manual con machete, coa o desbrozadora, combinando control químico. Los chapeos se deben hacer cuidando de no dañar los tallos porque las heridas en la base de las plantas permiten la infección de enfermedades como la pudrición de tallo y raíz. Antes de aplicar herbicida es necesario realizar un “cajeteo” o chapeo alrededor de cada planta para evitar aplicaciones al tallo y cortar los bejucos y otras malezas cercanas a las plantas de *J. curcas* (Góngora-Canul, 2018).

El control químico permite ahorro de costos en el control de malezas por la disminución de mano de obra, se recomiendan herbicidas de contacto (paraquat) para malezas de hoja ancha y glifosato para pastos. Se recomienda no hacer más de dos aplicaciones de herbicida por año (Góngora-Canul, 2018).

## Riego

*J. curcas* soporta muy bien la sequía y puede vivir casi completamente de la humedad del aire. Esta es la razón por la cual se dice que no requiere mucha agua. Sin embargo, el riego puede mejorar el rendimiento de semilla, especialmente en el establecimiento de la plantación, multiplicando hasta ocho veces el rendimiento de la plantación.

Las respuestas fisiológicas a la falta de agua varían con el genotipo (Costa *et al.*, 2012). Es necesario estudiar cómo los diferentes genotipos tienen la capacidad para adaptarse a diferentes ambientes y condiciones climáticas. La recuperación es importante para la sobrevivencia de la planta. El balance de carbono depende de la tasa fotosintética cuando hay ó no hay agua (Miyashita *et al.*, 2005).

Por lo general, después del segundo año el sistema de riego no es necesario a menos que el suelo sea arenoso. *J. curcas* puede permanecer sin agua hasta por dos años (Kumar *et al.*, 2016). Aparte del agua, los rendimientos dependen de los nutrientes, la temperatura, el agua y la edad de la plantación y las características del agroambiente, la genética, el método de propagación, la densidad de cultivo y poda. Openshaw (2000) predijo el rendimiento en el rango de 0.4-12 T / ha. Cuando el agroambiente es adecuado para el crecimiento de la *Jatropha*, se puede alcanzar un promedio de 5 ton/ha de semilla seca (Egler *et al.*, 2017). En terrenos baldíos con bajas precipitaciones (250 mm), el rendimiento disminuye tan rápidamente que la viabilidad económica de la plantación se ve afectada.

El riego tiene la finalidad de suministrar agua para el desarrollo de los cultivos y permitir así la producción durante todo el año. *J. curcas* requiere al menos 900 mm de humedad anualmente, sin embargo, se obtienen incrementos en la producción cuando es posible contar con sistema de riego en el período de estiaje. El riego por goteo mediante cintilla es el recomendable, colocando una cintilla de cada lado de la fila de plantación, a 30 cm de la base en los primeros tres meses y posteriormente a medio metro de las plantas (Góngora-Canul *et al.*, 2018).

Góngora-Canul y colaboradores (2018) evaluaron el efecto del riego en *J. curcas* Var ALJC01, y observaron el 30% de incremento en la producción en una parcela experimental con riego comparada con una parcela sin riego. El riego

consistió en mantener la humedad del suelo mayor a 20% medido a 20 cm de profundidad, lo cual se logró con un riego semanal de una hora en promedio.

## Nutrición

*J. curcas* puede sobrevivir en suelos pobres, sin embargo, su productividad estará comprometida en estas condiciones, por lo que es necesario suministrar nutrimentos para obtener buenos rendimientos. Independientemente de que *J. curcas* sobrevive en suelos de baja fertilidad, los rendimientos pueden mejorar si se aplica estiércol que contenga N, P, K y se utiliza poca cantidad de calcio, azufre y magnesio. En caso de cultivos trasplantados, los fertilizantes se deben aplicar sólo después de que las plantas se establezcan. Las dosis de aplicación de fertilizante se han estimado, pero las cantidades necesarias para el desarrollo del cultivo cambian de acuerdo con la edad de la plantación y el tipo de suelo (Kumar *et al.*, 2016).

*J. curcas* responde bien a fertilizantes tanto orgánicos como inorgánicos. Después de sembradas las plántulas se puede iniciar la fertilización desde los 20 días y se debe realizar anualmente para mantener la fertilidad del suelo y la productividad del cultivo (Sagar *et al.*, 2011).

En experimentos en el oriente de Yucatán, los mejores resultados se obtuvieron utilizando 40 g por planta de triple 17 o de fosfato diamónico (DAP: 18-46-00) y adicionando micorrizas (1 g/planta) en drench un mes posterior al establecimiento (Góngora-Canul *et al.*, 2018).

El uso de fertilizantes orgánicos a base de estiércol y/o abonos verdes aumenta el vigor de las plantas, mostrando efectos favorables en la textura y estructura del suelo, la retención de humedad y el contenido de materia orgánica.

La vegetación se correlaciona inversamente con la floración y la fructificación por lo que se debe equilibrar la adición del potasio (P), el fosfato (K) y el agua dependiendo de la etapa fenológica de la planta. El K promueve el grosor de la pared celular, y mejora la tolerancia a las enfermedades, en comparación con N que tiene el efecto opuesto. Además, la fertilización con N sólo tiene sentido si hay agua disponible (Carels, 2009).

Es recomendable analizar la fertilidad de los suelos de las áreas donde se haya establecido la plantación tomando una muestra compuesta en cada tipo de suelo encontrada como: suelos rojos, suelos oscuros y pedregosos, suelos “con laja”. Con el resultado del análisis hay que identificar los macroelementos faltantes críticos y los microelementos para enfocar la fertilización a estos elementos. Preferentemente, emplear fuentes de fertilizantes de reacción ácida (sulfatos), ya que los suelos de la península de Yucatán por lo general son de pH neutro a ligeramente alcalino (Góngora-Canul, 2018).

La forma de aplicar el fertilizante es enterrarlo a 30 cm de distancia de la base de la planta en la primera aplicación, y posteriormente aplicarlo en fertirrigación en la línea de goteo alternando los puntos de aplicación. La plantación debe estar libre de malezas al momento de la fertilización, de lo contrario, éstas también estarán aprovechando el fertilizante (Góngora-Canul *et al.*, 2018).

## Poda

La poda es una buena práctica porque puede modificar la arquitectura de la planta y así mejorar el rendimiento y la producción de frutos. Las plantas necesitan producir brotes laterales para una máxima brotación y máximo de flores y semillas. La poda ayuda a la producción de más ramas e inflorescencias (Kumar *et al.*, 2016).

La poda es preferida durante el período de invierno cuando los árboles se han defoliado de manera natural. A fin de facilitar la cosecha también se sugiere mantener el árbol menos de 2 m de altura. Finalmente, se recomienda cortar todo la planta a 45 cm sobre el suelo una vez cada diez años (Kumar *et al.*, 2016).

La poda en frutales consiste en cortar partes del ramaje para producir una planta fuerte, bien formada y con frutos de buen tamaño y calidad. Si no se realiza la poda, la planta aumenta el volumen del follaje y ocurre una producción irregular o reduce la cosecha. Las podas más comunes son: de formación, de fructificación, de saneamiento y de rejuvenecimiento (Samsam, 2013).

En *J. curcas* se sugiere podas de formación, fructificación y/o saneamiento en el período de sequía (una vez por año), cuando las plantas están sin hojas.

Los objetivos principales son: disminuir la altura de las plantas para facilitar su cosecha, eliminar ramas enfermas o con daños físicos, dejar ramas productivas.

Los resultados preliminares de altura de poda para el híbrido ALJC02 indican que a mayor altura de poda la producción de la planta es mayor, siendo el despunte (corte de 10-20 cm de las puntas de las ramas hacia abajo) el mejor tratamiento; sin embargo, con este tratamiento no es posible bajar la altura de las plantas para facilitar la cosecha. En otro experimento con *J. curcas* Var ALJC01, donde se podó a 70 cm de altura y se redujo el número de brotes en cada rama podada, el mejor tratamiento fue cuando se dejaron sólo tres brotes por rama podada (Figura 4).

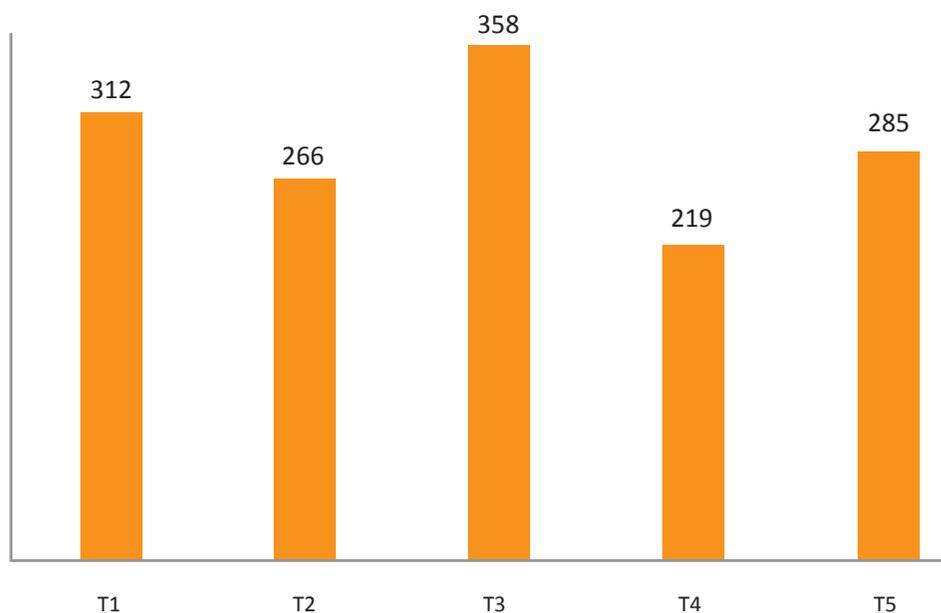


Figura 4. Número de frutos obtenidos por tratamiento de poda. T1: Con todos los brotes, T2: Con todos los brotes superiores, T3: Con tres brotes superiores en cada rama, T4 Con tres brotes en la parte baja de la rama, T5: Con dos brotes en la parte de arriba de la rama y dos en la parte superior.

Producción (número de frutos promedio por planta) de plantas de *J. curcas* en manejo de brotes después de una poda a 70 cm de altura.

## Plagas y enfermedades

Algunos autores mencionan que *J. curcas* no es afectada de manera grave por plagas y enfermedades, por lo que el manejo fitosanitario es mínimo (Carels, 2009). Sin embargo, en condiciones de monocultivo en el sureste de México, Uc y colaboradores (2018) mencionan que las plantaciones de *J. curcas* son susceptibles a plagas y enfermedades. A pesar de que la planta produce algunos compuestos tóxicos, se ha reportado que sufre afectaciones por plagas y enfermedades. En México se han reportado problemas fitosanitarios relacionados al cultivo, lo cual coincide con reportes realizados en otros países.

En el Cuadro 2 se presenta una lista de las plagas y enfermedades potenciales observadas en las plantaciones de *J. curcas* en la península de Yucatán, México (Uc-Vázquez *et al.*, 2018).

### Cuadro 2. Plagas y enfermedades potenciales de plantaciones de *J. curcas* en la península de Yucatán

Plagas	Enfermedades
Piojo harinoso ( <i>Pseudococcus</i> sp)	Muerte de plántulas en vivero (Dan ping off)
Araña roja ( <i>Tetranychus urticae</i> )	Pudrición apical de estacas ( <i>Phomopsis</i> sp)
Ácaro dorado ( <i>Aculops</i> sp)	Antracnosis o necrosis en hoja ( <i>Colletotrichum</i> spp)
Hormiga arriera ( <i>Atta</i> sp)	Manchado foliar ( <i>Corynespora</i> sp)

Continuación Cuadro 2...

Plagas	Enfermedades
Langosta ( <i>Schitoscerca piceifrons piceifrons</i> )	Manchado del fruto ( <i>Corynespora</i> sp)
Picudo y barrenador de los tallos	Acortamiento de entrenudos ( <i>Fusarium oxysporum</i> )
Barrenador de la semilla	Roya en hoja ( <i>Phakopsora</i> sp)
Mosquita blanca	Pudrición de la raíz ( <i>Lasiodiplodia theobromae</i> )
Termitas	Momificación de las semillas ( <i>Botrytis cinerea</i> )

## Producción y cosecha de plantaciones de *Jatropha*

### Floración y producción

En regiones tropicales y húmedas, o en condiciones de riego, *J. curcas* presenta floración durante gran parte del año. Debido a la floración continua, la producción de frutos ocurre durante cuatro meses por año y los frutos pueden ser cosechados tres veces durante este período, lo que complica la mecanización. La producción de semillas de *J. curcas* y, por lo tanto, el rendimiento del aceite es afectado por un bajo número de flores femeninas, ramificación reducida y polinización inadecuada. En condiciones óptimas, la floración y la fructificación comienzan 4-5 meses después del trasplante y la primera cosecha ocurre aproximadamente siete meses después del trasplante. La productividad de la planta comienza a ser estable después del primer año, generalmente cuando los árboles tienen 2-4 años. La producción económica de las plantas de *J. curcas* se extiende desde el primer año después de la siembra hasta los 40 años (Carels, 2009).

El ciclo anual de *J. curcas* presenta fases de crecimiento vegetativo, floración, fructificación, defoliación y reposo. Para las condiciones ambientales de Yucatán, México, de mayo a septiembre es el período de mayor precipitación

pluvial en el cual ocurre el crecimiento vegetativo. El período de defoliación y reposo ocurre de diciembre a febrero, influido por temperaturas promedio mínimas menores a 18 °C (Góngora-Canul *et al.*, 2018). En Yucatán, México, existen dos períodos de floración marcados, en el mes de mayo las inflorescencias son mayormente masculinas, generando menos de 10 frutos por racimo y en el período de agosto a noviembre la floración es continua, siendo éste el mayor período de producción, con inflorescencias mayormente femeninas.

La floración de *J. curcas* inicia en tres a cuatro meses después de su establecimiento definitivo en condiciones de ambiente favorables; a partir de la antesis, el fruto madura entre 60 y 90 días. Las inflorescencias se forman en el ápice de las ramas, posteriormente (antes de que las flores abran), las ramas se bifurcan y generan brotes de 20 cm aproximadamente y emiten nuevas yemas florales y se repite la bifurcación de la rama y crecimiento vegetativo. De esta forma, la planta presenta un período amplio de floración y producción cuando existen condiciones ambientales adecuadas de temperaturas, humedad de suelo y nutrición. Este tipo de crecimiento de las plantas de *J. curcas* permite que se observen en la planta: flores, frutos verdes y frutos maduros.

## Cosecha

Los frutos maduros fisiológicamente (Zavala-Hernández *et al.*, 2015) se identifican cuando cambian de coloración de verdes a amarillos y posteriormente color café. Se pueden cosechar cuando están de color amarillo o de color café.

De acuerdo con la variedad, los frutos tienen diferentes grados de dehiscencia, y algunos, como la variedad ALJC01, el fruto maduro puede permanecer en la planta como fruto seco por más de dos meses sin que caiga al piso, para otras variedades sus frutos son muy frágiles y caen al suelo en cuanto pasan a fruto seco, lo que provoca que haya pérdidas por pudrición; básicamente, los híbridos ALJCH01, ALJCH02 y ALJCH03 son de dehiscencia media.

Las áreas a cosechar dependen de la cantidad de fruto próximo a cosechar y de la logística propia de cada sitio. Se debe considerar el personal para cosecha (se estima un potencial de 200 a 300 kg de cosecha de fruto por jornal), su transporte a las áreas de cosecha, costales con correa para cosechar, costales para

almacenar el fruto, el acercamiento de los costales con fruto a orilla del camino, vehículo para el traslado del fruto al centro de acopio, carga y descarga del fruto.

La cosecha manual se organiza asignando una persona en cada surco o grupo de surcos, donde el trabajador va cosechando los frutos maduros (color amarillo y/o café) planta por planta, colocando el fruto cosechado en una bolsa de rafia que lleva consigo; cuando la bolsa se llena debe ser vaciada en un costal de rafia cercano ubicado a menos de 25 m. Recientemente, Jatronergy está desarrollando una técnica de cosecha mecanizada basada en la utilización de aspiradoras motorizadas que permiten la succión tanto de frutos secos caídos en el suelo y los que aún están en el árbol.

De forma continua, al llenarse cada costal al momento de la cosecha, debe amarrarse con hilo de rafia y al final de la jornada de cosecha hay que trasladar los costales a la orilla del camino.

Cada costal lleno de fruto debe cargarse al medio de transporte disponible y llevarse al centro de acopio del predio el mismo día de su cosecha.

### Manejo poscosecha: despulpado, secado y almacenaje de grano

En el centro de acopio se deben recibir todos los frutos cosechados diariamente antes de concluir la jornada. Como parte del control se sugiere llevar bitácora del centro de acopio, registrando el peso de cada costal de fruto recibido y el lote de procedencia.

Es importante considerar que los frutos amarillos y que están cambiando a color café tienen alto contenido de agua, por lo que la cáscara del fruto inicia un proceso de pudrición rápidamente al estar dentro de costales, lo que hace necesario que en el centro de acopio se extiendan en capas de 10 cm de espesor como máximo y pasen lo más pronto posible al despulpado. En un fruto amarillo la semilla representa alrededor del 33% de su peso y en un fruto seco el peso de la semilla representa hasta 67% (Góngora-Canul *et al.*, 2018).

En el manejo poscosecha es necesario la extracción del grano del fruto, el secado del grano y almacenaje del mismo (Figura 5).

En el centro de acopio debe extraerse el grano de los frutos cosechados. Es recomendable utilizar un equipo mecánico (despulpador) para romper los frutos y así facilitar la extracción del grano (Figura 5, B). Para la separación del grano y la cáscara del fruto se recomienda utilizar cernidores con mallas donde pase la semilla y la cáscara del fruto quede encima de la malla. De esta forma la separación se realiza con facilidad. Para eliminar las partículas pequeñas también se pueden utilizar ventiladores de pedestal.

Es necesario secar el grano exponiéndolo al sol por al menos tres días, la humedad del grano debe llegar a menos de 12%. El grano seco puede almacenarse en costales de rafia o en contenedores de mayor tamaño. Se recomienda llevar control en bitácoras del grano almacenado por fecha de cosecha, volumen y lote de procedencia. El grano puede permanecer más de un año almacenado sin daño de los ácidos grasos, lo adecuado es que permanezca en almacenaje el menor tiempo posible y se lleve a la fase de extracción de aceite. Se deben considerar posibles daños por gorgojos, polillas y/o roedores (ratones).

La cáscara de frutos es biomasa suave que se puede compostear para uso posterior como sustrato o distribuir en la plantación alrededor de las plantas de *J. curcas* como acolchado y que se integre al suelo como materia orgánica.



Figura 5. Manejo postcosecha de *J. curcas*. (A) Secado de fruto, (B y C) Despulpado o descascarado de fruto, (D) Secado de grano, y (E y F) Almacenaje de grano.

## Conclusiones y perspectivas

*J. curcas*, mediante la utilización de híbridos de alta producción y el uso de prácticas de cultivo validadas en el sureste de México, se convierte en un cultivo rentable económicamente y sustentable por sus beneficios ambientales y sociales.

Las prácticas agrícolas para el cultivo de *J. curcas* son adaptables a las condiciones locales de cada región agrícola de México, donde los factores de suelo y ambientales como temperatura, precipitación y disponibilidad de agua son las variables principales. La mecanización de la siembra directa de sólo *J. curcas* o asociado con maíz es un ejemplo de reducción de costos; la mecanización de la cosecha cuando las superficies sean extensas es un área de oportunidad para el corto plazo dada la alta demanda de mano de obra que implica esta labor.

En el corto y mediano plazos, los productos derivados de *J. curcas* de mayor valor agregado como los medicinales, proteína de la pasta y poliuretanos a partir del aceite permitirán la rentabilidad del cultivo en pequeñas superficies y a pequeños productores, además de las excelentes características del aceite para biocombustibles (biodiésel y bioturbosina) donde la demanda del mercado es creciente.

## Bibliografía citada

- Carels, N. 2009. “*Jatropha curcas*: a review”. *Advances in Botanical Research*, 50, 39-86.
- Costa, J.M., Ortuño, M.F., Lopes, C.M., Chaves, M.M. 2012. “Grapevine varieties exhibiting differences in stomatal response to water deficit”. *Functional Plant Biology*, 39(3), 179-189.
- Dardon-Zunun, J.D., Aguirre-Medina, J.F., Iracheta-Donjuan, L., Solís-Guzmán, B.F., Mina-Briones, F.O. 2015. “Evaluación de diferentes concentraciones de auxinas en el enraizamiento de estacas de *Jatropha curcas*”. *Agroproductividad* 8: 26-31.
- Egler, M., Egler, C.A.C., Franz, B., Araujo, M.S.M.D., Freitas, M.A.V.D. 2013. “Indicators of deforestation in the southern Brazilian pre-amazon”. *Reg Environ Change* 13:263–7.
- Díaz-Fuentes, V.H., Iracheta-Donjuan, L., Solís-Bonilla, J.L., Basulto-Graniel, J.A., Rico-Ponce, H.R., González-Jiménez, A., López-Guillén, G., Martínez-Bolaños, M., Salinas-Cruz, E. 2015. “El cultivo del piñón para la producción de biocombustibles”. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Pacífico Sur. Campo Experimental Rosario Izapa. *Folleto para productores* Número 34. Tuxtla Chico, Chiapas, México. 47 pp.
- Foidl, N., Foidl, G., Sánchez, M., Mittelbach, M., Hackel, S. 1996. “*Jatropha curcas* L. as a source for the production of biofuel in Nicaragua”. *Bioresource Technology*. 58:77- 82.
- Francis, G., Endinger, R., Becker, K.A. 2005. “A concept for simultaneous wastelands reclamation, fuel production, and socioeconomic development in degraded areas in India: need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations”. *Natural Resources Forum*. 29:12-24.
- Góngora-Canul, C.C., Sebastián-Martínez, G., Uc-Vázquez, A., López-Puc, G. 2018. *El cultivo de Jatropha curcas en el sureste de México. Paquete tecnológico*. Ediciones del CIATEJ, México.
- Hawkins, D., Wigglesworth, T. 2017. “Too Good To Burn: *J. curcas* Sector Review”. *Hardman Agribusiness*. London, United Kingdom. 56 pp.
- Kumar, P., Srivastava, V.C., Jha, M.K. 2016. “*Jatropha curcas* phytotomy and applications: development as a potential biofuel plant through biotechnological advancements”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 818-838.

- Miyashita, K., Tanakamaru, S., Maitani, T., Kimura, K. 2005. "Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress". *Environmental and experimental botany*, 53(2), 205-214.
- Openshaw, K. 2000. "A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise". *Biomass Bioenergy* 2000; 19:1-15.
- Pérez-Vázquez, A., Valdés Rodríguez, O.A., García Pérez E. (Editores). 2013. *Manual de buenas prácticas para el cultivo de Jatropha curcas L.* Colegio de Postgraduados, México 99 pp.
- Sagar, M. and Prasanna-Kumar, P. 2011. "Effects of Fertilizer Application on Growth and Yield of *Jatropha curcas* L. in an Aerobic Tropaequet of Eastern India". *Not Sci Biol*, 3:95-100. Available online at [www.notulaebiologicae.ro](http://www.notulaebiologicae.ro).
- Samsam, C.I. 2013. "Pruning Techniques for *Jatropha curcas* L. to Increase Seed Yield Production". *MMSU Science and Technology Journal* 3: 59-68.
- Teniente O.R., L.M., Tapia V., A., González A., Zamarripa C.A., J.L., Solís B., B., Martínez V., M., Hernández M., M. 2011. "Guía técnica para la producción de piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) en Michoacán". *Folleto Técnico* Núm. 2 Sagarpa. INI-FAP-CIRPAC Campo Experimental Valle de Apatzingán. Apatzingán, Michoacán, México 52 pp.
- Tiwari, A.K., Kumar, A., Raheman, H. 2007. "Biodiesel production from *Jatropha* (*J. curcas*) with high free fatty acids: an optimized process". *Biomass and Bioenergy*. 31:569-575.
- Trabucco, A., Achten, W.M.J., Bowe, C., Aerts, R., Van Orshoven, J., Norgroves, L., Muys, B. 2010. "Global mapping of *J. curcas* yield based on response of fitness to present and future climate". *GCB Bioenergy* 2:139-151.
- Toral, O.C., Iglesias, J.M., Montes de Oca, S., Sotolongo, J.A., García, S.Y., Torsti, M. 2008. "*Jatropha curcas* L. una especie arbórea con potencial energético en Cuba". *Pastps y Forrajes* 31: 191-207.
- Uc-Vázquez, A., López-Puc, G., Góngora-Canul, C.C., Martínez-Sebastián, G., Aguilera-Cauich, E.A. 2018. *Manual de las principales plagas y enfermedades que afectan el cultivo de Jatropha curcas L. en el sureste de México*. CIATEJ-Industria Alternativa. *Manual Técnico*. Mérida Yucatán 85 pp. ISBN impreso: 978-607-97894-3-5.
- Valdés, R.O.A., Pérez, V.A., Muñoz, G.C. 2014. "Drivers and Consequences of the First *Jatropha curcas* Plantations in Mexico". *Sustainability* 6: 3732-3746.

Zavala-Hernández, J.T., Córdova-Téllez, L., Martínez-Herrera, J., Molina-Moreno, J.C. 2015. “Desarrollo del fruto y semilla de *Jatropha curcas* L. e indicadores de madurez fisiológica de la semilla”. 18 de junio de 2018, de *Revista Fitotecnia Mexicana*. Sitio web: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802015000300006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000300006)

## Documentos impresos y en línea

Zamarripa, C.A. & Díaz, P.G. 2008. Áreas de potencial productivo de piñón *Jatropha curcas* L., como especie de interés bioenergético en México. 1 de marzo de 2018, de Comité Nacional Sistema Producto Oleaginosas Sitio web: [http://www.oleaginosas.org/art\\_211.shtml](http://www.oleaginosas.org/art_211.shtml)

### Plagas y enfermedades de importancia en el cultivo de *Jatropha curcas* en México

Alberto Uc Vázquez<sup>1\*</sup>, Carlos Cecilio Góngora Canul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC., Sede Sureste. Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, tablaje catastral 31264, km 5.5 carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto, CP 97302. Tel. 01 999 9202671.

<sup>2</sup>Agroindustria Alternativa del Sureste, Grupo Lodemo, calle 60 Diagonal Núm. 490 x 59 y 61, Mérida, Yucatán, México CP 97300.

Autor de correspondencia: \*auc@ciatej.mx.

#### Resumen

La *Jatropha* es una planta con potencial para la producción de biodiésel, cuyo cultivo ha sido promovido en diferentes regiones del mundo incluyendo a México, debido a reportes que muestran a plantas silvestres con volúmenes de producción de fruta elevados en suelos marginales y a la ausencia de plagas y enfermedades reportadas en esas condiciones. En México, el cultivo de *Jatropha* inició a escala comercial en el año 2006, siendo Chiapas, Sonora, Sinaloa, Veracruz, Campeche, Tabasco y Yucatán los estados con mayor superficie cultivada. Sin embargo, los cultivos establecidos en el sureste del país se han eliminado debido a rendimientos bajos, así como a la aparición de severos problemas fitosanitarios en la zona, tales como la mancha foliar (80%), la necrosis en hoja (50%), la pudrición del pie (40%) y del fruto, así como el in-

crecimiento de poblaciones de insectos plaga, como el piojo harinoso, la araña roja y el ácaro dorado, cuyo manejo incrementan sustancialmente los costos de producción. Sin embargo, cuando medidas de control efectivas se realizan de forma oportuna, es posible reducir considerablemente las pérdidas asociadas a la sanidad del cultivo. La viabilidad del cultivo de *Jatropha* es hasta la fecha controversial, sin embargo, todos los reportes coinciden que la generación de información útil para el aprovechamiento integral de los subproductos, incremento del volumen de producción, así como el manejo sanitario de las plagas y enfermedades puede hacer el cultivo viable y rentable. Considerando esta situación, en este documento presentamos información relevante de las principales plagas y enfermedades de la *Jatropha* registradas a partir de estudios y ensayos realizados durante más de 6 años en tres estados del sureste de México.

## Palabras clave

Problemas fitosanitarios, *Jatropha curcas*, sureste de México

## Introducción

La *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) es una planta oleaginosa con potencial para la producción de biodiésel. Su cultivo se ha extendido en países como India, China, Japón, Bélgica, Brasil, Tanzania y México, principalmente. La promoción del cultivo en diferentes regiones del mundo se debe a reportes de especies silvestres con volúmenes de producción de fruta elevados en suelos marginales, así como a la ausencia de plagas y enfermedades reportadas en esas condiciones (Singh *et al.*, 2014). Sin embargo, en las plantaciones en monocultivo establecidas a partir de 2006 en los estados de Chiapas, Michoacán, Veracruz, Quintana Roo y Yucatán (Valdés *et al.*, 2014), se reportó como factor limitante de la producción, la aparición de una gama de plagas y enfermedades, algunos de los cuales fueron reportados con incidencia y severidad

elevados (Valdés *et al.*, 2014; Lama *et al.*, 2015) que propiciaron en la mayoría de los casos el abandono de la plantación. Además, el manejo sanitario de la plantación fue complicado, en virtud de que el comportamiento epidemiológico de las enfermedades se modificó por los factores ambientales, la etapa fenológica del cultivo, así como la variedad del cultivo y la región en donde se encuentra establecido.

Soto y colaboradores (2018) mencionan una serie de factores que propiciaron el abandono de las plantaciones de *Jatropha* por parte de los productores en México, entre los que sobresalen la baja rentabilidad del cultivo y la presencia de múltiples problemas fitosanitarios. Considerando esta situación, se presenta información relevante para el manejo de las principales plagas y enfermedades que ocurren en el cultivo, misma que son producto de ensayos y experiencias obtenidas durante un período mayor de seis años en el cultivo de *J. curcas*.

En las plantaciones del sureste de México, las principales plagas registradas año con año en el cultivo de *Jatropha* fueron: el piojo harinoso (*Pseudococcus* sp), la araña roja (*Tetranychus urticae*) y el ácaro dorado (*Aculops* sp) cuya presencia, abundancia y estrategias de manejo fueron descritos previamente (Uc *et al.*, 2018, Góngora *et al.*, 2018). A la fecha, información y descripción detallada de otras plagas con potencial para afectar el cultivo de *Jatropha* se pueden encontrar en múltiples reportes publicados (Rao *et al.*, 2010; Anita y Varaprasad, 2012; López-Guillén *et al.*, 2015). Por otra parte, las principales enfermedades reportadas en el sureste de México, que afectan la producción de *Jatropha*, son: la mancha foliar, la antracnosis en hoja, la roya de la hoja y la pudrición del pie. Información sobre otras enfermedades de importancia potencial en el cultivo de *Jatropha* se pueden encontrar en distintas publicaciones (Machado & Pereira, 2013; Gómez-Ruiz *et al.*, 2015; Uc *et al.*, 2018).

## Insecto plaga

Múltiples trabajos reportan la presencia en México y otras regiones del mundo, diversos insectos plaga asociados a *Jatropha* (piojo harinoso, mosca blanca, áfidos, mosca blanca, chinche armada, langosta, barrenadores del tallo, trips y minador de la hoja) que tienen el potencial para afectar conside-

rablemente el cultivo (Minengu *et al.*, 2015; Alamu *et al.*, 2016; Gómez-Ruiz *et al.*, 2015; Prabhakar *et al.*, 2008). Considerando lo anterior, en este documento sólo se hará referencia a los insectos plaga cuya presencia en México ha sido registrado en poblaciones que ameritan un manejo sanitario, ya que de lo contrario las pérdidas que pueden producir en el cultivo son considerables.

## Piojo harinoso

Es un insecto plaga que ha sido considerado como una de las mayores amenazas en varios cultivos agrícolas, hortícolas y cultivos perennes de importancia económica entre los que se encuentra la *Jatropha*. La presencia del piojo harinoso en plantaciones de *Jatropha* se ha reportado en Brasil, India, Nigeria, Pakistán y México (Kumar *et al.*, 2011; Góngora-Canul *et al.*, 2018). El insecto se alimenta de todas las partes de la planta. Particularmente de puntas de crecimiento, brotes vegetativos, en los peciolos o pedúnculos de las hojas, así como a lo largo de la nervadura de hojas. Las ninfas se dispersan a partir del ovisaco, a través del viento o por hormigas.

Las especies de piojo harinoso reportados en *Jatropha curcas* son *Pseudococcus* sp. (Hemiptera, Pseudococcidae); *Paracoccus marginatus* ha sido reportado en el cultivo de *Jatropha* y una especie silvestre del género *Jatropha* (Galanihe *et al.*, 2010). En la India, además de las especies anteriores, se reportó la presencia de *Maconellicoccus hirsutus* (Kumar and Singh, 2014). En campo, las ninfas se observan en el envés de las hojas jóvenes, aunque pueden aparecer en el pedicelo y la inflorescencia. La presencia de piojo harinoso en *Jatropha* se ha asociado con la presencia de fumagina y hormigas en las hojas de plantas afectadas, debido a que estas últimas se alimentan de la secreción endulzada del piojo harinoso, en tanto la fumagina se desarrolla favorablemente sobre la misma secreción del insecto, y aunque no infecta a la planta, reduce el área fotosintética de la hoja, lo que contribuye al debilitamiento de la planta. El insecto plaga se presenta como una masa de coloración blanca debido a una secreción serosa que produce como medio de protección.

La plaga se presenta principalmente en los brotes, en el peciolo de las hojas jóvenes y hasta en las inflorescencias. El daño de la plaga se debe principalmente a su alimentación, al succionar la savia de las hojas jóvenes y frutos, lo

que provoca la pérdida de vigor, deformación y arrugamiento de hojas, acortamiento de nudos, reducción de ápices de crecimiento hasta una defoliación completa de una rama o incluso toda la planta.

Sahito & colaboradores (2014) reportaron que las poblaciones de piojo harinoso en tres plantaciones de *Jatropha* (variedades: Tailandia, Malasia e India) en Pakistán fueron bajas de 0.08 insectos/planta hasta 6.0 insectos/planta. Además, mencionan que el insecto presentó grandes períodos en los cuales no se registró su presencia (septiembre 2010-mayo 2011) con excepción en una plantación de la variedad de Tailandia, en la cual se observaron poblaciones que aparecen en poblaciones bajas, pero que disminuyen gradualmente y desaparecen. Los autores sugieren que este comportamiento de presencia y ausencia se debe posiblemente a que la *Jatropha* no es una planta preferida por el piojo harinoso. Sin embargo, en las condiciones de la península de Yucatán, aunque las poblaciones de piojo harinoso fueron localizadas en poblaciones bajas durante el primer año del cultivo y con detecciones intermitentes que coinciden con reportes anteriores (Sahito *et al.*, 2014). En el segundo y tercer año, la incidencia de plantas infestadas así como el número de insectos por planta se incrementó considerablemente.

El piojo harinoso provoca serios problemas a las plantas que parasita debido a que succiona la savia de las plantas infestadas y secreta una mielecilla sobre la cual se desarrolla la fumagina. El efecto de la alimentación del insecto en la planta se observa por una reducción en el crecimiento; además, las hojas afectadas toman una coloración amarilla con el paso del tiempo y eventualmente la hoja se deshidrata y se muere. Considerando el potencial reproductivo, invasivo y a la movilidad del insecto facilitada por las hormigas, los efectos de la infestación severa y sin un manejo oportuno pueden ser económicamente importantes. Otra situación a considerar es que los piojos generalmente requieren para su control la aplicación de agroquímicos a mayores concentraciones, debido a que estos insectos son protegidos por una cubierta cerosa, provocando que el control químico sea parcialmente efectivo y por lo general requiere de aplicaciones periódicas. Por otra parte, se menciona que las reinfestaciones en las orillas del cultivo, así como la existencia de hospedantes silvestres y ornamentales alrededor de la plantación conducen a la necesidad de aplicaciones más frecuentes, lo cual puede inducir a la generación de resistencia en el insecto (Regupathy and Ayyasamy, 2009).

Góngora-Canul y colaboradores (2018) reportaron que el piojo harinoso tiene una distribución espacial aleatoria al inicio de la infestación en el cultivo de *Jatropha*. Sin embargo, el comportamiento en agregados es evidente en etapas subsecuentes dentro y entre hileras del cultivo. Los mismos autores mencionan que los agregados son mayores en las líneas del cultivo que entre las hileras, lo que sugiere que esta distribución se debe al contacto que existe entre plantas de la misma hilera. Además, observaron que el período en la cual se registraron los mayores porcentajes de infestación fueron en los meses de junio-julio, período en las cuales las plantas de la hilera mantienen contacto debido al desarrollo de las plantas, permitiendo a los insectos pasar de una planta a otra, o incluso debido a la dispersión por el viento y hormigas a corta distancia. Los autores sugieren que la aplicación de medidas de control en las primeras etapas de la infestación, antes de que las plantas entren en contacto, son más efectivas para el manejo de la plaga. Por otra parte, Kumar & colaboradores (2011) evaluaron en la India un modelo para predecir el daño del piojo harinoso (porcentaje de infestación), con base en los datos de precipitación y temperatura registrados bajo condiciones de campo y concluyen que el porcentaje de infestación disminuye conforme la precipitación incrementa y viceversa. Considerando lo anterior, el manejo de la enfermedad mediante aplicaciones de agroquímicos o cualquier otra medida de control se debe realizar cuando las condiciones de precipitación son bajas o nulas (Kumar *et al.*, 2014).

## Ácaros fitófagos

Las especies de ácaros fitófagos que han sido reportados afectando las plantas de *Jatropha* son diversas (Lofego *et al.*, 2013) entre los que podemos mencionar el ácaro blanco (*Polifagotarsonemus latus*) y la araña roja (*Tetranychus bastosi* y *Tetranychus urticae*) principalmente (Rezende *et al.*, 2016). Por otra parte, se menciona que en malezas ubicadas dentro de la plantación de *Jatropha* se han encontrado algunas especies de ácaros fitófagos con potencial para causar serios problemas en el cultivo si las condiciones son favorables (Rezende & Lofego, 2012). Entre los ácaros que se han encontrado están los eriofidos del género *Aceria* sp y *Aculops* sp, principalmente. En este capítulo se hará la descripción de dos especies de ácaros cuya presencia en altas poblaciones ha sido registrada afectando considerablemente las plantaciones de *Jatropha* en México.

## Ácaro dorado

Hasta la fecha, el único reporte de la presencia de ácaro dorado, *Aculops* sp (Acari: eriophidae), afectando severamente plantas de *Jatropha curcas* fue realizado por Uc y colaboradores (2018) en el sureste de México. Aunque en Costa Rica se ha reportado la presencia de *Polyphagotarsonemus latus* como uno de los ácaros fitófagos más importantes en *Jatropha*, la sintomatología que reportan los autores (Aguilar y Murillo, 2012) coincide casi por completo con los síntomas inducidos por *Aculops* sp (Uc *et al.*, 2018). El ácaro dorado se caracteriza por tener el cuerpo fusiforme, además de alargado y grueso en la región anterior del cuerpo. El tamaño del ácaro es de 0.2 mm en promedio, por lo que no puede observarse a simple vista (Figura 1), su detección es difícil en campo, lo que a su vez facilita su introducción en otras áreas. El cuerpo fusiforme es de color blanco hialino en las primeras etapas ninfales, posteriormente el ácaro se observa con una coloración naranja. Los eriophidos son parásitos obligados y se alimentan sobre casi todas las partes de la planta excepto la raíz, entre los que sobresalen brotes y envés de hojas jóvenes, localizados por lo general en los márgenes de la nervadura central (Nuzzaci & Lillo, 1996), aunque en infestaciones severas el ácaro puede también observarse sobre todo el haz de la hoja.

Los síntomas de la presencia del ácaro en las plantas afectadas son visibles solamente en infestaciones severas por lo que su detección es difícil y se caracteriza por presentar un arrugamiento general de la hoja, adquiriendo un aspecto rugoso en el haz de las hojas nuevas de los ápices de crecimiento; además, las nervaduras de las hojas se hacen más visibles y, dependiendo del grado de infestación, se puede observar un acortamiento y engrosamiento de los ápices de crecimiento. Las hojas pueden tornarse cloróticas y en infestaciones severas adquieren una coloración dorada (de aquí el nombre con que se bautizó el ácaro). Las puntas de crecimiento dañadas ocasionan en la planta escasa o nula floración y, por ende, fructificación. Finalmente, los meristemos se secan (Uc *et al.*, 2018). Otro problema asociado al ácaro es su habilidad de generar resistencia a los agroquímicos y su capacidad de transmitir fitopatógenos como virus, los cuales pueden generar complicaciones mayores en los cultivos (Nuzzaci & Lillo, 1996; Navia *et al.*, 2010).

En el sureste de México, el ácaro dorado se presentó en los meses de abril hasta septiembre, observándose pequeños picos de crecimiento poblacional de nuevo en noviembre. Las poblaciones del ácaro no parecen verse afectadas por la presencia de lluvias, como ocurre con otros ácaros fitófagos. Los picos de población del ácaro son evidentes cuando el material vegetal utilizado presenta los períodos de defoliación bien definidos. Sin embargo, cuando la variedad de *J. curcas* posee la capacidad de retención del follaje, la presencia de la plaga se observó en un período de tiempo más amplio (Uc *et al.*, 2018). El movimiento de la plaga dentro de la plantación es a través del aire, la lluvia y muy en especial por el hombre durante las prácticas culturales.

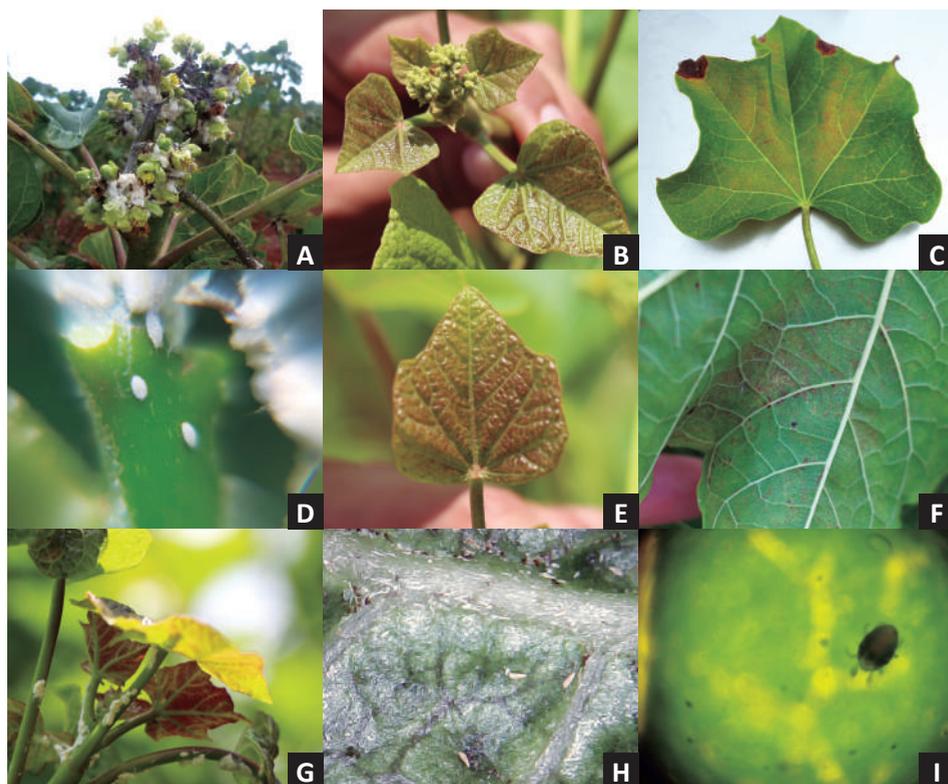


Figura 1. Principales insectos plaga que afectan a la *Jatropha* y síntomas evidentes de la infestación (A, D y G) Piojo harinoso, (B, E y H) Ácaro dorado, y (C, F e I) araña roja.

El ciclo de vida puede ser de uno a tres días, dependiendo de las condiciones ambientales, principalmente la temperatura. El ciclo empieza con la etapa de huevecillo, seguido de dos etapas inmaduras (larva y ninfa) y termina con el ácaro adulto. Considerando la velocidad de reproducción del ácaro, resulta importante diseñar una estrategia de manejo adecuado y oportuno de la plaga al primer indicio de incremento de la población en los meses antes mencionados, por lo que la mejor estrategia para el manejo del ácaro es el muestreo periódico y sistematizado en los meses propicios para su desarrollo y cuando las plantas presentan una brotación vegetativa importante.

El control de la plaga se ha realizado de manera efectiva mediante la aplicación de azufre elemental a dosis de 2mL/L en aspersiones al follaje, dirigido a los ápices de crecimiento principalmente. Otros productos que han sido aplicados para el control del ácaro son el Amitraz y un acaricida orgánico a base de canela y pimienta negra, con porcentajes de efectividad de 99 y 66%, respectivamente (Uc *et al.*, 2018).

### Araña roja

El ácaro dos manchas o también conocido como araña roja (*Tetranychus urticae*) es una de las plagas que están emergiendo como un problema principal en las plantaciones de *Jatropha* en el sureste de México, debido a que reducen la producción y calidad de la semilla (Uc *et al.*, 2018). En Brasil, Sarmento y colaboradores (2011) reportaron que las especies de araña roja (*Tetranychus bastosi*) y el ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*) son los principales problemas fitosanitarios de la *Jatropha*.

Hsu y colaboradores (2015) mencionan que la araña roja disminuye la asimilación de CO<sub>2</sub> y reduce la tasa fotosintética en las hojas infestadas. Los ácaros normalmente viven en el envés de las hojas o escondidos entre los brotes y ramas de las plantas cultivadas, otros atacan directamente los frutos, provocándoles manchas generalmente de color amarillo. Además, las heridas que ocasionan pueden servir para la entrada y ataque de patógenos en la planta.

Dentro de la familia Tetranychidae, la especie plaga que más reportes tiene por daños en los cultivos es el ácaro de dos manchas, *Tetranychus urticae* Koch,

catalogado como una de las especies que más problemas ocasiona a la agricultura. El ácaro succiona la savia introduciendo su estilete, o bien, raspando la superficie de la hoja para succionar los fluidos.

La araña roja (*T. urticae*) se localiza generalmente en el envés de las hojas, donde se agrupa en altas poblaciones que se alimentan con avidez. La plaga succiona con su aparato bucal el contenido de las células, lo que provoca el colapso y muerte de las células afectadas, a su vez produce una serie de puntos amarillentos o blanquecinos que llegan a unirse y, como consecuencia, se presenta la pérdida de coloración en las hojas de manera uniforme debido a que la tasa de transpiración y la actividad fotosintética de la planta se ven afectadas (Park & Lee, 2002). Las ninfas y adultos de araña roja se alimentan en el envés de las hojas, originando un rizado y manchas generalmente de color amarillo pálido, incluso toda la hoja adquiere una coloración amarilla, lo que produce una reducción en el crecimiento y producción de la planta. Posteriormente, la rama o la planta completa mueren a causa de infestaciones elevadas del ácaro.

Los adultos y ninfas producen telarañas que pueden dañar el aspecto del cultivo; si la densidad poblacional de la plaga es alta, las hojas pueden ser cubiertas completamente con la telaraña cuando las condiciones de precipitación y temperatura son adecuadas para el desarrollo de la plaga.

Uc y colaboradores (2018) registraron la fluctuación poblacional de la araña roja en condiciones del estado de Yucatán y reportaron que en las plantaciones cultivadas con variedades con capacidad de retención de follaje, la plaga se encuentran sobre todo en los meses de baja precipitación y con temperaturas elevadas (febrero-junio), ya que en las accesiones que experimentan caída de hojas en el verano el ácaro se observó desde finales de mayo hasta junio, con un segundo pico poblacional en los meses de septiembre a noviembre. En infestaciones severas, la plaga provoca la defoliación de la planta, lo que reduce la tasa fotosintética de la misma y como consecuencia puede afectar el volumen y calidad de la producción. El comportamiento de las poblaciones de araña roja en *Jatropha* coincide con los reportes realizados en otros países, como Brasil (Rosado *et al.*, 2015; Kavitha *et al.*, 2007). Este ácaro puede presentar diferentes características morfológicas, sobre todo su color puede

variar en respuesta al régimen alimenticio, factores ambientales, planta hospedera y estado de desarrollo. La duración del ciclo de vida también puede reducirse conforme se incrementa la temperatura (Bounfour & Tanigoshi, 2001), por lo que la población de la plaga puede incrementarse rápidamente cuando las condiciones de temperatura son favorables (Rosado *et al.*, 2015).

El control de la araña roja puede realizarse con algunos de los productos dirigidos para el control del ácaro dorado (como el Amitraz). Por otra parte, productos a base de Abamectina han sido reportados como efectivos en otros países (Kavitha *et al.*, 2007). También los aceites y jabones pueden ser una alternativa para el control de la plaga. Además, los ácaros tienen múltiples enemigos naturales que a menudo limitan la población. Considerando lo anterior, será necesario monitorear los niveles del ácaro en la plantación antes de realizar cualquier tratamiento (Godfrey, 2011; Uc *et al.*, 2018).

## Enfermedades

Diversos reportes describen la presencia en México y otras regiones del mundo, las enfermedades asociadas en *Jatropha* (mancha foliar, antracnosis, roya en hoja y pudrición del pie, damping off, secadera de estacas, pudrición del fruto y gomosis, momificación de la semilla, etc.) que tienen el potencial para afectar considerablemente el cultivo (Uc *et al.*, 2017, 2018; Kumar *et al.*, 2009; Machado and Pereira, 2013; Anita and Varaprasad, 2012; Gómez-Ruiz *et al.*, 2015). Considerando lo anterior, en este documento sólo se hará referencia a las enfermedades cuya presencia en México han sido registradas con incidencia y severidad alta en las plantaciones de *Jatropha* y que, además, se presentaron año con año en la plantación y que ameritan un manejo sanitario pues de lo contrario puede producir grandes pérdidas en el cultivo.

### Mancha foliar

La mancha foliar reportada en el sureste de México es causada por un complejo de patógenos dentro de los que destacan principalmente los hongos *Corynespora cassiicola* y *Alternaria spp* (Uc *et al.*, 2013, 2018). En otras regiones como Brasil, se ha reportado al hongo *Dothiorella sp* como el agente causal;

mientras que otros reportes en México y la India sugieren que el manchado foliar es provocado por *Alternaria* sp. (Kumar *et al.*, 2009; Espinoza-Verduzco *et al.*, 2012; Chuku & Chuku, 2014). En la India, Narmadhavathy y colaboradores (2013) reportaron la presencia de *Curvularia clavata* en muestras de hoja con síntomas de amarillamiento y mancha necrótica y clorótica en el margen de la hoja.

Los síntomas de manchado foliar en las plantas de *Jatropha* se observan como pequeñas manchas necróticas y circulares de 0.5 cm de diámetro aproximadamente, ligeramente hundidas en las hojas de plantas jóvenes o adultas (Figura 2). En el peciolo de las hojas el síntoma es de forma circular a elíptica. En plantas de algunas accesiones afectadas es posible observar la presencia de un halo clorótico. Sin embargo, el síntoma más común son los bordes ligeramente más oscuros sin halo clorótico. Por otra parte, se observan manchas con bordes bien definidos y en otros casos el borde es irregular. Las ligeras variaciones en los síntomas observados en las plantas sugieren la presencia de otros patógenos y posiblemente a una respuesta diferencial de las accesiones (Uc *et al.*, 2018); ya que las manchas oscuras y hundidas en algunas accesiones no presentaron bordes bien definidos, incluso se sugirió la presencia de alguna bacteria por la observación de manchas aceitosas. En dichas muestras se detectó la presencia de bacterias del género *Xanthomonas*, sin embargo, la detección no ha sido consistente (Uc *et al.*, 2018, datos no publicados).

Un estudio realizado para determinar la dinámica temporal de la enfermedad en tres plantaciones de *Jatropha* encontró que la presencia de plantas con síntomas de mancha foliar ocurre prácticamente en todo el año, ya que en plantas de accesiones sin capacidad de retención de hojas (defoliación natural inicia a finales de noviembre y es total en enero) los síntomas se observan en el periodo de mayo a noviembre, pero en las plantas de accesiones con capacidad de retención de follaje se pueden observar síntomas de la enfermedad prácticamente durante todo el año. La incidencia y severidad máxima de la mancha foliar se observó en los meses de junio-agosto, lo cual coincide con la temperatura y la humedad relativa alta, bajo las condiciones del oriente del estado de Yucatán. Los registros realizados en diversas accesiones de *Jatropha* indican que la severidad de la enfermedad varía dependiendo de la accesión, lo que sugiere la existencia de accesiones tolerantes y sensibles a la enferme-

dad, por lo que la selección y uso de plantas tolerantes a la enfermedad puede ser una estrategia de manejo que debe explorarse (Uc *et al.*, 2018).

El manejo de la enfermedad se ha realizado mediante la aplicación de Mancozeb en dosis de 2.0 g/L en aspersión al follaje, así como mediante aplicaciones de Benomilo en dosis de 1.0 g/L. La efectividad de los productos, evaluada en términos de severidad de la enfermedad, no fue evidente, con excepción del Benomilo. Una estrategia que puede funcionar para el manejo de la enfermedad es la aplicación de los agroquímicos durante las primeras detecciones de manchado foliar, misma que ocurre a partir de la última semana de mayo en la cual la severidad de la enfermedad parece tener incremento exponencial (Uc *et al.*, 2018).

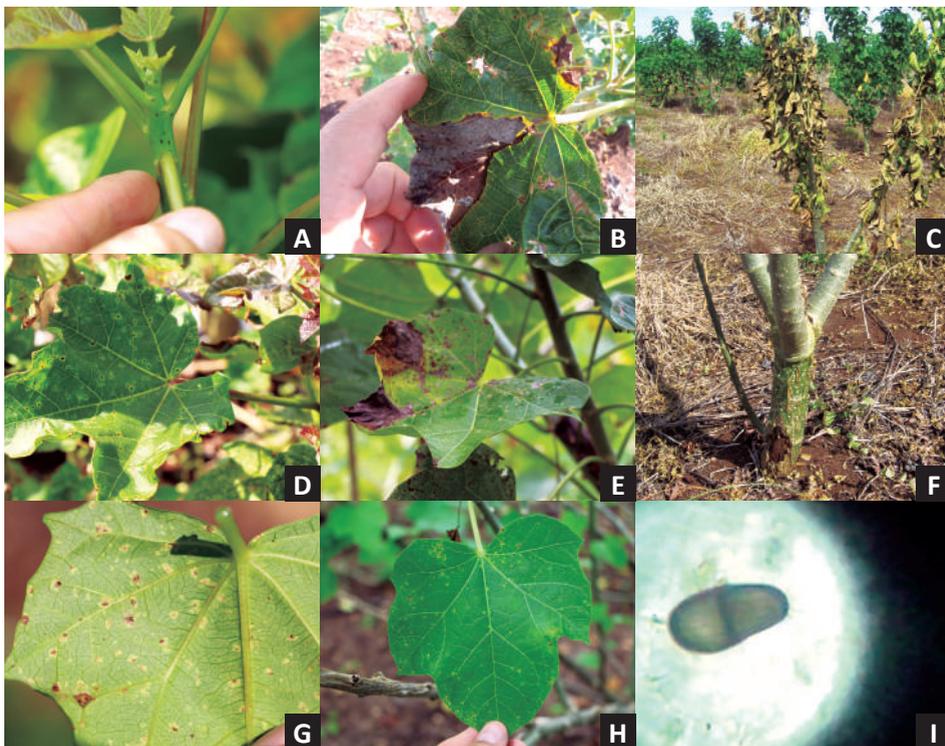


Figura 2. Principales enfermedades que afectan a la *Jatropha* y síntomas evidentes de la infección (A y D) Mancha foliar, (B y E) Necrosis en hoja, (C, F e I) Pudrición del pie, y (G y H) Roya de la hoja.

## Antracnosis en hoja

La antracnosis o necrosis en hoja reportada en el sureste de México es una enfermedad cuya presencia se ha reportado en prácticamente todas las áreas productoras de *Jatropha* en Brasil, México, Estados Unidos, Korea, Burkina Faso, etc. (Machado & Pereira, 2013; Uc *et al.*, 2018; Kwon *et al.*, 2012). Dos Santos y colaboradores (2013) mencionan que este patógeno resulta importante debido a los daños que ocasiona y por la transmisión del hongo a través de semillas de *Jatropha*, por lo que su incidencia puede ser alta cuando la semilla utilizada no recibe el tratamiento de desinfección adecuado.

El agente causal de esta enfermedad es *Colletotrichum gloeosporioides*. Este hongo ha sido aislado de manera consistente en las muestras con antracnosis y necrosis en las hojas, sin embargo, también se han aislado otras especies de *Colletotrichum* entre los que sobresalen *C. capsici* (sinónimo de *C. truncatum*) y *C. graminicola* (Elison *et al.*, 2015; Torres Calzada *et al.*, 2011; Anita & Varaprasad, 2012). El hongo aislado se caracterizó por desarrollar en medio Papa-Dextrosa y Agar, un micelio abundante de color blanco-grisáceo, hifas septadas con acérvulos, sobre las que se observó la presencia de conidios cilíndricos en masa; en el centro de la colonia se observó la presencia de puntos de color naranja que correspondió a masas de conidio.

La sintomatología de la enfermedad se caracterizó por la presencia de manchas necróticas oscuras e irregulares, localizadas principalmente en el margen de las hojas (Figura 2), que al incrementar su tamaño coalescen formando manchas necróticas que llegan a cubrir casi toda la hoja y pueden ocasionar defoliación prematura de la planta (Rathod *et al.*, 2011a; Machado & Pereira, 2013). La caída de hojas, debido a una alta severidad de la enfermedad, generalmente coincide con el inicio de la defoliación natural por frío, lo cual mimetiza los efectos de la enfermedad y explica en parte por qué las aplicaciones para el control de la enfermedad no ocurren en las accesiones sin capacidad de retención del follaje. En las áreas necróticas se observa, generalmente en forma de anillos necróticos, la presencia de pequeños puntos negros que corresponde a estructuras de reproducción del hongo. En los meses de junio-septiembre, los síntomas de la necrosis en hoja se pueden confundir con los inducidos por la pudrición del pie. Sin embargo, en la necrosis en hoja que

presentan las plantas con pudrición del pie no se observan anillos necróticos y ocurre en un tiempo corto (1-2 semanas), antecedido por un declinamiento repentino de la planta, a diferencia de la antracnosis en hoja debida a *Colletotrichum* spp, la necrosis que causa en la hoja es gradual, además las hojas severamente afectadas se caen, mientras en la pudrición del pie las hojas permanecen adheridas a la planta (Uc *et al.*, 2017).

Uc y colaboradores (2018) reportaron que bajo condiciones de la península de Yucatan, la necrosis en hoja se presenta generalmente en un período que va de mayo a noviembre, y la máxima severidad se observó en los meses de octubre-noviembre. El incremento de la severidad de la enfermedad coincidió con el incremento de la humedad (70%) y temperatura (29 °C) del ambiente. En accesiones con la capacidad de retención de hojas en el período frío, los picos de enfermedad se mantienen hasta diciembre; mientras que las accesiones con pérdida de hoja, las primeras detecciones de antracnosis ocurren en abril o mayo.

En el sureste de México no se realiza control alguno de esta enfermedad debido a que la máxima severidad se presenta cuando las plantas inician el período de defoliación. Sin embargo, en accesiones con capacidad de retención de follaje se recomienda el uso de productos a base de Mancozeb, Propiconazole y Carbendazim (Rathod *et al.*, 2011b; Rathod, 2012; Suryanarayana *et al.*, 2012). Otros trabajos reportan la efectividad *in vitro* (89%) de extractos vegetales de Neem (*Azadirachta indica*) para el control del hongo (Hedge *et al.*, 2014).

### Roya de la hoja

La roya de la hoja en *J. curcas* es una enfermedad de importancia fitosanitaria y económica en Brasil, México, Sudan y Singapur (Anitha & Varaprasad, 2012; Carneiro *et al.*, 2009) debido a que la incidencia y severidad registrada en las plantaciones es alta (Nolasco *et al.*, 2013). En el sureste de México, por ejemplo, la incidencia de la enfermedad en tres plantaciones fue cerca del 100%. Además, la presencia de pústulas en crecimiento en plantas de 1.5 años y plántulas de vivero ocurrió en casi todo el año, incluso en periodos en los cuales las condiciones de temperatura son adversas para el desarrollo del

patógeno, pero con humedad relativamente alta (Uc *et al.*, 2018), por lo que en condiciones que favorecen el desarrollo del patógeno los efectos adversos en la producción pueden ser considerables.

El agente causal de la enfermedad en México ha sido reportado como *Phakopsora arthuriana* (sin. *P. jatrophicola*) (Nolasco *et al.*, 2013). Un hongo biotrófico obligado, lo cual dificulta su caracterización y manejo pues requiere necesariamente del hospedante para su crecimiento y reproducción. Esta enfermedad se manifiesta en las hojas jóvenes y se hace cada vez más evidente en hojas maduras. En las hojas jóvenes se observan las pústulas en crecimiento, que vistas al microscopio permiten observar fácilmente las urediniosporas ovoides, unicelulares de color amarillo-naranja (Haituk *et al.*, 2017).

En las etapas iniciales, la enfermedad ocasiona la formación de pústulas de color café rojizo y café oscuro en el envés de la hoja, que coincide con puntos cloróticos o café amarillentos en el haz de la hoja. En estados avanzados, las pústulas primarias de 4-5 mm de diámetro coalescen, lo que genera la formación de manchas necróticas de mayor tamaño y de color naranja oscuro, que pueden ocasionar ligeras deformaciones y defoliación severa de la planta cuando las condiciones climáticas son favorables.

La enfermedad se presenta con mayor incidencia y severidad en los meses de octubre-noviembre. Sin embargo, en las plantaciones jóvenes pueden observarse pústulas abiertas o en crecimiento en los meses de diciembre-enero, incluso febrero, siempre y cuando la humedad relativa se mantenga alta a pesar de que la temperatura sea igualmente alta (Uc *et al.*, 2018).

El manejo de la enfermedad se ha realizado mediante aplicaciones de triadimenol 30% (Baytan) en aspersiones al follaje, a una dosis de 2mL/L. Esta aplicación se recomienda en las etapas iniciales de la enfermedad y cuando la plantación presenta un alto porcentaje de hojas jóvenes con pústulas en crecimiento. Otra estrategia para el manejo de la enfermedad es disminuir el inóculo primario, evitando la acumulación de hoja con pústulas en la plantación, realizar los riegos en el día para permitir que la superficie foliar se mantenga seca en las noches ha sido recomendado como una buena estrate-

gia para el control del inoculo y, finalmente, mejorar la aireación del cultivo en los períodos de mayor susceptibilidad pueden apoyar en el control de la enfermedad (Anitha and Varaprasad, 2012). Otros autores han reportado la aplicación de fungicidas sistémicos a base de tiofanato-metilico + flutriafol, pyraclostrobin + epoxiconazol, Azoxistrobin + ciproconazol (Roese *et al.*, 2008).

### Pudrición del pie

La pudrición del pie y de raíz es una enfermedad cuya presencia se ha reportado en diversas regiones productoras de *Jatropha*, tales como Brasil, China, India, México, entre otros (Pereira *et al.*, 2009; Fu *et al.*, 2007; Latha *et al.*, 2009; Uc *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2012). Aunque los síntomas reportados varían ligeramente, en todos los casos la enfermedad provocó la muerte rápida de plantas independientemente de la edad, por lo que el daño en el cultivo fue siempre de importancia.

En muestras con pudrición del pie se aisló consistentemente al hongo *Lasioidiplodia theobromae*, patógeno al que se ha asociado la enfermedad en *J. curcas* en otras regiones del país. Sin embargo, es posible aislar con cierta frecuencia en muestras con síntomas similares y sobre todo en el período de mayor precipitación a *Fusarium* sp (Uc *et al.*, 2017; Herrera-Parra *et al.*, 2017; Zarafi y abdukkadir, 2014). La presencia de los dos hongos en la planta puede propiciar el decaimiento repentino, sobre todo en los periodos de mayor precipitación. En China, Wu y colaboradores (2012) identificaron mediante claves taxonómicas a *Botryosphaeria dothidea* como el patógeno causal de la enfermedad, otros patógenos que se han asociado con la pudrición del pie han sido *Rhizoctonia bataticola*, *Macrophomina phaseolina*, *Citocybe tabescens*, *Sclerotium rolfsii* entre otros (Anitha and Varaprasad, 2012).

Los síntomas iniciales de la enfermedad se caracterizan por una marchitez de la planta, independientemente de la edad, ya que las hojas se muestran flácidas adheridas al tallo, después ocurre una defoliación total de la planta (Figura 2). Cuando se observa la raíz de las plantas afectadas, puede verse una pudrición de las raíces secundarias y terciarias; en casos avanzados, las raíces primarias muestran la pudrición y fácil descortezamiento; debajo de

la corteza puede observarse un micelio de color gris. Cortes longitudinales de la raíz muestran zonas con pudrición de los haces vasculares, intercalada con zonas aparentemente sanas. Cuando las condiciones de humedad y temperatura son adecuadas para el desarrollo del hongo, las plantas ubicadas en suelo rojo y susceptible a la inundación presentan marchitez y defoliación, lo cual ocurre en un período de 10-15 días, lo que sugiere que la marchitez se debe principalmente al taponamiento de los haces vasculares. Finalmente, los árboles que logran sobrevivir a la pudrición forman un cancro en la base del tallo (Uc *et al.*, 2017; Uc *et al.*, 2018).

La mayor incidencia de la enfermedad se reportó en los meses de junio a septiembre, y la máxima severidad coincidió con los meses de mayor precipitación y temperatura en el sureste del país. Para el control de la enfermedad se ha realizado la aplicación de Benzotiazol y Metalaxil-M, en dosis de 2 mL/L de cada producto, aplicando al suelo en forma de drench a 1 metro alrededor de la planta afectada, han tenido un efecto limitado. Algunos autores han sugerido que otra estrategia que puede funcionar es el uso de variedades resistentes. Sin embargo, entre todos los materiales que han sido evaluados en la región sureste del país (incluyendo parentales y sus híbridos), no se han registrado evidencias que sugieran la existencia de plantas tolerantes y resistentes. Considerando los factores que propician la aparición de la enfermedad es posible que el manejo del riego, así como evitar daños y heridas en los tallos de los árboles en los períodos de mayor severidad, deban considerarse para el control de la enfermedad. Además, un estudio epidemiológico en dos plantaciones de la zona demostró la importancia de la eliminación de plantas enfermas cuando el número de plantas infectadas es menor al 5%, pues se reduce la fuente de inóculo y se disminuye la velocidad de dispersión de la enfermedad en el campo (Uc *et al.*, 2017).

## Conclusiones y perspectivas

Los problemas fitosanitarios de *Jatropha curcas* en México están apareciendo conforme el cultivo se va extendiendo e intensificando en ciertas regiones, por lo que estudios de diagnóstico oportuno deben realizarse periódicamente, con el fin de hacer las detecciones del agente causal para evaluar y establecer

el manejo de la sanidad, bajo las condiciones de cada región. Esta información debe incluir, necesariamente, los estudios epidemiológicos de plagas y enfermedades conducentes, que permitan diseñar estrategias de manejo, acorde con las condiciones de cada zona.

## Bibliografía citada

- Aguilar, H. y Murillo, P. 2012. "Nuevos hospederos y registros de ácaros fitófagos para Costa Rica: período 2008-2012". *Agronomía Costarricense* 36: 11-28.
- Alamu, O.T., Omoayena, B.O. and Amao, A.O. 2016. "The Occurrence and Severity of Infestation of three foliage pests on *Jatropha curcas*". *International Journal of Agriculture and Biosciences* 5: 82-84.
- Anitha, K. and Varaprasad N, K.S. 2012. "*Jatropha* Pests and Diseases: An Overview". In: *Jatropha, Challenges for a New Energy Crop*. Carels et al. (eds.), Volume 1: 175 Farming, Economics and Biofuel.
- Bounflour, M. and Tanigoshi, L.K. 2001. "Effect of Temperature on Development and Demographic Parameters of *Tetranychus urticae* and *Eotetranychus carpini borealis* (Acari: Tetranychidae)". *Annals of the entomological society of America* 94: 400-404.
- Carneiro, S.M.D.T.P., Ramos, A.L.M., Romano, E., Marianowski, T., Oliveira, J.P.D. 2009. "Ocorrência de *Phakopsora jatrophiicola* em pinhão manso no estado do Paraná". *Summa Phytopathologica* 35: 73-73.
- Chuku, E.C. and Chuku, O.S. 2014. "Studies on the agronomy of *Jatropha curcas*, it's fungal leaf and control with some botanicals". *Acta Agronómica Nigeriana* 14: 77-85.
- Dos Santos, G.R., Tozze, J.H.J., Alves, C. de S.D., Quintão, F.G., Massola, J.N.S. 2013. "Etiology and pathogenicity of two different isolates of *Colletotrichum* spp. obtained from physic nut seeds". *Journal of Seed Science* 35: 139-146.
- Ellison, C.A., Sawadogo, A., Braman, S., Nacro, S. 2015. "First report of *Colletotrichum truncatum* causing stem cankers on *Jatropha curcas* in Burkina Faso". *Plant Diseases*. 99:14-20.
- Espinoza-Verduzco, M.A., Santos-Cervantes, M.E., Fernández-Herrera, E., Espinoza-Mancillas, M.G., Chávez-Medina, J.A., Bermúdez-Álvarez, E.M., Martínez-Ayala, A.L., Méndez-Lozano, J., Leyva-López, N.E. 2012. "First report of *Alternaria alternata* (Fr.) Keissler causing inflorescence blight in *Jatropha curcas* in Sinaloa, Mexico". *Canadian Journal of Plant Pathology* 34: 455-458.
- Fu, G., Huang, S.L., Wei, J.G., Yuan, G.Q., Ren, J.G., Yan, W.H., Z. Cen.Z.L. 2007. "First record of *Jatropha podagrica* gummosis caused by *Botryodiplodia theobromae* in China". *Australasian Plant Disease Notes* 2: 75-76.
- Galanihe, L.D., Jayasundera, M.U.P., Vithana, A., Asselaarachchi, N., Watson, G.W. 2010. "Occurrence, distribution and control of papaya mealybug, *Paracoccus marginatus* (Hemiptera: Pseudococcidae), an invasive alien pest in Sri Lanka". *Tropical Agricultural Research and Extension* 13: 81-86.

- Gómez-Ruiz, J., López-Guillén, G., Herrera-Parra, E., Hernández-Arenas, M.G., Martínez-Bolaños, M., Barrera, J.F. 2015. "Plagas y enfermedades del piñón (*Jatropha curcas* L.) en el trópico mexicano". Ecosur-INIFAP. *Folleto Técnico* Núm. 14. Tapachula, Chiapas, México. 48 pp.
- Góngora-Canul, C.C., Martínez-Sebastián, G., Aguilera-Cauich, E.A., Uc-Vázquez, A., López-Puc, G., Pérez-Hernández, O. 2018. "Spatio-temporal dynamics of mealybug (Hemiptera: Pseudococcidae) populations in plantations of *Jatropha curcas* L. in Yucatan, Mexico". *Industrial Crops and Products* 117: 110-117.
- Ranga R., R.G.V., Marimuttu S., Suhas P., W., Rameshwar R., V. 2010. "Insects pests of *Jatropha curcas*, L. and their management". *Information Bulletin*. Patancheru, A.P. 502 324, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 24 pp.
- Haituk, S., Cheewangkoon, R., To-anun, C. 2017. "New Record of *Phakopsora arthuriana* on *Jatropha curcas* L. in Thailand". *International Journal of Agricultural Technology* 13: 149-152.
- Hegde, Y.R., Chavhan, T.L. and keshgond, R.S. 2014. "Antifungal activity of plant extracts on *Colletotrichum gloeosporioides* infecting *Jatropha curcas*". *The Bioscan* 9: 283-286.
- Herrera-Parra, E., Cristóbal-Alejo, J., Martínez-Bolaños, M., Hernández-Arenas, M., López-Guillén, G. 2017. "First record of *Fusarium solani* and *F. equiseti* in plantations of *Jatropha curcas* in Mexico". *Revista Mexicana de Fitopatología* 35: 150-161.
- Hsu, M.H., Chen, C.C., Lin, K.H., Huang, M.Y., Yang, C.M., Huang, W.D. 2015. "Photosynthetic responses of *Jatropha curcas* to spider mite injury". *Photosynthetica* 53: 349-355.
- Kavitha, J., Ramaraju, K., Baskaran, V., Kumar, P.P. 2017. "Bioecology and management of spider mites and broad mites occurring on *Jatropha curcas* L. in Tamil Nadu, India". *Systematic and Applied Acarology* 12: 109-115.
- Kumar, V., Topagi, S.C., Rajendra Prasad, B.S., Revanasidda Tharini, K.B., Ashok Kumar, C.T. 2014. "Biology and management of mealybug, *Paracoccus marginatus* Williams and Granara de Willink on *Jatropha curcas* L." *Journal of Applied and Natural Science* 6: 770-778.
- Kumar, P.P., Tilak, M., Parthiban, K.T., Durairasu, P. 2011. "Development of a grading system to assess the mealybug infestation in *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) based on the natural incidence". *Research & Reviews in BioSciences* 5: 153- 155.
- Kumar, A. & Singh, N. 2014. "First report of *Maconellicoccus hirsutus* Green infestation on *Jatropha curcas* saplings". *Phytoparasitica* 42: 71-73.
- Kumar, R., Sinha, A., Singh, S.R., Kamil, D. 2009. "Incidence of a leaf spot disease in *Jatropha curcas* from Eastern Uttar Pradesh". *J Mycol Pl Pathol* 39:536-538.

- Kwon, J.H., Choi, O., Kim, J., Kwak, Y.S. 2012. "First report of anthracnose disease on *Jatropha curcas* caused by *Colletotrichum gloeosporioides* in Korea". *Journal of Phytopathology* 160: 255-257.
- Lama, A.D., Vuorisalo, T. and Niemela, P. 2015. "Global patterns of arthropod herbivory on an invasive plant, the physic nut (*Jatropha curcas* L.)". *Journal of Applied Entomology* 139: 1-10.
- Latha, P., Prakasam, V., Kamalakannan, A., Gopalakrishnan, C., Raguchander, T., Paramathma, M., Samiyappan, R. 2009. "First report of *Lasiodiplodia theobromae* (Pat.) Griffon & Maubl causing root rot and collar rot disease of physic nut (*Jatropha curcas* L.) in Indi". *Australasian Plant Disease Note* 4: 19-20.
- Lofego, A.C., Rezende, J.M., Verona, R.L.C., Feres, R.J.F. 2013. "Mites (Acari) associated with three species of the genus *Jatropha* (Euphorbiaceae) in Brazil, with emphasis on *Jatropha curcas*". *Systematic & Applied Acarology* 18: 411-423.
- López-Guillén G., Gómez, J., Barrera, J.F., Martínez-Bolaños, M., Herrera-Parra, E.A., Hernández-Arenas, M. *et al.* 2015. "Principales plagas y enfermedades del piñón (*Jatropha curcas* L.)". En: Felipe de Jesús Osuna Canizalez, Christopher J. Atkinson, Jorge Miguel Paulino Vázquez Alvarado, Edwin Javier Barrios Gómez, CROOP LOSS Marianaguadalupe Hernández Arenas, Sandra Eloísa Rangel Estrada, Efraín Cruz Cruz. *Simpósio Internacional: Estado del Arte en la ciencia y tecnología para la producción y procesamiento de Jatropha no tóxica*. VOL 60. México. Sagarpa-Inifap-Cirpas. pp. 47-56.
- Minengu, J.D., Verheggen, F. and Mergeail, G. 2015. "Dynamics and impact of major insects pest on *Jatropha curcas* in two cropping systems with contrasting characteristics in the province of Kinshasa (DRC)". *Tropicicultura* 33: 1-13.
- Navia, D., Ochoa, R., Welbourn, C., Ferragut, F. 2010. "Adventive eriophyoid mites: a global review of their impact, pathways, prevention and challenges". *Exp Appl Acarol* 51:225-255.
- Nolasco, G.V., Ayala, E.V., Tovar, P.J.M., Ríos, L.E.G., Calyecac, C.H.G., Miranda, R.A. 2013. "Primer reporte de *Phakopsora arthuriana* en *Jatropha curcas* en México". *Revista Mexicana de Fitopatología* 31: 70-73.
- Nuzzaci, Grand Lillo, E. 1996. "Perspectives on Eriophyoid mite research". *Entomologica, Bari*, 30: 73-91.
- Park, Y.L. and Lee, J.L. 2002. "Leaf Cell and Tissue Damage of Cucumber Caused by Twospotted Spider Mite (Acari: Tetranychidae)". *Journal of Economic Entomology* 95: 252-257.
- Pereira, O.L., Dutra, D.C. and Dias, L.A.S. 2009. "*Lasiodiplodia theobromae* is the causal agent of a damaging root and collar rot disease on the biofuel plant *Jatropha curcas* in Brazil". *Australasian Plant Disease Notes* 4: 120-123.

- Prabhakar, M., Prasad, Y.G., Rao, G.R., Ramakrishna, D. 2008. "Pest of economic importance on *Jatropha curcas* L., a biodiesel plant in Andhra Pradesh, India". *Entomology* 33: 83-86.
- Pretheep, K.P., Tilak, M. and Durairasu, P. 2013. "A model for predicting the infestation of mealybugs in *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) based on the weather parameters". *International Journal of Agriscience* 3: 440-443.
- Regupathy, A. and Ayyasamy, R. 2009. "Need for Generating Baseline Data for Monitoring Insecticide Resistance in new invasive mealy bug *Paracoccus marginatus* Williams and Granara de Willink (Insecta:Hemiptera: Pseudococcidae), the Key Pest of Papaya and Biofuel Crop, *Jatropha curcas*". *Resistant Pest Management Newsletter* 19: 39-42.
- Rathod, P., Gaval, R.A., Charankumar, M.E., Rajanna, M.D. 2011a. "Crop loss of *Jatropha curcas* due to anthracnose". *Journal of Ecobiology* 29: 77 – 80.
- Rathod, P., Suryanarayana, V., Chauhan, T.L. 2011b. "Management of anthracnose in *Jatropha curcas* L." *Journal of Plant Disease Sciences* 6: 44-46.
- Rathod, P. 2012. "Field management package for anthracnose, a destructive disease of *Jatropha curcas* L. - A bio-fuel yielding perennial species". *International Journal of Plant Sciences* 7: 158-160.
- Rezende, J.M., Verona, L.C.R. and Lofego, C.A. 2016. "Mites (Acari) inhabiting *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) crops: the role of seasonality and weeds". *Systematic and Applied Acarology* 21:1515-1524.
- Rezende, J.M. and Lofego, A.C. 2012. "Mites (Mesostigmata, Prostigmata, Astigmatina) associated with weeds among physic nut crops (*Jatropha curcas* L.: Euphorbiaceae) in Brazil". *Systematic & Applied Acarology* 17: 15–26.
- Roese, AD, da Silva, CJ, Pereira, G.A.C., Sales, A.J. 2008. "Ocorrência da ferrugem no Pinhão-Manso, em Mato Grosso do Sul, e efeito de alguns fungicidas no controle da doença". Comunicado Técnico, 145. Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, Brasil. 3 pp.
- Rosado, J.F., Picanco, M.C., Sarmiento, R.A., da Silva, R.S., Pedro- Neto, M., Carvalho, M.A., Erasmo, E.A.L., Silva, R.L.C. 2015. "Seasonal variation in the populations of *Polyphagotarsonemus latus* and *Tetranychus bastosi* in physic nut (*Jatropha curcas*). Plantations". *Experimental and Applied Acarology* 66: 415-426.
- Sahito, H.A., Dhiloo, K.H., Mal, B., Memon, S.A. 2014. "Preliminary studies on monitoring of insect pests and their natural enemies on biodiesel plant, *Jatropha curcas*". *Crown Journal of Medicine* 2: 6-14.
- Sarmiento, R.A., Rodrigues, D.M., Faraji, F., Erasmo, E.A., Lemos, F., Teodoro, A.V., Kichuchi, W.T., Dos Santos, G.R., Pallini, A. 2011. "Suitability of the predatory mites

- Iphiseiodes zuluagai* and *Euseius concordis* in controlling *Polyphagotarsonemus latus* and *Tetranychus bastosi* on *Jatropha curcas* plants in Brazil”. *Experimental and Applied Acarology* 53: 203-214.
- Singh, K., Singh, B., Verma, S.K., Patra, D.D. 2014. “*Jatropha curcas*: a ten year story from hope to despair”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: 35, 356-360.
- Suryanarayana, V., Rathod, P. and Tippeshi, L.C. 2012. “Management package for anthracnose and white mold in *Jatropha curcas*, a biofuel yielding tree species”. *Indian Phytopathology* 6: 166-169.
- Torres-Calzada, C., Tapia-Tussell, R., Garcez-Nexticapan, A., Martin-Mex, R., Quijano-Ramayo, A., Cortes-Velázquez, A., Higuera-Ciapara, I., Perez-Brito, D. 2011. “First report of *Colletotrichum capsici* causing anthracnose in *Jatropha curcas* in Yucatan, Mexico”. *New Disease Reports* 23:6.
- Uc-Vázquez, A., López-Puc, G., Góngora-Canul, C.C., Martínez- Sebastián, G. and Aguilera-Cauich, E.A. 2017. “Spatio-temporal spread of foot rot (*Lasiodiplodia theobromae*) in *Jatropha curcas* L. plantations in Yucatan, Mexico”. *European Journal of Plant Pathology*.
- Uc-Vázquez, A., López-Puc, G., Góngora-Canul, C.C., Martínez- Sebastián, G. and Aguilera-Cauich, E.A. 2018. *Manual para el manejo de las principales plagas y enfermedades que afectan el cultivo de Jatropha curcas L. en el sureste de México*. Ed. Corporativo Inteliplan. Merida Yucatan Mexico.
- Valdés, R.O.A., Pérez, V.A. and Muñoz, G.C. 2014. “Drivers and Consequences of the First *Jatropha curcas* Plantations in Mexico”. *Sustainability* 6: 3732-3746.
- Wu, Y.K., Ou, G.T., Yu, J.Y., Sun J.C. 2012. “First Report of *Botryosphaeria dothidea* (Moug.: Fr.) Ces. & De Not. (Anamorph: *Fusicoccum aesculi* Corda) on *Jatropha curcas* L. in China”. *Journal of Tropical Agriculture* 50: 53-58.
- Zarafi, A.B. and Abdulkadir, I.D. 2014. “Disease progress of *Jatropha* dieback caused by *Fusarium* sp. in Samaru, Zaria”. *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 47: 2458-2463.

### Beneficios ambientales y sostenibilidad

José de Jesús Esparza Claudio\*<sup>1</sup>, Domancar Orona Tamayo<sup>1</sup>,  
Elizabeth Quintana Rodríguez<sup>1</sup>, Ivette Cornejo Corona<sup>1</sup>,  
Andrés Aguilar Ortega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas A.C.,  
Departamento de Soluciones Tecnológicas, Omega Núm 201, Col.  
Industrial Delta, CP 37545, León, Guanajuato

\*Autor por correspondencia: jesarza@ciatec.mx

#### Resumen

El presente capítulo muestra una breve descripción de los beneficios ambientales y principios de sostenibilidad que pueden ser alcanzados si se aprovecha de manera integral el cultivo de *Jatropha curcas* L., donde uno de los escenarios inmediatos es su aplicación como fuente de biomasa o materia prima para la producción de bioetanol, biodiésel, biogás y bioturbosina de segunda generación, en el que puede alcanzar una reducción en las emisiones de GEI superiores al 50% respecto del combustible fósil, lo que se traduce en una huella de carbono menor bajo el contexto de un sistema agrícola eficiente que combine interacciones ecológicas, sociales y económicas. Por lo anterior, la importancia de que este cultivo cumpla con estándares globales y de mitigación al cambio climático mencionados por la RSB (The Roundtable on Sustainable Biomaterials) o al menos el cumplimiento de los indicadores mencionados en la norma voluntaria mexicana NMX-AA-174-SCFI-2014 que establece las

especificaciones y requisitos para la certificación de la sostenibilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal y su reglamento. Por otro lado, se indica el aprovechamiento total del cultivo o biomasa mediante la obtención de productos secundarios de alto valor agregado como: biocompositos o nanomateriales de interés industrial, así como explorar sus aplicaciones como especie con potencial para fitorremediación y recuperación de suelos contaminados con la presencia de metales, tales como: Hg, Pb, Al, Cd, Cr.

## Palabras clave

Sustentabilidad, biomasa, huella de carbono, biomateriales

## Introducción

*Jatropha curcas* L. es una planta multipropósito proveniente de regiones tropicales, su centro de origen es de México y Centroamérica, es ampliamente cultivada en Latinoamérica, África, India y el sureste de Asia. *Jatropha* es, principalmente, una planta energética que produce una concentración muy alta de aceite, el cual es destinado a la producción de biocombustibles. La acumulación de metales pesados es un problema mundial por los efectos negativos sobre la salud humana y animal. *Jatropha* ha mostrado ser tolerante a diversos metales pesados mostrando así un enorme potencial para remediar suelos con estos contaminantes. La planta es usada para mitigar la erosión de los suelos, para restaurar la fertilidad en tierras contaminadas, incluso es ampliamente usada como cercas verdes en granjas y delimitar zonas agrícolas. Además, su aplicación industrial se considera factible, siempre y cuando se desarrolle bajo un sistema de aprovechamiento integral de la planta, en el cual se incluya la producción de compuestos de valor agregado con interés indus-

trial, cosmético, farmacéutico y energético. En este último rubro, la energía producida por la biomasa vegetal de *Jatropha*, significativamente puede contribuir al mismo nivel de energía derivada de recursos no renovables; se han desarrollado tecnologías para poder producir biodiésel y bioturbosina, con altos rendimientos de pureza a partir del aceite contenido en su semilla, sin embargo, la comunidad científica cada vez encuentra más métodos para optimizar cada uno de los pasos en la pureza y así sean combinados en diferente proporción con combustibles de origen fósil. Los desechos provenientes de *Jatropha*, como son hojas, tallos de las podas, así como las cáscaras y pasta de semillas como desechos de la extracción de aceite, pueden ser utilizados para la producción de etanol, biogás y pellets para combustión y calentamiento en hogares, industrias, etcétera, lo cual genera productos con un alto valor agregado y con desarrollo sustentable. En el ciclo de vida del cultivo y producción de biodiésel y bioturbosina de *Jatropha*, sustancialmente se conoce que existe una reducción en la energía utilizada para obtener aceite y por lo tanto la emisión de GEI se ve reducida en forma significativa, comparada con la producción de biocombustibles de manera tradicional, por lo tanto este es un escenario positivo para producir energía a partir de fuentes que son renovables, esto puede contribuir en mitigar la huella de carbono y así minimizar los efectos del cambio climático e incrementar la independencia energética del país por los combustibles fósiles no renovables.

## Agroecología y sustentabilidad del cultivo

El cultivo de *Jatropha curcas* L. ha llamado considerablemente la atención por su potencial para la elaboración de biocombustibles (Edrisi *et al.*, 2015). Alrededor del mundo son numerosos los casos donde el cultivo se ha establecido como un cultivo de oportunidad para pequeños agricultores, por ejemplo: en Asia (India e Indonesia), África (este y oeste) y Latinoamérica (México y Brasil) (Van Eijck *et al.*, 2014). El cultivo presenta características de importancia como tolerancia a la sequía, rápido crecimiento, semillas con alto porcentaje de aceite, adaptación a un gran número de ambientes, entre otros, que lo hacen una excelente opción para la obtención de biocombustibles (Abhilash, *et al.*, 2011). Además, la planta presenta ventajas ecológicas tales como la restauración de suelos,

atenuación de la erosión y su posible uso como barreras para la protección de cultivos (Kumar & Sharma, 2008). Un aspecto importante es desarrollar sistemas agrícolas eficientes que combinen interacciones ecológicas y que tengan importancia económica. *Jatropha* ha resultado ser una excelente barrera de protección utilizada en la India para la protección de cultivos agronómicos contra ganado (Kumar & Sharma, 2008). El cultivo también ha mostrado ser una opción para remediar suelos contaminados con metales pesados (Montes & Melchinger, 2016). Además, suelos agotados han sido recuperados por medio del cultivo mostrando un aumento en la diversidad microbiana y por tanto en la disponibilidad de nutrientes (Wani *et al.*, 2012). Por otro lado, el intercalado de *Jatropha* con cultivos medicinales de la India resultó exitoso revelando que la planta puede ser cultivada con otras especies sin presentar efectos negativos (Sahoo *et al.*, 2009).

Sin embargo, el cultivo también ha presentado serias desventajas, entre ellas que no ha sido explotado en su totalidad mediante el aprovechamiento integral de todas las partes de la planta (Contran *et al.*, 2013). Además, las condiciones agronómicas en las cuales debe crecer no han quedado del todo establecidas presentando una alta variabilidad en su productividad (Kant & Wu, 2011). Numerosas publicaciones han mostrado las fallas presentes en los actuales cultivos y también se ha evidenciado que muchos de los beneficios esperados para el cultivo no fueron corroborados científicamente, sino que estuvieron basados en suposiciones (van Eijck *et al.*, 2014). En México, se presentó el claro ejemplo de abandono del cultivo de *Jatropha* por agricultores en el estado de Chiapas donde el desarrollo de las plantaciones no fue el esperado teniendo como razones de este fracaso la falta de soporte científico, una desinformación y falta de apoyo institucional (Soto *et al.*, 2018). En Etiopía, plantaciones a gran escala del cultivo presentaron un decepcionante desarrollo agronómico y por lo tanto la terminación del proyecto influenciado por factores agroambientales como las condiciones de crecimiento, estrés hídrico y material que no había sido probado a gran escala provocó el fracaso (Wendimu, 2016). La producción de biocombustibles a partir de *Jatropha* parece ser una opción viable financiera y socialmente, sin embargo, esto no es una tarea trivial ya que requiere una investigación científica y de la determinación de las condiciones agronómicas adecuadas para su implementación (Bryant & Romijn, 2014). Los rendimientos podrán ser mejorados para

el uso del cultivo con el desarrollo de tecnologías apropiadas como: la selección de variedades con altos rendimientos, un manejo apropiado del agua, mejora del aprovechamiento de nutrientes, control de plagas (Wendimu, 2016).

## Huella de carbono en el ciclo de vida

Anteriormente, las evaluaciones ambientales de productos se enfocaban solamente en los impactos generados durante la fabricación de los mismos, sin considerar una perspectiva de ciclo de vida, dejando de lado los efectos de la extracción y producción de las materias primas requeridas, las formas de uso y la disposición; los cuales algunas veces representan mayores impactos ambientales que el proceso de producción en sí. La metodología utilizada para conocer y cuantificar los impactos ambientales de un producto de una forma integral es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Una de las biomásas promisorias es la *Jatropha curcas* L., planta conocida también como piñón mexicano, es originaria de Mesoamérica, por lo que en México existe una amplia variabilidad genética (Sepúlveda-González, 2012). Se trata de una especie perenne con alto contenido de aceite en su semilla (26.4 a 56.9% en pruebas de laboratorio), de la que se esperan altos rendimientos (cuatro toneladas por hectárea). Hay variedades tóxicas (*Jatropha curcas* L.) y no tóxicas (*Jatropha platyphylla*). En el país ya se han establecido diferentes plantaciones tanto a nivel experimental como comercial, donde el objetivo de la producción de semilla es como fuente de aceite para la producción de biocombustibles, por ello toma relevancia el ACV de este cultivo, dado que para algunos biocombustibles en especial el de aviación la Roundtable for Sustainable Biomaterials (RSB) considera que un biocombustible deberá generar 50% menos emisiones de GEI en comparación con los combustibles convencionales. Por lo anterior, los impactos ambientales de la producción de biomasa y uso de biocombustibles calculados con el ACV se han aplicado para evaluar combustibles alternativos, entre los más desarrollados se encuentran los estudios orientados a la producción de biometanol y biodiésel a partir de varios cultivos como *Jatropha*, higuierilla y microalgas (Resurreccion *et al.*, 2012).

En el caso de México, el ACV para *Jatropha curcas* L. estima la huella de carbono en un promedio de 0.4476 kg CO<sub>2</sub>e/kg de semilla, incluyendo las emisiones de GEI de las etapas de producción de plántula en vivero, preparación del terreno, trasplante y mantenimiento del cultivo (Esparza-Claudio *et al.*, 2017). Donde la etapa de mantenimiento aporta 96.3% de las emisiones de GEI. El 3.7% restante del impacto se divide de la siguiente forma: 0.7% se refiere a la producción de plántula en vivero debido al consumo de electricidad en el sistema de riego. La preparación del terreno representa 1.3% del impacto potencial derivado a la combustión del diésel en la maquinaria agrícola y, finalmente, el trasplante contribuye con 1.7% del impacto potencial al cambio climático de la etapa de cultivo, lo cual se debe a las emisiones durante la producción del fertilizante, así como las emisiones de óxido de dinitrógeno (N<sub>2</sub>O) debido a la aplicación del mismo (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Análisis de contribución por proceso unitario a la huella de carbono de la etapa de cultivo**

Proceso	kg CO <sub>2</sub> e/ kg de semilla	%
Producción de plántula	0.0033	0.7%
Preparación del terreno	0.0058	1.3%
Trasplante	0.0075	1.7%
Mantenimiento del cultivo	0.4309	96.3%
<b>Total</b>	<b>0.4476</b>	<b>100.0%</b>

En el Cuadro 2 se presenta el análisis de contribución durante el proceso de mantenimiento de cultivo. Las emisiones al aire representan 37% del impacto en esta etapa y corresponden principalmente a las emisiones de N<sub>2</sub>O por el uso de fertilizantes nitrogenados. Debido al nivel de consumo de fertilizantes para el mantenimiento de cultivo, las emisiones durante la producción de

los mismos tienen una contribución importante del impacto (37%). La producción de materiales de empaque (botellas, sacos, bolsas, etcétera) para los insumos del mantenimiento corresponde al 4% de las emisiones de GEI. Por otro lado, el transporte constituye un elemento significativo en el impacto al cambio climático, con 19% de las emisiones de GEI. De este 19%, 6.9% corresponde al transporte del fertilizante y aproximadamente 11.6% corresponde al transporte de la composta. El restante (aproximadamente 0.1%) corresponde al transporte de los otros insumos requeridos como plaguicidas y herbicidas. Por último, la generación de electricidad y obtención de diésel que se consumen durante el mantenimiento, así como la manufactura del tractor, la disposición de empaques en relleno sanitario y confinamiento no son significativos para la huella de carbono, ya que su contribución es del 3%.

### Cuadro 2. Impacto potencial al cambio climático y análisis de contribución del mantenimiento de cultivo

Proceso	kg CO <sub>2</sub> e/kg de semilla	%
Emisiones al aire	0.1579	37%
Fertilizante	0.1599	37%
Empaques de insumos	0.0186	4%
Transporte de materiales	0.0803	19%
Electricidad, obtención del diésel, disposición de residuos	0.0145	3%
<b>Total</b>	<b>0.4313</b>	<b>100%</b>

Si bien se emite de manera directa e indirecta  $\text{CO}_2$  por la producción de *Jatropha*, es importante considerar el  $\text{CO}_2$  que se almacena y desprende de la biomasa de la propia planta, dado que es una planta perenne, a esto se le considera como el balance de carbono biogénico, el cual consiste en cuantificar la absorción de  $\text{CO}_2$  durante el crecimiento de la planta y la emisión de  $\text{CO}_2$  debido a la degradación de la biomasa generada en las podas y remoción del cultivo al finalizar el periodo de 16 años (etapa productiva del cultivo recomendada por INIFAP).

Para la cuantificación de absorción de  $\text{CO}_2$  se emplean factores determinados por el IPCC, el cual considera que 47% del peso de la biomasa desarrollada es carbono. En el Cuadro 3 se presentan los datos reportados por la línea de investigación de ACV y Sostenibilidad del clúster bioturboquina, donde se menciona que la biomasa promedio que crece durante los 16 años del cultivo y que es transformada a  $\text{CO}_2$  empleando la relación de peso molecular (44/12) es de 134.6 t/ $\text{CO}_2$ .

### Cuadro 3. Cálculo de la absorción de $\text{CO}_2$ durante el mantenimiento del cultivo

Mantenimiento cultivo	kg biomasa	kg C	kg $\text{CO}_2$
Poda de formación	36,000	16,920	62,040
Poda al año 8	11,213	5,270	19,323
Remoción de cultivo al año 16	30,938	14,541	53,316
<b>Total</b>	<b>78,150</b>	<b>36,731</b>	<b>134,679</b>

Respecto de la emisión de  $\text{CO}_2$  asociada a la degradación de la biomasa generada en la poda de formación, la poda del año ocho y la remoción total del cultivo, se reporta dentro del informe del ACV del clúster de bioturboquina un promedio expresado en porcentaje de lo que corresponde a los troncos (52%) y a los tallos y hojas (48%) a partir de diversos estudios de caracterización de plantas (Cuadro 4).

**Cuadro 4. Emisión de CO<sub>2</sub> por degradación de biomasa durante el cultivo de *Jatropha***

Mantenimiento cultivo	Troncos (52%)		Tallos y hojas (48%)	
	C	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Poda de formación	0	0	10,109	196
Poda al año 8	2,716	9,959	1,526	30
Remoción de cultivo al año 16	7,494	27,480	4,210	82
<b>Total</b>	<b>10,211</b>	<b>37,439</b>	<b>15,844</b>	<b>308</b>
	kg CO <sub>2</sub> e	37,439.1	15,843.8	8,539.6

En el Cuadro 5 se muestra el balance de carbón biogénico del cultivo de *Jatropha*, el cual absorbe en promedio 746.38 toneladas de CO<sub>2</sub>e por cada kg de semilla; sin embargo, este resultado no es definitivo dado que el balance está directamente ligado al desarrollo de la planta y ésta su vez a las condiciones climáticas y de nutrición vegetal las cuales son muy variantes en el tiempo y localización geográfica del cultivo.

**Cuadro 5. Resultado del balance de carbono biogénico**

	Absorción de CO <sub>2</sub> Biogénico	Emisión de CO <sub>2</sub> Biogénico
Biomasa	134,678.5	61,822.5
Semillas	673,521.5	0
Total	808,200.02	61,822.5
Balance	746,377.5	kg CO <sub>2</sub> e/kg semilla

## Sostenibilidad del cultivo de *Jatropha*

En el contexto de la sostenibilidad global y la mitigación al cambio climático, la *J. curcas* L. es una alternativa para las cadenas productivas de la bioenergía. La bioenergía es la fuente de energía renovable más utilizada hoy por hoy para el suministro de energía primaria y, aunque se usa todavía en formas tradicionales (para la cocción de alimentos y aplicaciones de calentamiento), existe una extensa investigación y desarrollo de nuevas formas de transformación de la biomasa en electricidad, calor y combustibles sólidos, gaseosos y líquidos que están generando diversas emergentes (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012). Los combustibles líquidos obtenidos a partir de aceites vegetales (biocombustibles), como es el caso de aquellos producidos a partir de semillas de *Jatropha*, representan una importante alternativa para enfrentar la seguridad energética de los países y contribuir a la mitigación del cambio climático.

Sin embargo, es importante establecer el hecho de que la producción de biocombustibles o biomateriales implica el consumo de combustibles fósiles en todas las etapas de su fabricación: cultivo, transformación, transporte y distribución; ello porque las operaciones y procesos requieren energía eléctrica y térmica, además de toda clase de transportaciones y otros trabajos para los que se utiliza maquinaria y vehículos, que funcionan con combustibles fósiles. Sumado a ello, el uso de suelos para el cultivo de especies para la bioenergía, puede desplazar cultivos dedicados a la alimentación, lo que representa una competencia con la seguridad alimentaria en el ámbito local, regional o nacional. Por lo cual, es de vital importancia, para la aplicación de la *Jatropha* en la producción de bioenergía, el asegurar su apego a los principios de la sostenibilidad evitando competir con la seguridad alimentaria y generando un balance favorable en la emisión de gases de efecto invernadero, a través de un enfoque integral económico, ambiental y social que maximice los beneficios de la bioenergía alternativa y minimice sus riesgos (Elbehri *et al.*, 2013).

Los esfuerzos por resolver la complejidad de la sostenibilidad de los biocombustibles y la biomasa han significado una serie de iniciativas de parte de los gobiernos de los países, entidades del sector privado y grupos de interesados múltiples. El resultado de ello ha sido el diseño de estándares, criterios e indicadores que buscan asegurar, de una manera confiable y medible, la

sustentabilidad real de los biocombustibles y la producción de biomasa en la práctica y en condiciones locales específicas (Elbehri *et al.*, 2013). En México ya se cuenta con la Norma Mexicana NMX-AA-174-SCFI-2014 que establece las especificaciones y requisitos para la certificación de la sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal, y su reglamento (Secretaría de Economía, 2015). Actualmente, la RSB (The Roundtable on Sustainable Biomaterials, por sus siglas en inglés), organización internacional independiente, ofrece la certificación más confiable y reconocida en el mundo, asegurando la cobertura de todos los aspectos de la sustentabilidad. Ello a través de sus principios y criterios para la producción de biomasa, biocombustibles y biomateriales, que involucran todos los aspectos del ambiente, la sociedad y la economía de una manera responsable (Roundtable on Sustainable Biomaterials and the Change Agent Collective, 2016).

Actualmente, la Unión Europea cuenta con el esquema más completo y avanzado en el mundo para la implementación sostenible de biocombustibles y biolíquidos (Biopaliw, 2010). Aplica de igual forma a los producidos internamente, como a aquellos importados. Incluye criterios relacionados con la contención de gases de efecto invernadero (GEI), requerimientos agrícolas y ambientales (y estándares para los agricultores de la Unión Europea), cálculo del impacto de los GEI, cumplimiento de criterios relacionados con los derechos de la tierra (su valor en biodiversidad y almacenamiento de carbono). Existen 16 esquemas reconocidos por la Comisión Europea, de ellos, la RSB RED es uno de los más robustos (aplicable a un amplio espectro de biomasa, biomasa producidas en cualquier país del mundo, cubre la cadena de suministros completa y cumple con los criterios de biodiversidad, almacenamiento de carbono, pantanos y sistema de balance de masa) con reconocimiento vigente (cinco años) a partir de 2016 y con una versión de aplicación global.

El estándar RSB se compone de 12 principios (Cuadro 6) que se aplican a todas las etapas de la cadena de suministros para la producción de cualquier tipo de biocombustible o biomaterial. En el caso de la producción de biomasa (materia prima del biocombustible), del cultivo de la *Jatropha*, la operación económica que debe certificarse es la de la etapa de la cadena dedicada a la producción de la semilla (todas las actividades involucradas en su cultivo).

La *Jatropha* ofrece ventajas importantes para una certificación de sostenibilidad por sus características *ad hoc* con varios de los principios del estándar RSB. Por ejemplo, las plantaciones de este cultivo se orientan a sitios donde es posible favorecer el desarrollo rural proporcionando empleo en zonas agrícolas marginadas.

En términos de la huella de carbono (emisiones de gases de efecto invernadero), por ser un cultivo perenne no requiere de los trabajos agrícolas comunes para los cultivos anuales y bianuales: preparación de la tierra, barbecho, limpieza, etc., que requieren uso de maquinaria. Además, es un cultivo multipropósito que a través del aprovechamiento de sus residuos permite reducir la huella de carbono, generando coproductos pueden sustituir productos convencionales de mayor huella de carbono, por ejemplo: alimento para ganado o biomateriales (se encuentran en desarrollo).

En el Cuadro 6 se muestran los principios de la RSB, donde uno de los indicadores más relevantes que cubre este cultivo es el de seguridad alimentaria local, ya que las plantaciones se orientan a suelos en desuso, o bien, a suelos degradados. Ello con el fin de impedir la competencia de este cultivo con otros que proveen alimentos a la población. Si la plantación se implementara en terrenos dedicados a la producción de alimentos, el desplazamiento de los mismos podría propiciar, si la demanda de alimentos permanece, el uso de suelos que representan servicios ambientales vitales (por ejemplo: cambio de uso de suelo forestal a agrícola). En cambio, si este cultivo se desarrolla en terrenos ociosos o degradados, no sólo no compete con los alimentos sino que, además, impide efectos indirectos que son adversos a los servicios ambientales locales o regionales y representa una recuperación de suelos en desuso.

**Cuadro 6. Principios RSB para la certificación de sostenibilidad de *Jatropha curcas* L.**

Principio	Aplicación en la producción de biomasa
Legalidad	La plantación de <i>Jatropha</i> debe cumplir con todas las leyes, reglamentos, normas y otras regulaciones de nivel municipal, estatal y federal vigentes y aplicables al sitio de la plantación, y con los acuerdos internacionales que apliquen

Continuación Cuadro 6...

Principio	Aplicación en la producción de biomasa
Planificación, monitoreo y mejora continua	Los riesgos ambientales y sociales asociados a la plantación de <i>Jatropha</i> deben ser identificados, mitigados y monitoreados mediante un proceso de planificación, implementación y mejora continua
Emissiones de gases de efecto invernadero	La mitigación al cambio climático por el uso del biocombustibles producido a partir de aceite de <i>Jatropha</i> , como sustituto de algún combustible fósil, debe ser: reducción significativa de emisiones de gases de efecto invernadero respecto de los combustibles fósiles
Derechos humanos y laborales	En la ejecución de los trabajos relacionados con la plantación de <i>Jatropha</i> no se violarán los derechos humanos ni los laborales, y se promoverá el trabajo decente de los trabajadores y su bienestar
Desarrollo rural y social	La plantación de <i>Jatropha</i> contribuirá al desarrollo social y económico local, rural y de los indígenas (cuando sea el caso), y de las comunidades en regiones de pobreza
Seguridad alimentaria local	La plantación de <i>Jatropha</i> ayudará al aseguramiento del derecho humano de acceso a alimentos adecuados y contribuirá con la seguridad alimentaria local
Conservación	La plantación de <i>Jatropha</i> evitará los impactos negativos en la biodiversidad, ecosistemas y otros valores de conservación
Suelo	La plantación de <i>Jatropha</i> mantendrá la salud del suelo agrícola y aplicará prácticas de recuperación de suelos degradados

Continuación Cuadro 6...

Principio	Aplicación en la producción de biomasa
Agua	La plantación de <i>Jatropha</i> mantendrá o mejorará la calidad y disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas, y respetará el derecho al agua de las personas de la localidad
Calidad del aire	La plantación de <i>Jatropha</i> minimizará la contaminación del aire a lo largo de toda su cadena de suministros
Uso de tecnología, insumos y gestión de residuos	La operación de la plantación de <i>Jatropha</i> maximizará la eficiencia de su desempeño social y ambiental, y minimizará los riesgos de daño al ambiente y a las personas
Derecho a la tierra	La plantación de <i>Jatropha</i> respetará los derechos tradicionales a la tierra de las comunidades indígenas y de las comunidades locales

Fuente: adaptado de *Roundtable on Sustainable Biomaterials, Principles & Criteria 2016* (Roundtable on Sustainable Biomaterials, 2017).

La certificación en el Estándar RSB también asegura que las plantaciones no invadan áreas naturales protegidas o corredores ecológicos, y que no violenten los valores de conservación legítimos de la región. Aunque este cultivo crece en forma favorable en sitios con precipitación pluvial anual de más de 944 mm (Fini *et al.*, 2013), es conocida por ser resistente a la escasez de agua y nutrientes (Achten *et al.*, 2008). Esta característica permite optimizar el uso de agua de la plantación preservando la disponibilidad de agua para la población local y propiciando un balance adecuado para todos los usos del agua requeridos.

Los principios de legalidad, planificación, monitoreo y mejora continua, derechos humanos y laborales, suelo, calidad del aire, uso de tecnología, insumos y gestión de residuos, y derecho a la tierra se cumplen mediante la implementación de buenas prácticas que sean verificables y sostenidas.

## Aprovechamiento para la generación de productos secundarios

De acuerdo con diversas fuentes, el género *Jatropha* abarca alrededor de 175 especies (Missouri Botanical Garden, 2018), es originaria de América, su uso es cotidiano y muy antiguo. La planta es usada para mitigar la erosión de los suelos, para restaurar sustratos en tierras contaminadas, incluso es ampliamente usada como barrera de protección en granjas (Contran *et al.*, 2013). En México la planta es conocida como piñón, a la cual se le han atribuido propiedades medicinales y ha sido empleada en la medicina tradicional por muchas generaciones (UNAM, 2009). De todas las variedades son pocas las aprovechadas que se emplean tradicionalmente, como por ejemplo: las varas de *J. cuneata* para tejer canastos; *J. integerrima* es usada como planta ornamental por sus flores grandes y llamativas (Romero, *et al.*, 2017); *J. multifida* es consumida en algunas regiones de México como verdura por las personas; *J. podagrica* es usada para extraer un tinte rojo en la zona norte de México y suroccidente de Estados Unidos; *J. curcas* es usada en infusión por contar con efecto antiviral, antibiótico y homeostático (Jones & Miller, 1992).

La especie de mayor popularidad es *Jatropha curcas* L., considerada en el ámbito internacional como una de las principales fuentes para producir biocombustible a partir del aceite contenido en sus semillas (Akbar *et al.*, 2009; Pandey *et al.*, 2012). Su aplicación industrial se considera factible, siempre y cuando se desarrolle bajo un sistema de aprovechamiento integral de la planta, en el cual se incluya la producción de compuestos de valor agregado (Openshaw, 2000). Por esta razón se está adoptando el principio de biorrefinería para establecer la tecnología requerida para el procesamiento de toda la planta y la obtención de una serie de productos de interés industrial, cosmético, farmacéutico y energético (Navarro-Pineda *et al.*, 2016).

Se ha publicado una serie de estudios con respecto a las propiedades químicas de las partes de la planta de *Jatropha*, por lo que es posible considerar la conjunción de tecnológica para la producción de una serie de productos de interés comercial en una biorrefinería de *Jatropha*. Aunque existe una variación de las características fisicoquímicas de las plantas y aspectos anti-nutricionales, así como el grado de toxicidad causado por la presencia de los

ésteres de forbol, de acuerdo con la variedad de las mismas, existe una serie de aplicaciones que no son afectadas por estas variables antinutricionales que pueden ser explotadas en un mismo sistema de transformación a productos (Kumar & Sharma, 2008), además en México se cuenta con variedades no tóxicas que están siendo aprovechadas e incluso consumidas como alimento (Makkar *et al.*, 1998).

En el proceso industrial convencional se ha llevado a cabo la extracción del aceite de la semilla por un prensado en frío, el cual tiene una eficiencia de extracción de hasta 75% en base a peso seco de la semilla (Lim & Lee, 2011), aunque existen otros procesos, éste es el más común y económico. El volumen de aceite contenido en la semilla representa menos del 10% del total de biomasa producida por la planta de *Jatropha*, por lo que es indispensable identificar los productos y subproductos que pueden ser obtenidos de las otras partes de la planta.

La producción de biomasa, de acuerdo con diferentes estudios, puede ser variable, pero si el cultivo es manejado bajo condiciones propicias para la producción de frutos, el 50% de la biomasa representará el fruto y el otro 50% serán las hojas y tallos, 25%, respectivamente, con base en el peso seco de la planta (Openshaw, 2000). El fruto que está compuesto por tres semillas que representan el 60-70% del peso seco del fruto, el resto es el pericarpio. La semilla está compuesta de una capa tegumentaria y del endospermo que representa el 60-70% del peso seco de la semilla y es en el endospermo en donde está contenido el aceite, que representa el 65-75% del peso seco del mismo (Lim & Lee, 2011).

Los productos que pueden ser obtenidos de la planta son clasificados de acuerdo con la parte de la planta de la cual son obtenidos, en la Figura 1 se muestra un diagrama de algunos productos directos e intermedios que han sido reportados para las diferentes biomásas que constituye la planta y que han sido caracterizados químicamente (Kumar & Sharma, 2008), y tienen usos comerciales de los productos en la actualidad (Navarro-Pineda *et al.*, 2017).

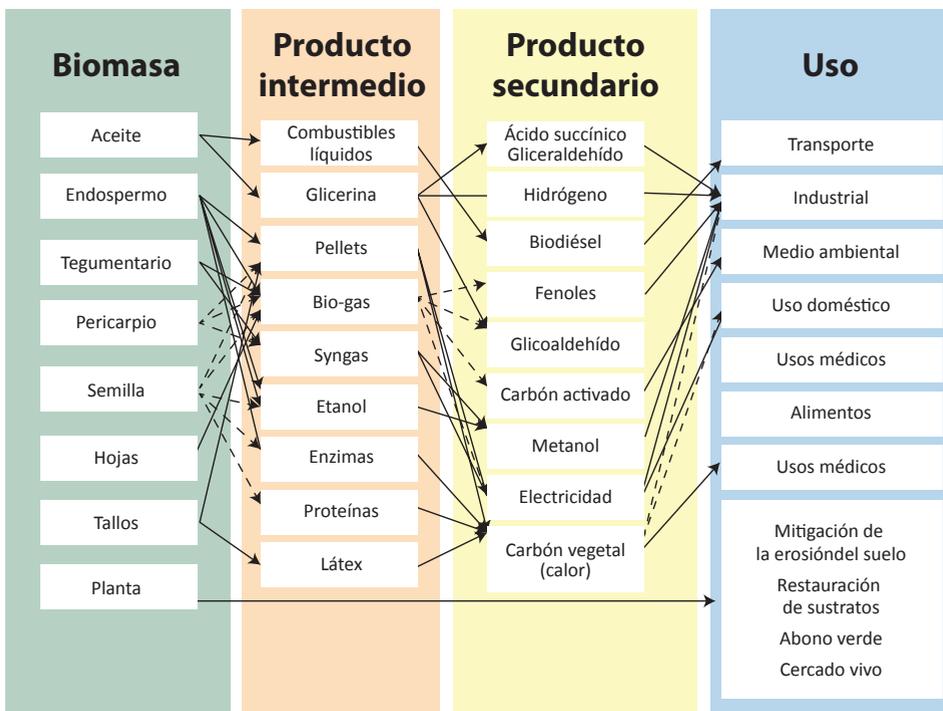


Figura 1. Panorama de los usos para los diferentes productos generados y procesos de obtención para/de compuestos de interés a partir de las diferentes partes de la planta de *J. curcas*.

La parte leñosa de la planta, compuesta por los tallos y ramas, es la menos explotada, se conoce su composición lignocelulósica estimada en 12% de lignina, 13% de celulosa y 26% de hemicelulosa, esta parte de la planta puede ser empleada como alimentación en un proceso de fermentación para la producción de etanol u otros alcoholes (Liang *et al.*, 2010) o para la formulación de biocompositos o nanomateriales de interés industrial (SaifulAzry *et al.*, 2017), también es usada como combustible sólido por su poder calorífico de 15.5 MJ/kg (Contran *et al.*, 2013). A partir de los tallos se obtiene látex (Thomas *et al.*, 2008) y péptidos con propiedades antimicrobianas (van den Berg *et al.*, 1995).

La semilla es la parte más demandada de la planta debido al aceite contenido en ella. Por lo general es procesada completa, es decir, el tegumento y endospermo que son posteriores a la obtención del aceite, que son considerados residuos, y que representan alrededor del 70% del peso de la semilla, y que se muestran como una “pasta”, es usada como fertilizante o como suplemento alimenticio en animales de granja, e incluso como combustible sólido (Singh *et al.*, 2008). Se han estudiado las propiedades fisicoquímicas para el tegumento, encontrando altas concentraciones de lignina de hasta 40%, celulosa de hasta 60% y un poder calorífico de hasta 20 MJ/kg, sugiriéndose su uso en procesos de fermentación para la obtención de biogás cuyo proceso genera como productos secundarios fenoles, gliceraldehídos, carbono orgánico, entre otros productos, dependiendo del proceso de transformación (Kratzeisen & Müller, 2013). En el caso del endospermo es la parte con mayor riqueza energética de la planta, ya que además de contener el aceite, tiene un alto poder calorífico de hasta 31.6 MJ/kg, y un contenido de proteína de hasta 68% de peso de la semilla (Navarro-Pineda *et al.*, 2017). Además, se puede obtener un mayor número de productos, como enzimas y proteínas que pueden ser aisladas por sus propiedades medicinales en tratamientos para la artritis, gota o ictericia (Contran *et al.*, 2013; Thomas *et al.*, 2008), por sus propiedades catalíticas (Staubmann *et al.*, 1999) incluso mediante hidrolizados proteicos del endospermo pueden ser empleados en la fabricación de alimentos debido a sus constituyentes (Ye *et al.*, 2009). De acuerdo con estudios, se ha predicho que mediante procesos de transformación, como la pirolisis, se pueden obtener múltiples subproductos como biogás, fenoles, retardantes de flama, gliceraldehídos, carbonos activados y combustibles líquidos (Wang, 2016), todos ellos con demanda industrial. El aceite obtenido de la semilla es empleado para la producción de combustibles líquidos mediante un proceso catalítico del cual se puede generar diésel verde o gasolina verde demandado por la industria del transporte principalmente o mediante un proceso de transesterificación que genera ácidos grasos que son a su vez transformados en biodiésel, requerido también por la industria del transporte, cuyo producto secundario es el glicerol que puede ser transformado en ácido succínico, hidrógeno, gliceraldehído y algunos otros productos de uso industrial (Bevilacqua-Leoneti *et al.*, 2012).

Cualquiera de las biomásas puede ser pelletizada para aumentar su poder calorífico y ser empleada como combustible sólido en la industria (Karlsson *et al.*, 2014). Sin embargo, el costo de los pellets no es alto por lo que se debería establecer una estrategia en la que sean extraídos los compuestos de valor agregado antes del proceso de pelletizado; comercialmente, hoy en día se lleva a cabo este proceso a los frutos inmaduros o dañados con la intención de darle un uso (Wing, 1996). Por otro lado, los alimentos son sometidos a este proceso para aumentar el contenido calórico (Foltin, 1992) y reducir los volúmenes de materia; también, sirve de manera indirecta para reducir el tiempo y costo de transporte (Hamelinck *et al.*, 2005).

## Fuente promisoría para la generación de biocombustibles

El uso de la biomasa vegetal para obtener energía ha sido fundamental para el desarrollo y beneficio de las civilizaciones. La energía producida por la biomasa vegetal, significativamente puede contribuir al mismo nivel que la producción de energía proveniente de la quema de combustibles fósiles y su consumo podría incrementar en un futuro el escenario mundial del consumo de energías renovables (Vasudevan *et al.*, 2005). *Jatropha* es una especie de planta muy utilizada para la producción de aceite y posteriormente ser convertido a biodiésel, sin embargo, esta planta puede ser utilizada con fines multipropósitos como es la generación de diferentes biocombustibles.

## Producción de biodiésel y bioturbosina

El biodiésel es una de las fuentes renovables de energía más notables que hoy en día atrae la atención del mundo, éste es derivado a partir de los aceites de plantas y también de algas, con características similares a los hidrocarburos del petróleo (Devappa *et al.*, 2010). Las semillas de *Jatropha* tienen una alta concentración de aceite que va desde 300-400 g/kg; sin embargo, este aceite tiene la presencia de algunos compuestos que son tóxicos, como esteres de forbol, alto contenido de ácido esteárico y ácidos libres, lo cual impiden su uso con fines alimenticios (Kamel *et al.*, 2018). El aceite virgen es transformado a biodiésel por una reacción de transesterificación mezclando alcoholes y catalizadores.

Los principales productos obtenidos de este proceso son ésteres, glicerol y alcohol, los cuales son separados posteriormente. Todos estos procesos para producir biodiésel ayudan a reducir la viscosidad producida por el glicerol, así como el punto de ignición (Rahman *et al.*, 2010); otros parámetros que son importantes en la producción del biodiésel son la viscosidad ( $5.34 \text{ mm}^2/\text{s}$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Rahman *et al.*, 2010), poder calorífico ( $39 \text{ MJ/kg}$ ) (Ghosh *et al.*, 2008), punto de temperatura mínima ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (Rashid *et al.*, 2010), el punto de ignición ( $137 \mu\text{m}$ ) (Rashid *et al.*, 2010), así como el contenido de sulfatos ( $0.011\text{-}0.016\%$ ) (Rashid *et al.*, 2010); todos estos parámetros ayudan a incrementar el octanaje y subir la calidad del biodiésel y por lo tanto su precio.

Recientemente, la asociación internacional de líneas aéreas (IATA, por sus siglas en inglés), las compañías más grandes de aviones como Boeing y Airbus, y en México la administradora de aeropuertos y servicios auxiliares (ASA) (Sepúlveda-González, 2012) han puesto la vista en la producción de biocombustibles proveniente de cultivos energéticos como una solución para mitigar la emisión de GEI (Hari *et al.*, 2015). Con esta apuesta, estas compañías y asociaciones han formalizado un plan para agregar a la turbosina diferentes fracciones de bioturbosina proveniente de aceites de plantas no comestibles. En México esto se trabajó en el “plan de vuelo para los biocombustibles sustentables”, convocado por ASA entre junio de 2010 y marzo de 2011 (Diputados, 2008). La bioturbosina debe reducir la emisión de GEI en más 50% en su ciclo de vida, con respecto de la turbosina (de Jong *et al.*, 2017). Se espera que, gracias a la tecnología, en el tiempo el costo de la bioturbosina baje, mientras, por escasez, suba el del petróleo. De esta manera, en el ámbito mundial estas compañías han establecido que para 2015 se adicionó 1% de bioturbosina a la turbosina; para 2017, 10%; para 2020, 15%, y así sucesivamente hasta cambiar al menos 50% del origen del combustible aéreo para 2050. En México se vende 2% del combustible aéreo del mundo. Esto significa una demanda inicial de 40 millones de litros de bioturbosina para 2015 y de unos 700 millones de litros para 2020 (Sepúlveda-González, 2012).

## Producción de bioetanol

Después del proceso de extracción del aceite de la semilla de *Jatropha*, una gran cantidad de desechos son generados, como cáscaras y pasta. Se cree

que una tonelada de semilla de *Jatropha* produce entre 300-400 L de aceite y producen 2.4 toneladas de desechos (Sharma and Pandey, 2009), por lo tanto la disposición de los desechos de *Jatropha* en el futuro podrían acarrear un problema, sin embargo, investigadores se han dado a la tarea de aprovecharlos y producir etanol. La composición proximal de la cáscara y la pasta de la semilla de *Jatropha* varían en su composición lignocelulósica, por ejemplo, la pasta contiene 33.3% de lignina, 16.8% de celulosa y 10.4% de hemicelulosa (dos Santos *et al.*, 2014), por otro lado la cáscara tiene en su contenido 47.6% de lignina, 22.3% de celulosa y 23.8 de hemicelulosa (Wever *et al.*, 2012). La cáscara y la pasta de *Jatropha* resultan excelentes sustratos para inocular hongos productores de enzimas degradadoras de material lignocelulósico y hacer la bioconversión a etanol por medio de fermentación. Basado en resultados obtenidos de la fermentación alcohólica de pasta de semilla de *Jatropha*, inoculadas con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, se han obtenido rendimientos de 88.5 litros de etanol por cada tonelada de pasta de semilla de *Jatropha* (dos Santos *et al.*, 2014). El bioetanol mezclado con la gasolina puede producir un biocombustible con un alto poder energético muy similar a la gasolina convencional, reduciendo las emisiones GEI. En varios países es común encontrar gasolinas con concentraciones de entre 5-10% (E5 y E10), pero también ofrecen la opción de encontrarla con 85% de etanol y 15% de gasolina (E85) (Gunnarsson *et al.*, 2017).

## Producción de biogás

La pasta de semillas de *Jatropha* es un material usado para la producción de biogás a través de la digestión aeróbica. Se han obtenido rendimientos de 60% de biogás mayores comparado con el uso de estiércol de ganado (Staubmann *et al.*, 1997). Diferentes concentraciones en la producción de biogás proveniente de la pasta han sido obtenidas con rangos de 0.281-0.446 m<sup>3</sup>/kg y concentraciones de metano (70%) por cada kg de pasta seca (Jabłoński *et al.*, 2017; Sharma and Pandey, 2009). Adicionalmente, las cáscaras y residuos de las podas de los árboles de *Jatropha* también pueden ser utilizadas para la obtención de biogás (Singh *et al.*, 2008; Staubmann *et al.*, 1997).

## Producción de pellets para combustión

Residuos como las cáscaras y la pasta de la semilla de *Jatropha* pueden utilizarse para la elaboración de pellets para combustión para calderas industriales, estufas, calentadores de agua domésticos entre otros (Kavalek *et al.*, 2013). Las propiedades energéticas de combustión de los pellets provenientes de estos materiales orgánicos alcanzan valores altos de combustión con rangos de 19.1-19.5 MJ/kg más altos que pellets de madera (Makkar and Becker, 2009; Thapa *et al.*, 2018).

## Fitorremediación y recuperación de suelos erosionados

*Jatropha curcas* presenta otras características además del aprovechamiento de su aceite para biocombustibles, una de ellas es su capacidad para llevar a cabo fitorremediación de suelos contaminados (Achten *et al.*, 2010). Las plantas seleccionadas para esta función deben tener una serie de atributos fisiológicos como: ser de rápido crecimiento, formar biomasa, tolerantes a condiciones ambientales adversas, tener un sistema de raíces profundo y que brinden un beneficio económico, características que cumple el cultivo de *Jatropha* (Pandey *et al.*, 2011). La acumulación de metales pesados es un problema mundial por los efectos negativos sobre la salud humana y animal. Hg, Pb, As, Cd, Cu, Cr; Ni, Al y Zn son los metales más comunes encontrados en suelos y con efectos negativos por su actividad carcinógena y mutagénica (Chang *et al.*, 2014). *Jatropha* ha mostrado ser tolerante a Cd, As, Cr y Zn mostrando así un enorme potencial para remediar suelos con estos contaminantes (Kumar *et al.*, 2008). Igualmente, el cultivo ha mostrado efectividad para remediar suelos contaminados con Cr<sup>6+</sup> (Kumar & Sharma, 2008). Por otro lado, también el cultivo mostró una alta capacidad para remediar sitios contaminados con Pb y Cd (Agamuthu *et al.*, 2010). La bioconcentración de mercurio en la planta ha sido reportada presentando un alto potencial para la remediación de suelos contaminados con este metal (Marrugo-Negrete *et al.*, 2015). La bioconcentración está relacionada con la capacidad de acumular metales en relación con la biomasa (Kumar *et al.*, 1995). Una bioconcentración para As, Cr y Zn fueron encontradas en la biomasa de *Jatropha* cuando ésta creció en suelos contaminados con estos metales (Yadav *et al.*, 2009).

Chang y colaboradores, en 2014, mostraron que *Jatropha* puede absorber metales como Cd, Ni y Zn y transferirlos a las partes aéreas mientras que algunos metales como Cu, Cr y Pb interactúan fuertemente con las células de las raíces permaneciendo acumuladas en éstas (Chang *et al.*, 2014). Bajo condiciones de invernadero, la planta ha mostrado tolerancia a altas concentraciones de aluminio, un metal prevalente en suelos ácidos que no son aptos para la agricultura (Senger *et al.*, 2014). *Jatropha* puede ser utilizada como una herramienta para la restauración de suelos mineros debido a su habilidad para acumular metales (Kumar & Sharma, 2008).

Asimismo, el cultivo tiene un alto potencial por su capacidad de restaurar la fertilidad de suelos erosionados (Islam *et al.*, 2011). La degradación de suelos es definida como la pérdida de la fertilidad como una consecuencia del uso inadecuado de los mismos (Kagabemga *et al.*, 2011). Las investigaciones en suelos erosionados han mostrado que las raíces de las plantas desempeñan un papel importante; el sistema de raíces que desarrolla *Jatropha* resulta prometedor para el control de la erosión (Achten *et al.*, 2010). Reubens mostró que las raíces laterales de *Jatropha* permitían la cohesión del suelo, además fue posible mejorar la humedad superficial (Reubens *et al.*, 2011). Sin embargo, en sitios con baja disponibilidad de agua el sistema radicular de *Jatropha* es afectado negativamente, así como su desarrollo total (Contran *et al.*, 2013). Kagamebga y colaboradores, en 2011, mostraron que desarrollando un sistema para la disponibilidad de agua con técnicas de reforestación, la planta es capaz de conservar sus propiedades de mejoramiento de suelo (Kagabemga *et al.*, 2011). Un modelamiento, realizado por Giadrossich y colaboradores, mostró que las raíces secundarias de *Jatropha* disminuyen en cuanto se van alejando del tallo, lo cual muestra que no hay un reforzamiento del sistema radicular con el paso del tiempo en comparación con otros cultivos utilizados con el mismo propósito (Giadrossich *et al.*, 2016). A pesar de estos aspectos, *Jatropha* aún resulta una buena opción para la restauración de suelos debido a su fácil propagación, rápido crecimiento y adaptación a ambientes contaminados y de bajos nutrientes (Pandey *et al.*, 2011). *Jatropha* ha mostrado adaptarse a suelos bajos en nutrientes, sin embargo, con implicaciones negativas en su productividad. Aspectos que se mejoran gracias a su asociación con hongos micorrizicos arbusculares (HMA), lo cual incrementa la captación de nutrientes (Kumar *et al.*, 2010). Estudios han mostrado que *J. curcas*

en asociación con HMA puede crecer en sitios marginales donde el fosfato es limitante (Kumar *et al.*, 2015). Además, cambios positivos en la diversidad y densidad de la comunidad de HMA se ha encontrado con el cultivo de *J. curcas* (Kamalvanshi *et al.*, 2012). El cultivo también ha mostrado una contribución en la calidad del suelo manteniendo los niveles de nitrógeno y carbono y al desarrollar el secuestro de carbono (Ogunwole *et al.*, 2008). Estudios han mostrado que *Jatropha* cuando crece en suelos degradados fija y adiciona cantidades de carbono al suelo. Además de la acumulación del propio cultivo, hay una contribución en el ciclo por el reemplazamiento de C en los combustibles fósiles (Wani *et al.*, 2012). El cultivo como se menciona es capaz de establecer interacciones con microorganismos del suelo, lo cual mejora la captación de nutrientes y por tanto incrementa la fertilidad del suelo (Krishnamurthy *et al.*, 2012).

Múltiples beneficios ambientales pueden ser alcanzados con el cultivo al mejorar la calidad del suelo, por la remediación de suelos contaminados, erosionados o marginales (Openshaw, 2000). Aunque, actualmente, los agricultores no han alcanzado los beneficios totales del cultivo, sus características ambientales lo sitúan como una herramienta potencial en la restauración de suelos.

*Jatropha* es capaz de crecer, a pesar de la presencia de metales tales como Hg, Pb, Al, Cd, Cr en altas concentraciones en suelos contaminados y de acumular estos metales en sus raíces o en las partes aéreas. Esta planta resulta ser un buen candidato para la fitorremediación con metales en suelos mineros.

## Conclusiones y perspectivas

En conclusión, una serie de características del cultivo deben ser mejoradas para la obtención de rendimientos altos de semilla, contenido de aceite, disminución de la toxicidad de las semillas, control de plagas, etcétera. La biotecnología y el mejoramiento genético pueden ser de gran ayuda para la obtención de variedades mejoradas de *Jatropha* con los rasgos deseados conjuntamente y con prácticas agroecológicas conducirán a un desarrollo sustentable del cultivo.

La planta de *Jatropha* está convirtiéndose en una fuente importante para la rama de la bioenergética cuyo potencial de aprovechamiento se encuentra en desarrollo. Actualmente, los usos de algunas partes de la planta están restringidos al uso en la medicina tradicional, sin embargo, éste puede incrementarse por la obtención de fármacos de alto valor agregado.

El desarrollo de nuevas tecnologías permite un aprovechamiento optimizado de la planta, en especial por el establecimiento del principio de biorrefinería que logrará el desarrollo económico de biocombustibles competitivos y sustentables en México y el mundo.

Es evidente que en el futuro el mundo podría tener una crisis de energía, si eso pasara podríamos tener una fuente alternativa de energía por medio de biomasa proveniente de cultivos energéticos como *Jatropha*. De las semillas, cáscaras, pasta, tallos, hojas de esta planta, se pueden obtener diferentes fuentes energéticas, como la producción de biodiésel, bioalcohol, biogás y pellets para combustión, pueden ser una fuente energética sostenible para la población mundial que está en constante crecimiento.

Desde el punto de vista de corto plazo, el cultivo de *Jatropha curcas* su aplicación inmediata por su potencial es candidato para la generación de biocombustibles con huella de carbono 50% menor que el combustible fósil, ya que el cultivo presenta una serie de ventajas para la producción de energía renovable como: un rápido crecimiento, tolerancia a sequía, alto contenido de aceite en sus semillas y fácil propagación.

En el mediano plazo, una serie de características del cultivo lo posicionan como un cultivo apto para proyectos o programas de fitorremediación, ya que puede ser utilizado para remediar suelos contaminados con metales, restaurador de suelos erosionados, barreras de protección o en cultivos intercalados con otras plantas favoreciendo protección. Así como composta para la producción de biogás y bioetanol. Las cáscaras de las semillas pueden utilizarse para la obtención de fertilizantes orgánicos, producción de biogás o de pellets energéticos.

Por otro lado, a largo plazo, el cultivo presenta un enorme potencial para un aprovechamiento total de la planta. Hojas, tallos, restos de semillas pueden

ser utilizadas para la obtención de compuestos bioactivos de gran interés en la industria farmacéutica y alimentaria, así como generación de bioplásticos, carbón activado, entre otros subproductos de alto valor agregado. Por lo cual, *Jatropha curcas* presenta un enorme potencial para la generación de un negocio integral que sea creador de empleos al hacer un aprovechamiento integral del cultivo.

## Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por la Línea de Investigación AE17 ACV y Sostenibilidad del Clúster Bioturbosina a través del Consejo Mexicano de Ciencia y Tecnología (Conacyt) cofinanciado por la Secretaría de Energía (SENER) mediante el fondo sectorial Conacyt-SENER “Sostenibilidad energética”.

## Bibliografía citada

- Abhilash, P.C., Srivastava, P., Jamil, S. & Singh, N. 2011. "Revisited *Jatropha curcas* as an oil plant of multiple benefits: critical research needs and prospects for the future". *Environmental Science and Pollution Research*, 18(1), 127–131.
- Achten, W.M.J., Verchot, L., Franken, Y.J., Mathijs, E., Singh, V.P., Aerts, R., Muys, B. 2008. "*Jatropha* bio-diesel production and use". *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1063–1084. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.03.003>
- Achten, W., Maes, W., Aerts, R., Verchot, L., Trabucco, A., Mathijs, E., Muys, B. 2010. "*Jatropha*: from global hype to local opportunity". *Journal of Arid Environments*, 74(1), 164–165.
- Agamuthu, P., Abioye, O.P., Aziz, A.A. 2010. "Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas*". *Journal of Hazardous Materials*, 179(1–3), 891–894.
- Akbar, E., Yaakob, Z., Kamarudin, S.K., Ismail, M., Salimon, J. 2009. "Characteristic and Composition of *Jatropha curcas* Oil Seed from Malaysia and its Potential as Biodiesel Feedstock". *European Journal of Scientific Research*, 29(3), 396–403.
- Bevilacqua Leoneti, A., Aragao-Leoneti, V., Valle Walter Borges de Oliveira, S. 2012. "Glycerol as a by-product of biodiesel production in Brazil: Alternatives for the use of unrefined glycerol". *Renewable Energy*, 45, 138–145. <https://doi.org/doi:10.1016/j.renene.2012.02.032>.
- Bryant, S.T. & Romijn, H.A. 2014. "Not quite the end for *Jatropha*? Assessing the financial viability of biodiesel production from *Jatropha* in Tanzania". *Energy for Sustainable Development*, 23, 212–219. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.006>.
- Chang, F.-C., Ko, C.-H., Tsai, M.-J., Wang, Y.-N., Chung, C.-Y. 2014. "Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by *Jatropha curcas*". *Ecotoxicology*, 23(10), 1969–1978.
- Contran, N., Chessa, L., Lubino, M., Bellavite, D., Roggero, P.P., Enne, G. 2013. "State of the art of the *Jatropha curcas* productive chain: From sowing to biodiesel and by-products". *Industrial Crops & Products*, 42, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.05.037>.
- Edrisi, S.A., Dubey, R.K., Tripathi, V., Bakshi, M., Srivastava, P., Jamil, S., Abhilash, P.C. 2015. "*Jatropha curcas* L.: A crucified plant waiting for resurgence". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 855–862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.082>
- Elbehri, A., Segerstedt, A. & Liu, P. 2013. *Biofuels and the sustainability challenge*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Esparza-Claudio, J. de J., Aguilar Ortega, A., Chargoy Amador, J.P. 2017. *Análisis de Ciclo de Vida de la etapa de siembra y cosecha de biomasa*. León.
- Fini, A., Bellasio, C.B., Pollastri, S., Tattini, M., Ferrini, F. 2013. “Water relations, growth, and leaf gas exchange as affected by water stress in *Jatropha curcas*”. *Journal of Arid Environments*, 89, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.009>.
- Foltin, R.W. 1992. “Economic analysis of the effects of caloric alternatives and reinforcer magnitude on ‘demand’ for food in baboons”. *Appetite*, 19(3), 255–271. [https://doi.org/10.1016/0195-6663\(92\)90166-4](https://doi.org/10.1016/0195-6663(92)90166-4).
- Giadrossich, F., Cohen, D., Schwarz, M., Seddaiu, G., Contran, N., Lubino, M., Niedda, M. 2016. “Modeling bio-engineering traits of *Jatropha curcas* L.” *Ecological Engineering*, 89, 40–48.
- Hamelinck, C.N., Suurs, R.A.A. & Faaij, A.P.C. 2005. “International bioenergy transport costs and energy balance”. *Biomass and Bioenergy*, 29(2), 114–134. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2005.04.002>.
- Islam, A., Yaakob, Z. & Anuar, N. 2011. “*Jatropha*: A multipurpose plant with considerable potential for the tropics”. *Scientific Research and Essays*, 6(13), 2597–2605.
- Jones, N. & Miller, J.H. 1992. “*Jatropha curcas*: a multipurpose species for problematic sites”. *Jatropha curcas: A Multipurpose Species for Problematic Sites.*, (No. 1).
- Kagabemga, W.F., Thiombiano, A., Traoré, S., Zougmore, R., Boussim, J.I. 2011. “Survival and growth responses of *Jatropha curcas* L. to three restoration techniques on degraded soils in Burkina Faso”. *Annals of Forest Research*, 54(2), 139.
- Kamalvanshi, M., Kumar, A., Jha, A., Dhyani, S.K. 2012. “Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in rhizosphere of *Jatropha curcas* L. in arid and semi arid regions of India”. *Indian Journal of Microbiology*, 52(3), 492–494.
- Kant, P. & Wu, S. 2011. “The extraordinary collapse of *Jatropha* as a global biofuel”. *ACS Publications*.
- Karlsson, H., Börjesson, P., Hansson, P.A., Ahlgren, S. 2014. “Ethanol production in biorefineries using lignocellulosic feedstock - GHG performance, energy balance and implications of life cycle calculation methodology”. *Journal of Cleaner Production*, 83, 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.029>.
- Kratzeisen, M. & Müller, J. 2013. “Suitability of *Jatropha* seed shells as fuel for small-scale combustion units”. *Renewable Energy*, 51, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.037>.

- Krishnamurthy, L., Zaman-Allah, M., Marimuthu, S., Wani, S.P., Kesava Rao, A.V.R. 2012. "Root growth in *Jatropha* and its implications for drought adaptation". *Biomass and Bioenergy*, 39, 247–252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.015>.
- Kumar, A. & Sharma, S. 2008. "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review". *Industrial Crops and Products*, 28, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.001>.
- Kumar, A., Sharma, S. & Mishra, S. 2010. "Influence of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi and salinity on seedling growth, solute accumulation, and mycorrhizal dependency of *Jatropha curcas* L." *Journal of Plant Growth Regulation*, 29(3), 297–306.
- Kumar, A., Sharma, S., Mishra, S., Dames, J.F. 2015. "Arbuscular mycorrhizal inoculation improves growth and antioxidative response of *Jatropha curcas* (L.) under Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> salt stress". *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 149(2), 260–269.
- Kumar, G.P., Yadav, S.K., Thawale, P.R., Singh, S.K., Juwarkar, A.A. 2008. "Growth of *Jatropha curcas* on heavy metal contaminated soil amended with industrial wastes and *Azotobacter*—A greenhouse study". *Bioresource Technology*, 99(6), 2078–2082.
- Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. 1995. "Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils". *Environmental Science & Technology*, 29(5), 1232–1238.
- Liang, Y., Siddaramu, T., Yesuf, J., Sarkany, N. 2010. "Fermentable sugar release from *Jatropha* seed cakes following lime pretreatment and enzymatic hydrolysis". *Bioresource Technology*, 101(16), 6417–6424. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.03.038>.
- Lim, S. & Lee, K.T. 2011. *Effects of solid pre-treatment towards optimizing supercritical methanol extraction and transesterification of Jatropha curcas L. seeds for the production of biodiesel*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.08.003>.
- Makkar, H.P.S., Aderibigbe, A.O. & Becker, K. 1998. "Comparative evaluation of non-toxic and toxic varieties of *Jatropha curcas* for chemical composition, digestibility, protein degradability and toxic factors". *Food Chemistry*, 62(2), 207–215.
- Marrugo-Negrete, J., Durango-Hernández, J., Pinedo-Hernández, J., Olivero-Verbel, J., Díez, S. 2015. "Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*". *Chemosphere*, 127, 58–63.
- Montes, J.M. & Melchinger, A.E. 2016. "Domestication and breeding of *Jatropha curcas* L." *Trends in Plant Science*, 21(12), 1045–1057.
- Navarro-Pineda, F.S., Baz-Rodríguez, S.A., Handler, R., Sacramento-Rivero, J.C. 2016. "Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 247–269. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.10.009>.

- Navarro-Pineda, F.S., Ponce-Marbán, D.V., Sacramento-Rivero, J.C., Barahona-Pérez, L.F. 2017. "An economic model for estimating the viability of biodiesel production from *Jatropha curcas* L." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(5), 971–980. <https://doi.org/10.1002/jctb.5058>.
- Ogunwole, J.O., Chaudhary, D.R., Ghosh, A., Daudu, C.K., Chikara, J., Patolia, J.S. 2008. "Contribution of *Jatropha curcas* to soil quality improvement in a degraded Indian entisol". *Acta Agriculturae Scandinavica Section B–Soil and Plant Science*, 58(3), 245–251.
- Openshaw, K. 2000. "A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise". *Biomass and Bioenergy*, 19, 1–15.
- Pandey, V.C., Singh, K., Singh, B., Singh, R.P. 2011. "New approaches to enhance eco-restoration efficiency of degraded sodic lands: critical research needs and future prospects". *Ecological Restoration*, 29(4), 322–325.
- Pandey, V.C., Singh, K., Singh, J.S., Kumar, A., Singh, B., Singh, R.P. (2012). "*Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2870–2883. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.02.004>.
- Resurreccion, E.P., Colosi, L.M., White, M.A., Clarens, A.F. 2012. "Comparison of algae cultivation methods for bioenergy production using a combined life cycle assessment and life cycle costing approach". *Bioresource Technology*, 126, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.038>.
- Reubens, B., Achten, W.M.J., Maes, Wh., Danjon, F., Aerts, R., Poesen, J., Muys, B. 2011. "More than biofuel? *Jatropha curcas* root system symmetry and potential for soil erosion control". *Journal of Arid Environments*, 75(2), 201–205.
- Romero, C.V., Vizcarrondo, G., Martínez, M. 2017. "Plantas ornamentales tóxicas en Venezuela". *Bonplandia*, 26(1), 15–34.
- Sahoo, N.K., Kumar, A., Sharma, S., Naik, S.N. 2009. "Interaction of *Jatropha curcas* plantation with ecosystem". In: *Proceedings of international conference on energy and environment* (pp. 19–21).
- SaifulAzry, S.O.A., Chuah, T.G., Paridah, M.T., Aung, M.M., Zainudin, E.S. 2017. "Green nanocomposites from cellulose nanowhiskers and *Jatropha* oil-based polyurethane". In: *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites* (pp. 391–400). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100957-4.00017-6>.
- Secretaría de Economía. *Diario Oficial de la Federación* 84. 2015. PROY-NMX-AA-174-SCFI-2014, Pub. L. No. PROY-NMX-AA-174-SCFI-2014.

- Senger, E., Mohiley, A., Franzaring, J., Montes, J.M. 2014. "Laboratory screening of aluminum tolerance in *Jatropha curcas* L." *Industrial Crops and Products*, 59, 248–251.
- Sepúlveda-González, I. 2012. "Bioturbosina: Producción de cultivos energéticos para la aviación comercial". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(3), 579–594.
- Singh, R.N., Vyas, D.K., Srivastava, N.S.L., Narra, M. 2008. "SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy". *Renewable Energy*, 33, 1868–1873. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.10.007>.
- Soto, I., Ellison, C., Kenis, M., Diaz, B., Muys, B., Mathijs, E. 2018. "Why do farmers abandon *Jatropha* cultivation? The case of Chiapas, Mexico". *Energy for Sustainable Development*, 42, 77–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.10.004>.
- Staubmann, R., Ncube, I., Gübitz, G.M., Steiner, W., Read, J.S. 1999. "Esterase and lipase activity in *Jatropha curcas* L. seeds". *Journal of Biotechnology*, 75(2–3), 117–126.
- Thomas, R., Sah, N.K. & Sharma, P.B. 2008. "Therapeutic biology of *Jatropha curcas*: a mini review". *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 9(4), 315–324.
- van den Berg, A.J.J., Horsten, S.F.A.J., Kettenes-van den Bosch, J.J., Kroes, B.H., Beukelman, C.J., Leeftang, B.R., Labadie, R.P. 1995. "Curcacycline A — a novel cyclic octapeptide isolated from the latex of *Jatropha curcas* L." *FEBS Letters*, 358(3), 215–218. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(94\)01405-P](https://doi.org/10.1016/0014-5793(94)01405-P).
- van Eijck, J., Romijn, H., Balkema, A., Faaij, A. 2014. "Global experience with *Jatropha* cultivation for bioenergy: An assessment of socio-economic and environmental aspects". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 869–889. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.028>.
- Wang, W.-C. 2016. "Techno-economic analysis of a bio-refinery process for producing Hydro-processed Renewable Jet fuel from *Jatropha*". *Renewable Energy*, 95, 63–73. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.03.107>.
- Wani, S.P., Chander, G., Sahrawat, K.L., Rao, C.S., Raghvendra, G., Susanna, P., Pavani, M. 2012. "Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands". *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161, 112–120.
- Wendimu, M.A. 2016. "*Jatropha* potential on marginal land in Ethiopia: Reality or myth?" *Energy for Sustainable Development*, 30, 14–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.11.001>.
- Wing, R.E. 1996. *Industrial Crops* (Vol. 5). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1447-0>.

- Yadav, S.K., Juwarkar, A.A., Kumar, G.P., Thawale, P.R., Singh, S.K., Chakrabarti, T. 2009. "Bioaccumulation and phyto-translocation of arsenic, chromium and zinc by *Jatropha curcas* L.: impact of dairy sludge and biofertilizer". *Bioresource Technology*, 100(20), 4616–4622.
- Ye, M., Li, C., Francis, G., Makkar, H.P.S. 2009. "Current situation and prospects of *Jatropha curcas* as a multipurpose tree in China". *Agroforestry Systems*, 76(2), 487–497. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9226-x>.

## Documentos impresos y en línea

- Biopaliw, O.R. 2010. C 160/8, 17(443), 8–16.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Missouri Botanical Garden. 2018. Tropicos.org.
- Roundtable on Sustainable Biomaterials. 2017. RSB Principles & Criteria. Chatelaine (Geneva), Switzerland: Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB).
- Roundtable on Sustainable Biomaterials and the Change Agent Collective. 2016. Collaboration | Biofuel | Biomaterial | Global | RSB | Who We Are.
- UNAM. 2009. Biblioteca digital de la medicina tradicional mexicana.

### Toxicidad y potencial nutritivo de subproductos de *Jatropha curcas* L.

Mukthar Sandoval Peraza<sup>1</sup>, Julio Sacramento Rivero<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Morelos - Facultad de Medicina; calle Leñeros Esquina Iztaccihuatl s/n, Col. Volcanes. Cuernavaca, Morelos, CP 62350.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de Yucatán - Facultad de Ingeniería Química, Campus de Ciencias Exactas e Ingenierías, Periférico norte km 33.5, Mérida, Yucatán, México, CP 972013.

\*Autor por correspondencia: julio.sacramento@correo.uady.mx

#### Resumen

En este trabajo se analizaron las tortas desgrasadas (TDJ) de nueve accesiones de *Jatropha curcas* L. cultivadas en suelos marginales de Yucatán. El contenido de ésteres de forbol en ocho de las nueve accesiones fue comparable o menor que el presente en semillas catalogadas como comestibles o no tóxicas provenientes del estado de Morelos. La cantidad de proteína presente en las TDJ estuvo en el intervalo 52.7–69.4%. La composición de aminoácidos en esta proteína mostró que la lisina fue un aminoácido limitante en todas TDJ. El valor biológico y la relación de eficiencia proteica calculados estuvieron en un intervalo de 38.2–61.3 y 2.3–2.4, respectivamente. El fraccionamiento húmedo mostró que las TDJ pueden ser una fuente de almidones, ya que contienen una fracción entre el 16.7 y el 21.5%. Se detectó la presencia de

xilosa, galactosa, arabinosa y glucosa, siendo esta última la de mayor proporción. Los componentes presentes en la TDJ posicionan a este residuo como una posible fuente de proteínas (concentrados e hidrolizados) y de almidones, los cuales pueden ser usados en la alimentación de ganado y humana, o bien ser sustrato para la obtención de fertilizantes, biogás o sustrato para crecimiento bacteriano, entre otros usos.

## Palabras clave

*Jatropha curcas*, toxicidad, valor biológico, contenido proteico

## Introducción

*Jatropha curcas* Linnaeus es una planta perene perteneciente a la familia euforbiácea con dos subgéneros y 175 especies. Según fósiles encontrados en Belén y Perú, esta planta tiene 70 millones de años de antigüedad. La altura que puede alcanzar el arbusto de *J. curcas* es de 5 metros, aunque dependiendo de las condiciones del ambiente puede llegar hasta los 8 o 10 metros. Una de las características de esta planta es su resistencia a la sequía, siendo en estas zonas áridas en donde su cultivo es aplicado en el control de la erosión del suelo (Becker *et al.*, 2015). Aunque esta planta es nativa del sur y Centroamérica, geográficamente se ha extendido en diversas regiones tropicales de África, Sudamérica, Sudeste Asiático e India (Becker & Makkar, 2008; Insanu *et al.*, 2013).

La localización de *J. curcas* en México está ampliamente distribuida, encontrándose en los estados de Sonora, Sinaloa, San Luis Potosí, Guadalajara, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco, Yucatán, Quintana Roo, Veracruz, Tamaulipas, Puebla, Hidalgo y Morelos; en donde se le conoce

como piñón, piñoncillo, piñón mexicano, entre otros (Martínez-Herrera *et al.* 2010).

## Usos de *J. curcas*

Las semillas de *J. curcas* son conocidas por tener un alto contenido de aceite, el cual se usa tradicionalmente para la obtención de jabón, velas, lámparas de aceite y lubricantes, o bien puede modificarse químicamente para la obtención de biodiésel (Insanu *et al.*, 2013). Para dimensionar el potencial de esta especie en la producción de aceite no comestible, se puede citar la producción anual estimada en la India que asciende a 200 mil toneladas métricas (Tiwari *et al.*, 2007).

El uso de la *J. curcas* también se encuentra en la medicina tradicional. Por ejemplo, las semillas se usan para tratar la artritis, gota e ictericia; extractos de la planta son utilizados en alergias, quemaduras, inflamación y lepra, etc. (Kumar & Sharma, 2008). En Nigeria se han utilizado para el tratamiento contra la disentería, hemorroides, lengua revestida, gonorrea, infertilidad, viruela e infecciones de la piel (Akintayo, 2004). Se han reportado otros usos como la remediación del suelo o como cerca viva para otros cultivos (Insanu *et al.*, 2013). También se ha probado su potencial como insecticida y antimicrobiano, reportándose este tipo de efectos en extractos de hojas, aceite de las semillas, así como de diferentes partes de la planta (Chauhan *et al.*, 2015).

## Toxicidad

La toxicidad de la *J. curcas* se atribuye principalmente a la presencia de una familia de compuestos conocidos como ésteres de forbol (EF). Los EF son tóxicos tanto para el consumo humano como animal, con efectos variados en el organismo que van desde una simple irritación de piel hasta la producción de tumores (Srinophakun *et al.*, 2011). Se han reportado casos de toxicidad en humanos por el consumo de *J. curcas*. Por ejemplo, en la India en 2005 veinte niños fueron ingresados al hospital por el consumo de semillas. Todos los pacientes tuvieron cuadros clínicos similares, siendo el vómito el padecimiento de mayor prevalencia

(95%), seguido por la diarrea y cefalea (50 y 40% respectivamente); sólo 5% fue asintomático. El tiempo de recuperación fue aproximadamente de 6 horas y después de 24 horas los servicios médicos ya no fueron necesarios (Insanu *et al.*, 2013).

Dentro de la especie *J. curcas* existen diferentes genotipos los cuales se han catalogado como tóxicos o no tóxicos. En México se pueden localizar variedades no tóxicas y se caracterizan por tener concentraciones de EF muy bajas o no detectables. En contraparte, se encuentran las variedades tóxicas las cuales tienen una concentración de EF superior a 3,500 ppm (Insanu *et al.*, 2013; Martínez-Herrera *et al.*, 2006). Además de los EF, las semillas tienen otros factores tóxicos como los inhibidores de tripsina, actividad de lectinas y ácido fítico (Martínez-Herrera *et al.*, 2006).

### Material residual

Después de la extracción del aceite, la semilla desgrasada de *J. curcas* (entera o molida) es considerada como un subproducto debido a su toxicidad y se le denomina en este trabajo como torta desgrasada de *Jatropha* (TDJ). Se estima que por cada kilogramo de semilla se obtiene alrededor de 250 g de TDJ (Zhang *et al.*, 2014). La valoración de esta fracción es indispensable para obtener beneficios económicos de la extracción del aceite cuando éste se destina a la producción de biodiésel (Navarro-Pineda *et al.*, 2017). Existen reportes del uso de la TDJ como fertilizante, en donde se implementó como abono en plantíos de col china, tomate y papas, observándose un efecto positivo en el crecimiento y sin encontrar EF en ninguno de los productos cosechados (Srinophakun *et al.*, 2011).

Desde el punto de vista nutricional, la TDJ contiene un alto valor de proteína; sin embargo, debido a la presencia de EF, suele ser tóxica. Se ha reportado este efecto en ratones, ratas y rumiantes, siendo descartada para consumo animal (Makkar *et al.*, 1998). Sin embargo, también se ha demostrado que diferentes tratamientos, como la extracción con solventes o calentamiento seguido de tratamiento alcalino, tienen un efecto en la eliminación de los EF (Zhang *et al.*, 2014). Lo anterior supondría una potencial aplicación a la TDJ de variedades tóxicas ya que después de ser sometida

a procesos de detoxificación bien podría implementarse en la alimentación animal.

En el caso de la TDJ proveniente de las variedades no tóxicas no tendría el inconveniente de toxicidad debida a los EF; sin embargo, aún quedarían factores no nutritivos como los inhibidores de tripsina y lectinas, los cuales también pueden ser inactivados mediante los mismos tratamientos térmicos (Makkar *et al.*, 1998; Martínez-Herrera *et al.*, 2006).

En el resto de este capítulo, se describe la caracterización de nueve accesiones diferentes de semillas de *J. curcas* cultivadas en suelos marginales en el estado de Yucatán, México, codificadas como J1 a J9.

## Resultados experimentales

### Contenido de ésteres de forbol

La extracción y cuantificación de los EF se basó en el método de Makkar *et al.* (2007), sujeto a algunas modificaciones, como se describe a continuación. La TDJ se extrajo tres veces con metanol grado HPLC, agitando en vórtex por 10 min y centrifugando por 15 min a 5000 rpm y 10 °C entre extracciones. El metanol en el sobrenadante se recuperó usando un rotavapor sin sobrepasar los 40 °C. El extracto se centrifugó a 6000 rpm y a 4 °C por 30 min y se concentró hasta sequedad bajo un flujo de nitrógeno. Se utilizó una columna HPLC de fase reversa (LiChrospher RP-18, 5- $\mu$ m tamaño de partícula, 4 mm  $\times$  25 cm) y la programación reportada por Makkar *et al.* (2007) para la cuantificación de EF por gradiente de elución. Como fase móvil se utilizaron tres solventes: A) ácido fosfórico (1.75 mL en 1 litro de agua destilada), B) acetonitrilo (100%) y C) tetrahidrofurano (100%). Se modificaron los tiempos de las rampas del gradiente, adicionando el tiempo para estabilizar la columna (19 min), el cual fue determinado experimentalmente hasta obtener repetibilidad en los tiempos de retención estándar. Las muestras se eluyeron con un flujo de 1.3 mL/min a una longitud de onda de 280 nm. El volumen de inyección fue de 20 mL a temperatura del cuarto. Los resultados se expresaron como equivalentes de estándar externo de 12-miristato-13-hidroxiforbol

(Sigma-Aldrich P8139). En la Figura 1 se resumen los resultados del análisis de las nueve accesiones estudiadas.

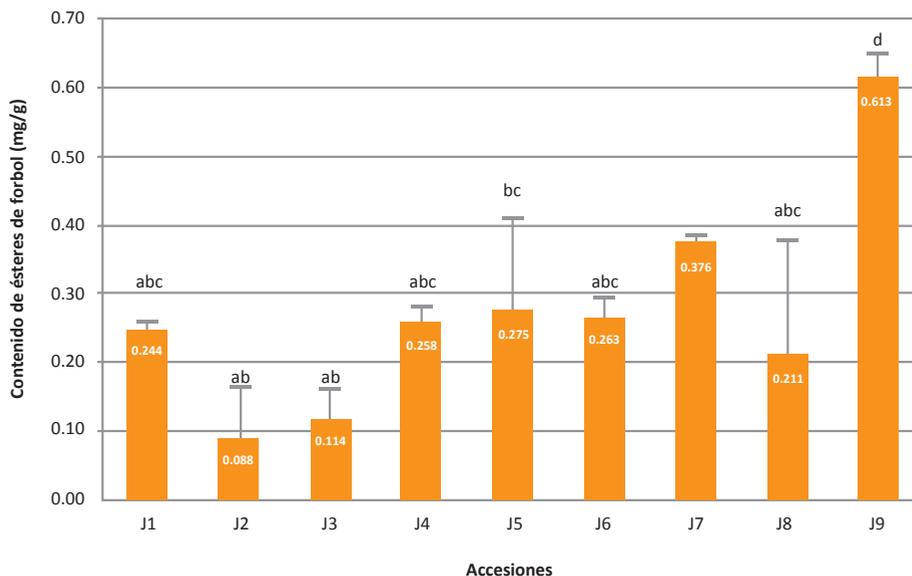


Figura 1. Resultados de la cuantificación de ésteres de forbol (mg/g), expresados como equivalentes de 12-miristato-13-hidroxi-forbol. Las barras indican desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) según prueba de Tukey.

La cantidad de EF en las muestras seleccionadas varía de 0.09 a 0.61 mg/g. De la comparación de medias (prueba de Tukey,  $p = 0.05$ ,  $n = 3$ ) se obtuvieron cuatro grupos homogéneos. Este resultado se debe a la desviación estándar de algunas muestras en el análisis. Sin embargo, se observa que algunas muestras presentan promedios muy distintos y desviaciones estándar pequeñas. De acuerdo con Makkar *et al.* (2007), *J. curcas* se considera potencialmente tóxica cuando la concentración de EF es mayor que 0.11 mg/g. Según este criterio y la consideración anteriormente hecha sobre el análisis estadístico, se observa que las accesiones J2 y J3 podrían considerarse no tóxicas al contener una concentración de EF menor o igual a 0.11 mg/g. El análisis estadístico presenta ambigüedad para las demás muestras, excepto para J9 que muestra un valor visiblemente mayor que las demás (0.61 mg/g).

Por otra parte, Chún Díaz (2013) refiere otra clasificación de toxicidad, en la cual se considera como no tóxicas a las semillas con valores menores a 0.018 mg/g de EF, mientras que para la semilla tóxica el rango es de 0.86 a 1.48 mg/g de semilla. Si se toma este parámetro, ninguna accesión de las analizadas sería determinadamente no tóxica, y todas caerían en un rango intermedio, por debajo del rango considerado como tóxico.

Finalmente, para complementar la información sobre el carácter tóxico de la concentración de EF en las semillas de la TDJ, se hizo un experimento comparativo con semilla considerada comestible o no-tóxica, proveniente del estado de Morelos. En este experimento se procesaron cuatro muestras, como se describe en el Cuadro 1.

### Cuadro 1. Descripción de las muestras incluidas en el experimento de clasificación de toxicidad

Código asignado	Descripción
NoTóx	Semilla entera de variedad comestible o no tóxica
C	Control. Semilla molida (incluyendo testa) de semilla de <i>Jatropha</i> después de la extracción de aceite por prensado. <i>Pull</i> de variedades trabajadas en este proyecto.
A	Semilla molida (incluyendo testa) de semilla de <i>Jatropha</i> después de la extracción de aceite por prensado y detoxificación con proceso térmico. <i>Pull</i> de variedades trabajadas en este proyecto.
S	Semilla molida (incluyendo testa) de semilla de <i>Jatropha</i> después de extracción de aceite por prensado y detoxificación por exposición prolongada al sol. <i>Pull</i> de variedades trabajadas en este proyecto.

A las muestras recibidas como semilla (NoTóx) se le retiró la testa con mortero, se llevó a peso constante en un horno por convección a 60 °C para determinar contenido de humedad. Posteriormente se molieron y se les hizo una extracción con hexano en dispositivo Soxhlet para determinar contenido de aceite. La pasta remanente se molió nuevamente y se tamizó. La fracción menor a malla 80 se seleccionó para la determinación de EF. Las muestras recibidas como harina de almendra combinada con testa (muestras C, A y S) se prepararon con los mismos procedimientos señalados arriba, a partir de la determinación de contenido de humedad. Los análisis de contenido de ésteres de forbol (EF) para estas muestras se reúnen en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Resultados del experimento de clasificación de toxicidad**

Código	Contenido de EF (mg/g de almendra)*
NoTóx	0.26 ± 0.03 <sup>b</sup>
C	0.34 ± 0.02 <sup>c</sup>
A	0.20 ± 0.02 <sup>a</sup>
S	0.24 ± 0.03 <sup>ab</sup>
Promedio de las muestras J1-J9	0.32 ± 0.07

\* Corrección asumiendo que la harina recibida tiene un 42% de testa. Letras distintas en la columna representan diferencias estadísticamente significativas según una prueba de Duncan

Tomando como base para la comparación el contenido de EF en la almendra, se observa que la muestra control (C) tiene un contenido muy similar al promedio de las nueve accesiones reportadas en la Figura 1, y por encima del límite de toxicidad más estricto reportado en la literatura de 0.11 mg/g. Al aplicar ambos métodos de detoxificación (A y S) se observa una disminución estadísticamente significativa en el contenido de EF, quedando a niveles similares a la NoTóx en el caso del tratamiento (S), y un poco inferior a la NoTóx en el caso del tratamiento A. Cabe señalar que la semilla NoTóx también está por encima del umbral de toxicidad de 0.11 mg/g.

Estos datos muestran evidencia de que los valores de toxicidad de las muestras analizadas están en el mismo nivel o incluso más bajos que la denominada NoTóx, y que los tratamientos de detoxificación evaluados disminuyen entre un 29% (tratamiento S) y un 41% (tratamiento A) del contenido de EF inicial en la harina.

### Composición proximal

El análisis proximal de las accesiones de este estudio se llevó a cabo de acuerdo con los procedimientos oficiales de la AOAC. El cual consistió en la determinación por triplicado de:

- › Humedad (Método 925.09) por secado en estufa a 105 °C por 4 h.
- › Cenizas (Método 923.03), residuo inorgánico resultante de la incineración a 550 °C durante 4 h hasta la pérdida total de la materia orgánica.
- › Grasa cruda o extracto etéreo (Método 920.39), extracción con hexano por 4 h en un sistema Soxhlet.
- › Proteína cruda (Método 954.01), por el método Kjeldahl, por una digestión con ácido sulfúrico y posteriormente una destilación alcalina (hidróxido de sodio), usando 6.25 como factor de conversión de nitrógeno a proteína.
- › Fibra cruda (Método 962.09), residuo orgánico combustible e insoluble que se obtiene después de que la muestra fue sometida a digestiones ácida y alcalina.
- › Carbohidratos totales. Se estimaron por diferencia al 100%, reportado como el extracto libre de nitrógeno (ELN).

Las semillas se recibieron después de haber sido secadas al sol en campo. Se procedió a remover la cascarilla para trabajar con el endospermo (o almendra). Después de la determinación de humedad, se molieron para obtener una harina fina que permitiera una mejor determinación de compuestos. Los resultados de la composición proximal de estas harinas se muestran en el Cuadro 3, observándose que los compuestos mayoritarios estuvieron representados por la grasa y proteína.

**Cuadro 3. Resultados de los análisis proximales de la almendra (porcentajes referidos al peso seco)**

Contenido en la almendra			Composición de la TDJ			
ID	Humedad <sup>1</sup>	Grasa	Proteína	Fibra Cruda	Cenizas	Carbohidratos totales
J1	5.5 <sup>b</sup>	64.9 <sup>d</sup>	54.3 <sup>a</sup>	6.4 <sup>c</sup>	8.7 <sup>d</sup>	30.5 <sup>c</sup>
J2	7.4 <sup>bc</sup>	58.6 <sup>b</sup>	52.7 <sup>a</sup>	6.4 <sup>c</sup>	9.2 <sup>de</sup>	31.7 <sup>c</sup>
J3	3.7 <sup>a</sup>	57.5 <sup>b</sup>	55.8 <sup>ab</sup>	4.5 <sup>a</sup>	10.3 <sup>f</sup>	29.4 <sup>c</sup>
J4	8.1 <sup>cd</sup>	52.9 <sup>a</sup>	63.4 <sup>d</sup>	4.5 <sup>a</sup>	9.7 <sup>e</sup>	22.4 <sup>b</sup>
J5	9.6 <sup>d</sup>	63.4 <sup>cd</sup>	59.4 <sup>c</sup>	4.4 <sup>a</sup>	8.9	27.2 <sup>bc</sup>
J6	3.4 <sup>a</sup>	59.1 <sup>b</sup>	63.2 <sup>d</sup>	5.2 <sup>b</sup>	7.9 <sup>ab</sup>	23.7 <sup>b</sup>
J7	2.8 <sup>a</sup>	62.4 <sup>cd</sup>	68.1 <sup>e</sup>	7.4 <sup>d</sup>	8.4 <sup>cd</sup>	16.1 <sup>a</sup>
J8	3.4 <sup>a</sup>	59.0 <sup>b</sup>	58.2 <sup>bc</sup>	5.1 <sup>ab</sup>	8.2 <sup>bc</sup>	28.5 <sup>c</sup>
J9	3.2 <sup>a</sup>	60.6 <sup>bc</sup>	70.2 <sup>e</sup>	7.1 <sup>cd</sup>	7.7 <sup>a</sup>	15.0 <sup>a</sup>

<sup>1</sup>Humedad (base húmeda) de la almendra como se recibe la semilla. En campo la semilla se seca al sol antes de ser entregada para el análisis. Las desviaciones estándar se omiten por ser todas menores a 0.01. Letras diferentes en la misma columna indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) según prueba de Tukey.

Las variedades analizadas presentaron un contenido de grasa total en el rango de 52.9 a 64.9% con respecto de la almendra seca, encontrándose diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ). Estos valores son similares a los reportados por Makkar *et al.* (1998) para semillas de *J. curcas* cruda y tostada (55.3 – 62.2%) provenientes de Quintana Roo, México. El contenido de grasa reportado para semillas cultivadas en Nigeria fue de 47.2% (Akintayo, 2004),

menor a los encontrados en este estudio. Es de esperarse que el contenido de grasa total varíe según muchos factores, entre ellos: variedad de la semilla, ubicación geográfica, humedad, altitud, temperatura, etcétera (Insanu *et al.*, 2013; Kumar & Sharma, 2008).

El contenido de proteína presente en la TDJ estuvo en un intervalo de 52.7–69.4%, encontrándose diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ), siendo J9 y J7 las de mayor contenido proteico. Xiao & Zhang (2014) reportan el valor de proteína (58.6%) presente en semillas desgrasadas de *J. curcas* por el método Soxhlet, el cual está dentro del intervalo de valores cuantificados en este estudio. Barbana & Boye (2010) reportan el contenido de proteína obtenido en aislados proteicos extraídos de garbanzo kabuli y desi (76.1 y 78.1% respectivamente) y afaca (74.5%). Puede observarse que sólo existe una diferencia de 15%, aproximadamente, en el contenido de proteína en comparación con el cuantificado en la TDJ de las accesiones J4 (63.4%), J6 (60.6%), J7 (66.0%) y J9 (69.4%). Otros autores reportan la utilización de frijol (*Phaseolus lunatus*) germinado y sin germinar para la obtención de concentrados proteicos, obteniendo valores de proteína de 69.2 y 56.4%, respectivamente (Chel-Guerrero *et al.*, 2012). Por lo anterior se puede considerar que la TDJ de las accesiones que tienen un contenido proteico alrededor del 60% puede considerarse como un aislado proteico, sin necesidad de algún proceso de extracción de proteína, como en el caso del frijol.

Otra alternativa que se puede implementar en las TDJ es la obtención de concentrados proteicos. Vioque *et al.* (2006) reportan la extracción alcalina y purificación al punto isoeléctrico de proteínas provenientes de residuos agroindustriales como el girasol, colza, orujo y harinas de garbanzo obteniendo concentrados con 90% de proteína. En el caso de *J. curcas*, se ha reportado la obtención de hasta un 90.5% de proteína (Marrufo-Estrada *et al.*, 2013), demostrando así su capacidad para la obtención de concentrados proteicos. La obtención de concentrados proteicos tiene importancia no sólo desde el punto de vista nutricional, sino que también tiene un amplio campo de aplicación tecno-funcional. Lestari *et al.* (2011) encontraron que en medio alcalino las proteínas extraídas de *J. curcas* tienen un alto poder emulsificante, espumante y solubilidad en medio alcalino. Estos mismos autores proponen la aplicación de estas propiedades en la formación de espumas antincendios,

bolsas de basura biodegradables, bolsas solubles en agua o microcápsulas para fertilizantes o pesticidas, adhesivos, entre otras.

Es en este punto donde los EF toman elevada importancia en cuanto a la utilización de la TDJ, ya sea que esta última se utilice directamente o se le haga alguna extracción de sus componentes principales; debe elegirse el proceso y momento adecuado para la detoxificación de la TDJ; en el caso de usos no alimentarios, no será necesario realizarla. En la Figura 2 se presenta un esquema de las posibles alternativas en el momento de elegir la aplicación de la detoxificación.

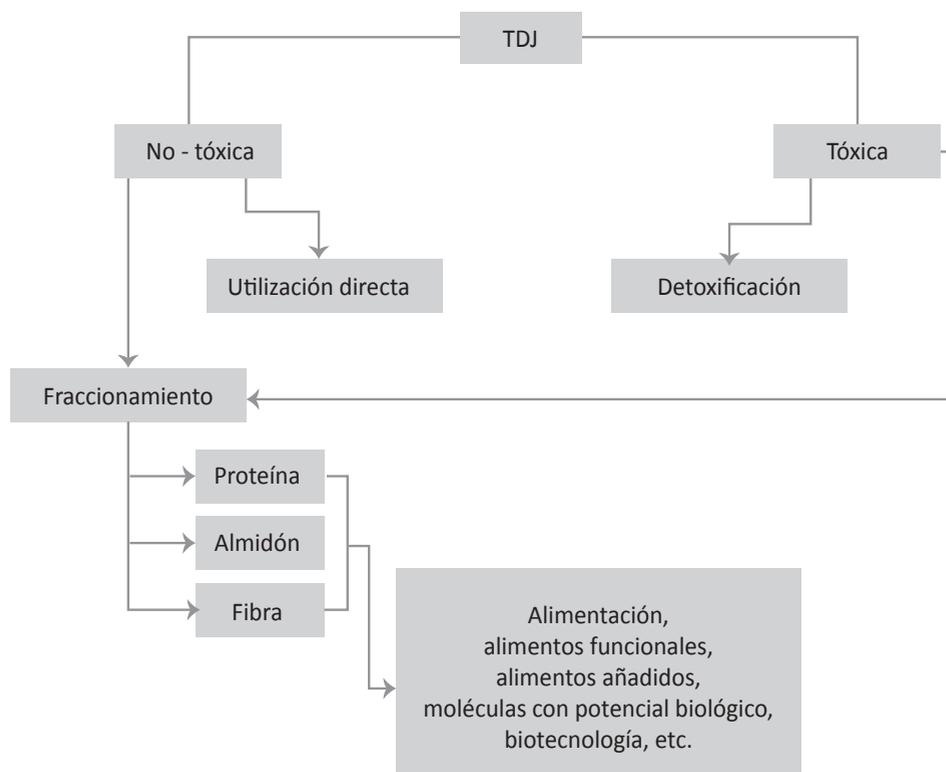


Figura 2. Estrategias de utilización de la TDJ

Después de la elección del momento de la detoxificación debe tomarse en cuenta el tipo de proceso, ya que si éste conlleva la utilización de altas temperaturas podría dañarse la proteína disminuyendo su digestibilidad (Badui-Dergal, 2006). Lo anterior resultaría en un problema si el propósito principal de la TDJ es la alimentación ya que la proteína no sería aprovechada por el organismo consumidor.

Se han reportado estudios en ratas en donde se elaboraron dietas añadidas con TDJ las cuales fueron tratadas con y sin tratamiento térmico (121 °C, 66% de humedad, 30 minutos), encontrando que el tratamiento térmico mejoró el aprovechamiento de la proteína, traduciéndose en un aumento de peso en las ratas. En el mismo estudio se analizó la ganancia de peso en peces cuando se les alimenta con dietas añadidas de TDJ, con y sin tratamiento térmico, observando que para este tipo de animales la dieta con TDJ y sin tratamiento térmico fue la de mejor resultado (Makkar & Becker, 1999). Estos resultados muestran que el calor puede ayudar o ser una limitante en la disponibilidad de las proteínas presentes en la TDJ al momento de su aprovechamiento biológico por parte del animal que las consuma.

Por otro lado, si el proceso de detoxificación conlleva altas temperaturas pero el propósito de utilización de la TDJ no es el del aprovechamiento nutricional, se puede hacer uso de la hidrólisis enzimática para la obtención de fracciones proteicas de diferente peso molecular. Los hidrolizados proteicos se pueden dividir en dos grupos con base en su grado de hidrólisis (GH), éstos pueden clasificarse en: limitados (GH menor al 10%) y extensivos (GH mayor al 10%). En este último se pueden obtener péptidos con actividad biológica, lo cual tendría un efecto beneficioso en el organismo consumidor (Vioque *et al.*, 2006).

Para el caso de *J. curcas* ya se ha reportado la obtención de hidrolizados con actividad biológica, entre las cuales destacan la actividad antioxidante, antihipertensiva y quelante (Gallegos-Tintoré *et al.*, 2015; Marrufo-Estrada *et al.*, 2013). Observándose que todas las accesiones de este estudio tienen un alto potencial como fuente de concentrados proteicos o bien, como fuente de hidrolizados con actividad biológica.

## Composición de aminoácidos

AJINOMOTO (2018) es una empresa que comercializa productos alimenticios para aves y cerdos, con alto contenido en aminoácidos. Dentro de sus productos se encuentra la venta de aminoácidos individuales y alimentos enriquecidos con aminoácidos. Desde este punto de vista, las harinas desgrasadas de *J. curcas* bien pueden ser utilizadas como fuente de aminoácidos, así como su utilización en la producción de alimentos balanceados o ricos en aminoácidos.

Para la determinación del perfil de aminoácidos se utilizó un cromatógrafo de líquidos de alta eficiencia (HPLC) marca AGILENT modelo 1100 series, el cual consta con inyector automático, bomba binaria, termostato, degasificador (G1379A) y detector de longitud de onda variable (VWD – G1315B). Se utilizó una columna C18 de fase reversa a través de la cual se pasó un gradiente binario de acetonitrilo grado HPLC (A) y acetato de sodio 25 mM (pH 6) con 0.02% de azida de sodio (B) (Alaiz *et al.*, 1992). El triptófano se determinó por separado utilizando el mismo equipo analítico, columna y soluciones A y B anteriormente descritas. Se utilizó una elución socrática en relación 91B:9A (Yust *et al.*, 2004).

Los perfiles de aminoácidos de las diferentes accesiones se presentan en el Cuadro 4. Puede observarse que los aminoácidos de mayor proporción en las TDJ fueron el ácido aspártico (ácido aspártico + asparagina), ácido glutámico (ácido glutámico + glutamina), arginina, prolina y leucina. El mismo patrón fue reportado por Xiao & Zhang (2014) para *J. curcas* desgrasada y son estos mismos autores quienes mencionan que la abundancia de estos aminoácidos es característica de las proteínas presentes en semillas oleaginosas convencionales

**Cuadro 4. Perfil de aminoácidos (g/100 g de proteína) presentes en la TDJ**

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	FAO*
<b>Esenciales</b>										
Histidina	2.59	2.22	2.52	2.54	2.6	2.62	2.23	2.25	2.52	1.9

	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	FAO*
<b>Esenciales</b>										
Treonina	3.32	3.1	3.15	3.21	3.41	3.64	3.72	3.41	3.46	3.4
Tirosina	2.85	2.16	2.71	2.81	2.93	2.66	2.68	2.47	2.63	6.3 †
Valina	4.43	5.4	5.01	4.59	4.74	4.96	4.49	4.68	4.69	3.5
Metionina	1.52	1.44	1.45	1.54	1.34	0.44	0.34	0.46	0.49	2.5 ¥
Cisteína	1.64	1.54	1.71	1.55	1.48	1.82	1.77	1.63	1.96	¥
Isoleucina	3.65	3.79	4.01	3.47	3.68	3.96	4.2	3.73	3.78	2.8
Leucina	6.69	6.89	6.7	6.73	7.08	6.95	7.39	6.57	6.69	6.6
Fenilalanina	4.3	4.34	4.36	4.41	4.63	4.58	4.74	4.35	4.4	†
Lisina	3.56	3.57	3.59	3.4	3.6 <sup>c</sup>	3.58	3.95	3.58	3.6	5.8
Triptófano	1.71	2.32	1.51	1.21	1.98	0.7	0.89	0.25	0.73	1.1
<b>No esenciales</b>										
A. Aspártico <sup>a</sup>	9.37	9.29	9.36	9.8	10.33	9.81	10.38	8.26	7.42	
A. Glutámico <sup>b</sup>	14.86	14.38	14.67	15.11	15.45	16.26	17.66	16.3	16.7	
Serina	4.26	3.9	3.59	3.96	4.16	4.55	5.03	4.53	4.64	
Glicina	4.32	4.12	4.17	4.37	4.66	4.47	4.6	4.02	4.35	
Arginina	8.98	8.91	8.86	9.35	9.76	9.08	9.88	8.76	8.89	
Alanina	5.9	6.07	5.96	6.28	6.21	6.25	6.56	5.81	5.84	
Prolina	16.08	16.58	16.69	15.68	11.96	13.68	9.48	18.94	17.18	

<sup>a</sup> ácido aspártico+asparagina, <sup>b</sup> ácido glutámico+glutamina / † tirosina+fenilalanina / ¥ metionina+cisteína / \*(FAO/WHO, 1991). Todos los análisis se realizaron por duplicado y se presentan en base seca.

Con respecto de los aminoácidos esenciales y los requerimientos diarios sugeridos por la FAO/WHO, (1991) se observó que en algunos de los casos las muestras analizadas suplieron los requerimientos diarios (g/100 g de proteína), mientras que en otros fueron deficientes. A continuación se enlistan los resultados de los aminoácidos en relación con el requerimiento diario (RD):

1. Histidina (1.9): En este caso todas las muestras cubrieron el RD.
2. Treonina (3.4): Sólo J5, J6, J7, J8 y J9 cubren el RD.
3. Tirosina + Fenilalanina (6.3): Todas las muestras cubren el RD.
4. Valina (3.5): Todas las muestras cubren el RD.
5. Metionina + Cisteína (2.5): Sólo J1, J2, J3, J4 y J5 cubren el RD.
6. Isoleucina (2.8): Todas las muestras cubren el RD.
7. Leucina (6.6): Sólo J8 no cubre el RD, sin embargo, es sólo por 0.03%.
8. Lisina (5.8): Ninguna de las muestras cubre el RD.
9. Triptófano (1.1): En este caso las muestras J1, J2, J3, J4 y J5 cubren el RD.

En este punto cabe señalar que las muestras que no cubrieron los RD de treonina, metionina + cisteína, leucina y triptófano fue por una cantidad mínima (menor al 0.5%). Esta pequeña deficiencia se podría solventar realizando la extracción de la proteína de la TDJ, ya que se ha reportado que al momento de la obtención del concentrado proteico los aminoácidos en general tienen un aumento de concentración y sólo en algunos aminoácidos se observa una ligera disminución (Betancur-Ancona *et al.*, 2004). Sin embargo, posiblemente la lisina sea un aminoácido limitante, ya que en la TDJ está por debajo del RD en un 2%. Martínez-Herrera *et al.* (2006) reportan este comportamiento en harinas desgrasadas de *J. curcas*, en donde sólo la lisina fue el único aminoácido que no cubrió el RD.

## Valor biológico y la relación de eficiencia proteica

El valor biológico (VB) es un indicativo de la proporción de la proteína absorbida que es retenida y utilizada por el organismo; mientras que en el caso de la relación de eficiencia proteica (PER), es un indicativo de la ganancia de peso logrado con respecto de la cantidad de proteína ingerida. Para la

predicción del VB se utilizó el perfil de aminoácidos cuantificado para las TDJ de este estudio (Cuadro 4) en conjunto con la siguiente ecuación (Chavan *et al.*, 2001):

$$VB = 10^{2.15} \times q_{Lys}^{0.41} \times q_{Phe+Tyr}^{0.60} \times q_{Met+Cys}^{0.77} \times q_{Thr}^{2.4} \times q_{Trp}^{0.21}$$

En donde  $q$  es la razón de concentración de las fracciones de aminoácidos. Si la cantidad del aminoácido presente en la muestra es menor al de referencia (FAO / WHO, 1973) se usa la siguiente relación:

$$q = ai \text{ muestra} / ai \text{ referencia}$$

Si la cantidad del aminoácido presente en la muestra es mayor al de referencia (FAO / WHO, 1973) se usó la siguiente relación:

$$q = ai \text{ referencia} / ai \text{ muestra}$$

donde  $ai$  corresponde a los mg de aminoácido por g de aminoácidos esenciales totales. Como referencia se utilizaron los patrones de aminoácidos esenciales reportados por la FAO / WHO (1973) y utilizados por Chavan *et al.* (2001) para proteína estándar.

La predicción del PER se realizó mediante la siguiente ecuación (Chavan *et al.*, 2001):

$$PER = -0.468 + 0.454 (Leu) - 0.105 (Tyr)$$

donde la concentración de leucina y tirosina se expresa en g/100 g de proteína.

Los resultados calculados para las muestras de este estudio se muestran en el Cuadro 5. Puede observarse que el VB de las muestras estuvo en un intervalo de 38.2–61.3, siendo J7 la del mayor valor.

**Cuadro 5. Valor biológico y PER de las TDJ**

	VB	PER
J1	56.1	2.27
J2	45.3	2.43
J3	51.3	2.29
J4	53.4	2.29
J5	51.7	2.44
J6	56.8	2.41
J7	61.3	2.60
J8	38.2	2.25
J9	55.1	2.29

La calidad de una proteína está dada por su capacidad de cubrir los requerimientos diarios del individuo. Esto depende en gran parte de la composición de aminoácidos de la proteína y su disponibilidad. Para determinar la calidad de una proteína presente en un alimento se puede usar el método biológico por medio del cálculo del VB y el PER (Meneses *et al.*, 2008). Los valores de VB encontrados en las TDJ de este estudio son menores a las reportadas por Xiao & Zhang (2014) para *J. curcas* desgrasada por método Soxhlet y por prensado (*screw-pressed*) reportando valores de 67.2 y 62.4, respectivamente. Los autores antes mencionados sugieren que las diferencias en el VB se pueden deber al método de desgrasado de las semillas. Otro factor que se relaciona con el VB es el contenido de ciertos aminoácidos. En el caso de la muestra J8, su bajo contenido de triptófano causó que tenga el menor valor de VB entre las muestras analizadas.

Los valores de PER estuvieron en un intervalo de 2.25–2.60, siendo J7 la del mayor valor. Todos los valores de este estudio fueron superiores a los reportados para dietas dosificadas en ratas con la adición de *J. curcas* desgrasada (1.29) y sin ningún tratamiento térmico (Makkar & Becker, 1999). La

muestra J7 es la que mostró tener la mejor calidad proteica, ya que fue la que obtuvo los valores más altos de VB y PER; debido a esto, esta última podría ser utilizada en la alimentación animal o bien utilizarse como complemento en la elaboración de alimentos ricos en proteína.

## Contenido de almidón

Para determinar si las TDJ de este estudio son fuentes potenciales de almidón, se llevó a cabo un fraccionamiento húmedo de la TDJ, según lo reportado por Betancur-Ancona *et al.*, (2004). Esta metodología consistió en hacer una suspensión de agua destilada y harina desgrasada de *J. curcas* en relación 1:6 (p/v), pH 11 (NaOH 1 M) y 1 h en agitación para lograr la extracción. Posteriormente, la suspensión se pasó a través de mallas del número 80 (173  $\mu\text{m}$ ) y 100 (147  $\mu\text{m}$ ) y el resto de la suspensión se dejó en reposo durante 30 min; el residuo que no pasó a través de las mallas se consideró como el residuo fibroso. Pasado el tiempo de reposo en la suspensión se observó una separación de fases, la parte superior corresponde a la proteína y la inferior al almidón. El residuo considerado como almidón se secó a 60 °C durante 48 h. Después del secado se obtuvo un almidón de color blanco y un material fibroso de coloración ligeramente café. Los valores obtenidos para las diferentes accesiones de este estudio se muestran en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Almidón extraíble (g/100 g) de la TDJ**

	J1	J2	J3	J4	J5
Almidón	18.0 <sup>ab</sup> ± 0.5	20.9 <sup>bc</sup> ± 1.0	21.5 <sup>c</sup> ± 0.7	16.7 <sup>a</sup> ± 0.8	21.0 <sup>bc</sup> ± 0.9
Fibra	8.1 <sup>c</sup> ± 0.2	7.3 <sup>bc</sup> ± 0.2	11.1 <sup>d</sup> ± 0.2	6.0 <sup>a</sup> ± 0.4	6.9 <sup>ab</sup> ± 0.4

Todos los análisis se realizaron por duplicado y se presentan en base seca. Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) según prueba de Tukey.

Los valores de almidón estuvieron en un intervalo de 16.7 – 21.5% siendo J3 la de mayor contenido de almidón ( $p < 0.05$ ). Martínez-Herrera *et al.* (2006)

reportan valores de almidón obtenidos de harinas desgrasada de *J. curcas* de otras variedades, los cuales estuvieron en un intervalo de 9.4 – 11.2%, siendo menores a los de este estudio.

La TDJ podría considerarse como una fuente no convencional de almidón ya que el valor de contenido presente en ésta es similar al reportado para frijol (*Phaseolus lunatus*) a diferentes condiciones de extracción, el cual tuvo un intervalo de rendimiento de 19.8 – 28.8% (Betancur-Ancona *et al.*, 2004), aunque menor a la cantidad de almidón reportada para cáscara de banano (39.89%) (Monsalve G., Medina de Perez & Ruiz Colorado, 2006).

La obtención de almidones puede ser potenciada, ya que a partir de este polisacárido se pueden obtener distintos derivados, como azúcar, dextrinas y almidones modificados, los cuales tienen un campo de aplicación tanto en la producción de alimentos como en la de productos no comestibles (Badui-Dergal, 2006).

## Perfil de monosacáridos

Al cuantificar la presencia de almidón y fibra en la TDJ se procedió a analizar la composición de monosacáridos que conforman estas fracciones. Los monosacáridos presentes se cuantificaron acordes con la metodología propuesta por Rostro *et al.* (2014), la cual consistió en una hidrólisis secuencial con ácido sulfúrico (72 y 4%, en ese orden). Posterior a la hidrólisis la muestra fue filtrada por medio de un filtro Gooch (poro #3) y el filtrado fue llevado a pH neutro con carbonato de bario; por último, la muestra se centrifuga a 10,000 rpm durante 15 min a 4 °C, se recupera el sobrenadante y éste se consideró como la muestra final.

Para la cuantificación de los monosacáridos se utilizó un HPLC marca Agilent 1260 Infinity equipado con bomba cuaternaria (G1311C / DEAB 818649), cámara de calentamiento para columnas (G1316C / DEBAL 12110), detector de arreglo de diodos VL (G1315D / DEAAX 07969) y detector RID (G1362A / DEAA 606907). Se utilizó una columna Phenomenex RPM-Monosaccharide (00H-0135-K0). Las condiciones de corrida fueron: flujo

0.6 mL/min y temperatura de columna a 80 °C. Se utilizó una elución isocrática de agua HPLC añadida con 0.02% de azida de sodio (100%).

El perfil de monosacáridos en las TDJ de este estudio se muestra en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Perfil de monosacáridos (g/100 g) presentes en las TDJ**

ID	Glucosa	Xilosa	Galactosa	Arabinosa
J1	66.4 ± 0.4	4.3 ± 0.7	10.6 ± 0.1	18.7 ± 0.2
J2	66.6 ± 1.0	3.4 ± 0.5	8.3 ± 0.3	21.6 ± 1.2
J3	73.5 ± 0.5	2.8 ± 0.1	5.0 ± 0.1	18.7 ± 0.3
J4	65.8 ± 1.4	3.1 ± 0.3	10.1 ± 0.9	20.9 ± 0.7
J5	68.1 ± 3.3	4.1 ± 0.6	8.6 ± 0.4	19.2 ± 2.3
J6	64.9 ± 2.4	3.1 ± 0.4	14.9 ± 1.6	17.1 ± 0.3
J7	63.6 ± 1.0	4.4 ± 0.5	17.6 ± 0.6	14.4 ± 0.8
J8	70.3 ± 0.5	3.2 ± 0.3	8.2 ± 0.3	18.2 ± 0.5
J9	72.4 ± 0.6	3.7 ± 0.3	3.8 ± 0.3	20.1 ± 0.0

Todos los análisis se realizaron por duplicado y se presentan en base seca. Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística ( $p < 0.05$ ) según prueba de tukey.

Puede observarse que el monosacárido de mayor proporción en la TDJ fue la glucosa, entre 63.6 y 73.5%. El monosacárido de menor contenido fue la xilosa, el cual estuvo en un intervalo de 2.8–4.4%. Estas diferencias en la composición de monosacáridos se pueden deber al estadio de maduración de las semillas en el momento del análisis.

Una posible aplicación de los monosacáridos presentes en la TDJ podría ser la producción de alcohol. Por ejemplo, para almidones de yuca y cáscara de banano se ha logrado obtener hasta un 7.9% de etanol (Monsalve *et al.*, 2006). También se ha reportado que la TDJ puede ser un buen sustrato para la obtención de biogás con un contenido de 70% de metano (Staubmann *et al.*, 1997)

Otra aplicación de la fracción de almidón de la TDJ puede ser en la producción de proteasas y lipasas por medio de microorganismos. Mahanta *et al.* (2008) reportan la producción de las enzimas antes mencionadas por medio de la fermentación de la TDJ con *Pseudomonas auruginosa* PseA, encontrando que la TDJ provee de los nutrientes necesarios para que la bacteria pueda crecer y producir dichas enzimas.

## Conclusiones y perspectivas

Se estudiaron nueve accesiones de *J. curcas* cultivadas en el noreste de la península de Yucatán, en suelos marginales. Ocho de las nueve accesiones presentaron valores de toxicidad (como contenido de ésteres de forbol), similar o menor a la evaluada para semillas catalogadas como comestibles o no tóxicas provenientes del estado de Morelos. Esto presenta buenas perspectivas para el uso sin tratamiento de la torta desgrasada que resulte de una extracción de aceite. Se observó que la proteína presente en la TDJ puede ser la fracción con mayor potencial, ya que representa el compuesto mayoritario (alrededor del 60%). Dentro de esta proteína sólo se encontró que el aminoácido lisina es deficiente del requerimiento diario recomendado por la FAO, en todos los casos analizados. El VB de las accesiones así como el PER muestran que la TDJ bien puede ser usada en la alimentación o como suplemento, aunque requeriría ser de una variedad no tóxica. Dentro de los carbohidratos se observó que el monosacárido de mayor proporción fue la glucosa (66% aproximadamente), seguida de la galactosa, arabinosa y xilosa. Estos macronutrientes pueden ser utilizados no sólo para alimentación sino también para remediación de suelos, fertilizantes, producción de biogás, enzimas de origen bacteriano, etanol, entre otros.

## Bibliografía citada

- Akintayo, E.T. 2004. "Characteristics and composition of *Parkia biglobbosa* and *Jatropha curcas* oils and cakes". *Bioresource Technology*, 92(3), 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00197-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00197-4)
- Alaiz, M., Navarro, J.L., Girn, J., Vioque, E. 1992. "Amino acid analysis by high-performance liquid chromatography after derivatization with diethyl ethoxymethylenemalonate". *Journal of Chromatography*, 591, 181–186.
- Badui-Dergal, S. 2006. *Química de los alimentos*. (E. Quintanar Duarte, Ed.), Ed. Pearson educación (cuarta). Ciudad de México: Pearson Education. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Barbana, C. & Boye, J.I. 2010. "Angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity of chickpea and pea protein hydrolysates". *Food Research International*, 43(6), 1642–1649. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.05.003>.
- Becker, K. & Makkar, H.P.S. 2008. "*Jatropha curcas*: A potential source for tomorrow's oil and biodiesel". *Lipid Technology*, 20(5), 104–107. <https://doi.org/10.1002/lite.200800023>.
- Betancur-Ancona, D., Gallegos-Tintoré, S. & Chel-Guerrero, L. 2004. "Wet-fractionation of *Phaseolus lunatus* seeds: Partial characterization of starch and protein". *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(10), 1193–1201. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1804>.
- Chauhan, N., Kumar, P., Mishra, S., Verma, S., Malik, A., Sharma, S. 2015. "Insecticidal activity of *Jatropha curcas* extracts against housefly, *Musca domestica*". *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 14793–14800. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4686-1>.
- Chavan, U.D., McKenzie, D.B. & Shahidi, F. 2001. "Functional properties of protein isolates from beach pea (*Lathyrus maritimus* L.)". *Food Chemistry*, 74(2), 177–187. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00123-6](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00123-6).
- Chel-Guerrero, L., Domínguez-Magaña, M., Martínez-Ayala, A., Dávila-Ortiz, G., Betancur-Ancona, D. 2012. *Lima Bean (Phaseolus lunatus) Protein Hydrolysates with ACE-I Inhibitory Activity*, 3(April), 511–521. <https://doi.org/10.4236/fns.2012.34072>.
- Chún Díaz, R.D. 2013. *Cuantificación de ésteres de forbol en partes estructurales de semilla descascarada en ocho accesiones de Jatropha curcas*.
- Gallegos-Tintoré, S., Torres-Fuentes, C., Solorza-Feria, J., Alaiz, M., Girón-Calle, J., Martínez-Ayala, L., Vioque, J. 2015. "Antioxidant and Chelating Activity of Nontoxic *Jatropha curcas* L. Protein Hydrolysates Produced by *In Vitro* Digestion Using Pepsin and Pancreatin". *Hindawi*, 2015, 9.

- Horwitz, W., Latimer, G. 2005. *Official methods of analysis of AOAC* (18th ed.). Gaithersburg: AOAC International.
- Insanu, M., Dimaki, C., Wilkins, R., Brooker, J., Van Der Linde, P., Kayser, O. 2013. "Rational use of *Jatropha curcas* L. in food and medicine: From toxicity problems to safe applications". *Phytochemistry Reviews*, 12(1), 107–119. <https://doi.org/10.1007/s11101-012-9258-0>.
- Kumar, A. & Sharma, S. 2008. "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review". *Industrial Crops and Products*, 28(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.001>.
- Lestari, D., Mulder, W.J. & Sanders, J.P.M. 2011. "*Jatropha* seed protein functional properties for technical applications". *Biochemical Engineering Journal*, 53(3), 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.12.003>.
- Mahanta, N., Gupta, A. & Khare, S.K. 2008. "Production of protease and lipase by solvent tolerant *Pseudomonas aeruginosa* PseA in solid-state fermentation using *Jatropha curcas* seed cake as substrate". *Bioresource Technology*, 99(6), 1729–1735. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.046>.
- Makkar, H.P. & Becker, K. 1999. "Nutritional studies on rats and fish fed diets containing unheated and heated *Jatropha curcas*". *Plant Foods for Human Nutrition*, 53(230004), 183–192.
- Makkar, H.P.S., Becker, K. & Schmook, B. 1998. "Edible provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo state of Mexico and effect of roasting on antinutrient and toxic factors in seeds". *Plant Foods for Human Nutrition*, 52(1), 31–36. <https://doi.org/10.1023/A:1008054010079>.
- Marrufo-Estrada, D.M., Segura-Campos, M.R., Chel-Guerrero, L.A., Betancur-Ancona, D.A. 2013. "Defatted *Jatropha curcas* flour and protein isolate as materials for protein hydrolysates with biological activity". *Food Chemistry*, 138(1), 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.033>.
- Martínez-Herrera, J., Siddhuraju, P., Francis, G., Dávila-Ortiz, G., Becker, K. 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(1), 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.059>.
- Meneses, J.O., Foulquie, J.P., Valero, G.U., Victoria, E.M., De & Gil, A. 2008. "Evaluación biológica de la calidad de una mezcla de proteínas para uso en nutrición enteral". *Nutrición Hospitalaria*, 23(3), 206–211.
- Monsalve G., J.F., Medina de Perez, V.I., Ruiz Colorado, A.A. 2006. "Ethanol production of banana shell and cassava starch". *Dyna*, 150, 21–27.

- Navarro-Pineda, F.S., Ponce-Marbán, D.V., Sacramento-Rivero, J.C., Barahona-Pérez, L.F. 2017. "An economic model for estimating the viability of biodiesel production from *Jatropha curcas* L." *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(5), 971–980. <https://doi.org/10.1002/jctb.5058>.
- Rostro, M., Sánchez-González, M., Rivas, S., Moure, A., Domínguez, H., Parajó, J.C. 2014. "Non-isothermal autohydrolysis of nixtamalized maize pericarp: Production of nutraceutical extracts". *LWT - Food Science and Technology*, 58(2), 550–556. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.03.043>.
- Srinophakun, P., Titapiwatanakun, B., Sooksathan, I., Punsuvon, V. 2011. "Prospect of Deoiled *Jatropha curcas* Seedcake as Fertilizer for Vegetables Crops – A Case Study". *Journal of Agricultural Science*, 4(3), 211–226. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n3p211>.
- Staubmann, R., Foidl, G., Foidl, N., Gübitz, G.M., Lafferty, R.M., Arbizu, V.M., Steiner, W. 1997. "Biogas production from *Jatropha curcas* press-cake". *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 63–65, 457–467. <https://doi.org/10.1007/BF02920446>.
- Tiwari, A.K., Kumar, A. & Ā, H.R. 2007. "Biodiesel production from jatropha oil (*Jatropha curcas*) with high free fatty acids: An optimized process". *Biomass & Bioenergy*, 31, 569–575. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.03.003>.
- Tomar, N.S., Sharma, M. & Agarwal, R.M. 2015. "Phytochemical analysis of *Jatropha curcas* L. during different seasons and developmental stages and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) as affected by extracts/leachates of *Jatropha curcas* L." *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 21(1), 83–92. <https://doi.org/10.1007/s12298-014-0272-0>.
- Vioque, J., Pedroche, J., Yust, M.M., Loari, H., Megías, C., Girón-calle, J., Millán, F. 2006. "Peptídeos Bioativos em Proteínas Vegetais de Reserva Bioactive Peptides in Storage Plant Proteins". *Brazilian Journal of Food Technology*, 99–102.
- Xiao, J. & Zhang, H. 2014. "Comparative evaluation of *Jatropha curcas* L. seed meals obtained by different methods of defatting on toxic, antinutritional and nutritive factors". *Journal of Food Science and Technology*, 51(6), 1126–1132. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0608-5>.
- Yust, M.M., Pedroche, J., Girón-Calle, J., Vioque, J., Milla, F., Alaiz, M. 2004. "Determination of tryptophan by high-performance liquid chromatography of alkaline hydrolysates with spectrophotometric detection". *Food Chemistry*, 85, 317–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.07.026>.
- Zhang, M., Gong, K., Jiao, S., Qin, Y., Xiang, C., He, J., Li, B. 2014. "Rapid Detoxification of *Jatropha curcas* Seed Cake by Hydrogen Peroxide Oxidation and Acute Toxicity Evaluation of Detoxified Product". *Agricultural Research*, 3(4), 302–307. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0130-x>.

## Documentos impresos y en línea

- AJINOMOTO. (n.d.). “Impacto de la disponibilidad de los aminoácidos industriales sobre las formulaciones en América latina”. Retrieved February 26, 2018, from [http://www.lisina.com.br/upload/Aminoacidos\\_industriais\\_esp%281%29.pdf](http://www.lisina.com.br/upload/Aminoacidos_industriais_esp%281%29.pdf)
- FAO/WHO. 1973. “Energy and protein requirements”. Report of a joint FAO/WHO ad hoc expert committee. Retrieved from [http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO\\_TRS\\_522.pdf](http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_522.pdf)
- FAO/WHO. 1991. “Protein quality evaluations”. Report of joint FAO/WHO expert consultation. *Food and Nutrition*. Rome Italy. Retrieved from [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/38133/1/9251030979\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/38133/1/9251030979_eng.pdf).
- Makkar, H.P.S., Siddhuraju, P. & Becker, K. 2007. *Plant secondary metabolites*. Retrieved from <http://download.springer.com/static/pdf/310/bok%3A978-1-59745-425-4.pdf?originUrl=http://link.springer.com/book/10.1007/978-1-59745-425-4&token2=exp=1462923456~acl=/static/pdf/310/bok%253A978-1-59745-425-4.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fbo>
- Martínez-Herrera, J., Martínez-Ayala, A., Makkar, H., Francis, G., Becker, K. 2010. “Agroclimatic conditions, chemical and nutritional characterization of different provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico”. *European Journal of Scientific Research*, 39(3), 396–407. Retrieved from <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm%5Cnhttp://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957536650&partnerID=40&md5=e9b-8f6a9a6ea2c8dfcb6662ea28af0ce>.

## Capítulo 8

### Micropropagación de *Jatropha curcas* L.

Guadalupe López Puc<sup>1\*</sup>; Gilbert José Herrera Cool<sup>1</sup>, Yanuari Magdalena Aké-Mex<sup>1</sup>, Jorge Gustavo Vázquez-Díaz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco AC., Sede Sureste. Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, tablaje catastral 31264, km 5.5 carretera Sierra Papacal- Chuburná Puerto. CP 97302. Tel. 01 999 9202671.

\*Autor por correspondencia: glopez@ciatej.mx

### Resumen

*Jatropha curcas* es una especie multipropósito con proyecciones que consideran que es necesario contar con métodos eficientes de propagación para cubrir la demanda de plantas que se requerirán para establecer plantaciones comerciales. Por lo tanto, el uso de técnicas biotecnológicas, como el cultivo *in vitro*, es una opción para cubrir la demanda de material vegetal de variedades elite. La generación de plantas puede ser por propagación clonal a partir de nudos con yemas y germinación de semillas. Sin embargo, se considera que los métodos más eficientes con respecto del número de plantas que se pueden obtener es a través de la morfogénesis inducida a partir de tejidos de origen somático, que por lo general son hojas, hipocotilo y raíz. Las dos rutas morfogénicas que se pueden inducir son la organogénesis y la embriogénesis somática. Es importante tener en cuenta que los métodos morfogénicos también son una herramienta útil para el

mejoramiento genético, ya sea como medio de regeneración de tejidos transformados genéticamente, así como para obtención de células en suspensión que pueden ser sometidas a estrés biótico o abiótico para tener nuevas variedades con características de resistencia o tolerancia a ciertos tipos de estrés.

Dada la importancia de *J. curcas* como cultivo bioenergético, el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco Sede Sureste en conjunto con otras instituciones llevaron a cabo el proyecto titulado Mejoramiento genético de *Jatropha* para generar al menos una variedad con alto rendimiento agronómico, alto contenido de aceite y baja toxicidad para la obtención de biodiésel- 163502, financiado por el fondo Sagarpa-Conacyt del 2012-2018. Parte de los alcances de este proyecto fue realizar micropropagación por cultivo *in vitro*. La morfogénesis fue inducida a través de organogénesis adventicia de brotes lográndose obtener protocolos de micropropagación en los parentales y los híbridos F1 que formaron parte del proyecto.

## Palabras clave

Morfogénesis, cultivo *in vitro*, *Jatropha curcas*, Tidiazuron

## Introducción

El consumo de combustibles fósiles genera compuestos que contaminan la atmósfera contribuyendo al cambio climático, lo que se ha convertido en una de las problemáticas que más afectan el ambiente. Para disminuir este problema, una alternativa es el uso de biodiésel, cuyo uso puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. El biodiésel se produce al convertir los triglicéridos de aceites orgánicos en compuestos denominados ésteres, a este proceso bioquímico se le conoce como transesterificación, en donde las tres cadenas ésteres de cada molécula de triglicérido reaccionan con un alcohol (metanol), y cuyos productos finales son glicerina y un metiléster de ácido graso, que es el combustible. Uno de los subproductos que genera la transesterificación es la glicerina, que luego de su purificación puede ser utilizada por las industrias farmacéutica y cosmética.

La producción de biocombustibles ha generado controversia debido a la crisis alimentaria y al incremento de precios de alimentos básicos, como el maíz, arroz, trigo, entre otras leguminosas; como causa de esta crisis se suma la demanda de tierras y productos para la producción de biocombustibles. Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la oferta alimentaria de granos se ha reducido y los precios de los alimentos han aumentado debido en parte a que países como Brasil y Estados Unidos usan grandes extensiones para cultivar la materia prima de los biocombustibles en lugar de alimentos. Este fenómeno afecta a los grupos humanos más vulnerables del planeta (De Aquino *et al.*, 2009).

*Jatropha curcas* L. (*J. curcas*) es un cultivo que no se utiliza como alimento humano y que tiene potencial para la producción de biodiésel; puede contribuir a la reducción del impacto ambiental y el fortalecimiento socioeconómico (Divakara *et al.*, 2010).

La demanda de energía sigue en aumento y va de la mano con el crecimiento poblacional. Una de las problemáticas que enfrenta la humanidad es la necesidad de disminuir los efectos del cambio climático a nivel global. Este cambio se ha producido, entre otros factores, principalmente por las emisiones contaminantes derivadas del uso de combustibles fósiles. Por lo que en los últimos años se han dirigido esfuerzos hacia la búsqueda de fuentes de energía sustentables y renovables. En este sentido, una opción es el biodiésel, ya que este combustible tiene menos contaminantes para el ambiente. El biodiésel puede ser producido a partir del aceite extraído de especies vegetales como *J. curcas* (Torralba *et al.*, 2008), que se proyecta como un cultivo energético promisorio.

El establecimiento de plantaciones comerciales demanda gran cantidad de plantas de *J. curcas*. El método de propagación convencional a través de semillas produce plantas con alta variabilidad genética, lo que causa problemas para el uso agroindustrial (López-Mendoza, 2015), ya que el rendimiento de semillas puede variar y no hay garantía en el contenido de aceite (Mukherjee *et al.*, 2011). También pueden presentarse enfermedades transmitidas de la semilla a la planta; además, las semillas pierden 50% de su viabilidad después de 15 meses de almacenamiento. Por otra parte, las plantas propagadas vegetativamente a partir de estacas presentan una baja longevidad (Mukherjee *et al.*, 2011.) y puede ocurrir acumulación de enfermedades sistémicas y provocar bajos rendimientos (Hussey, 1978).

Debido a que la industrialización de esta especie requiere tecnologías que permitan el suministro permanente de plantas con estabilidad genética. Una alternativa es la micropropagación, mediante técnicas de cultivo de tejidos (CTV) (Kalimuthu *et al.*, 2007) que permite obtener plántulas genotípicamente iguales de variedades élite. Hay reportes que indican que *J. curcas* es difícil para micropropagar (Singh & Shetty, 2012) en algunos casos se reporta la regeneración *in vitro*, pero los resultados varían por efecto del genotipo (Sujatha *et al.*, 2005).

## Cultivo *in vitro*

El cultivo *in vitro* de plantas es el cultivo de plantas o partes de ellas en un medio nutritivo bajo condiciones estériles y controladas; se puede utilizar semillas, plantas, órganos, tejidos, células y protoplastos (que en general reciben el nombre de explantes). Dependiendo del tipo de explante, se inducirá, ya sea propagación clonal o morfogénesis. Los explantes cultivados en condiciones *in vitro* y con la formulación adecuada del medio de cultivo dan paso a un proceso morfogénico. El medio de cultivo está constituido por macronutrientes (sodio, potasio, nitrógeno, magnesio, azufre) y micronutrientes (hierro, zinc, cobre, manganeso, aluminio, níquel), sustancias orgánicas como vitaminas, azúcares, aminoácidos, reguladores de crecimiento vegetal (RCV), entre otros.

## Morfogénesis

La morfogénesis se define como la formación o la génesis de órganos y comprende el crecimiento y la diferenciación celular. En células o tejidos cultivados *in vitro* el proceso morfogénico puede inducirse debido a que las células vegetales son capaces bajo determinados estímulos de desdiferenciarse y diferenciarse de nuevo. Esta plasticidad celular se conoce como totipotencia celular.

La morfogénesis ocurre por dos rutas principales: la organogénesis y la embriogénesis somática. En la organogénesis se produce la formación de brotes o raíces. Mientras que en la embriogénesis somática (ES) puede ocurrir la formación de embriones sin necesidad de fecundación. Ambas rutas pueden ocurrir de forma directa o indirecta (Figura 1). En la forma directa la formación de órganos o embriones se produce directamente sobre el explante. En la indirecta ocurre la desdiferenciación celular que da lugar a una masa de células indiferenciadas denominada callo, las cuales, bajo condiciones adecuadas, generan órganos o embriones somáticos. La respuesta morfogénica puede ser modificada con el uso de los RCV adicionados a los medios de cultivo para realizar una acción específica o para conseguir la micropropagación de una planta.

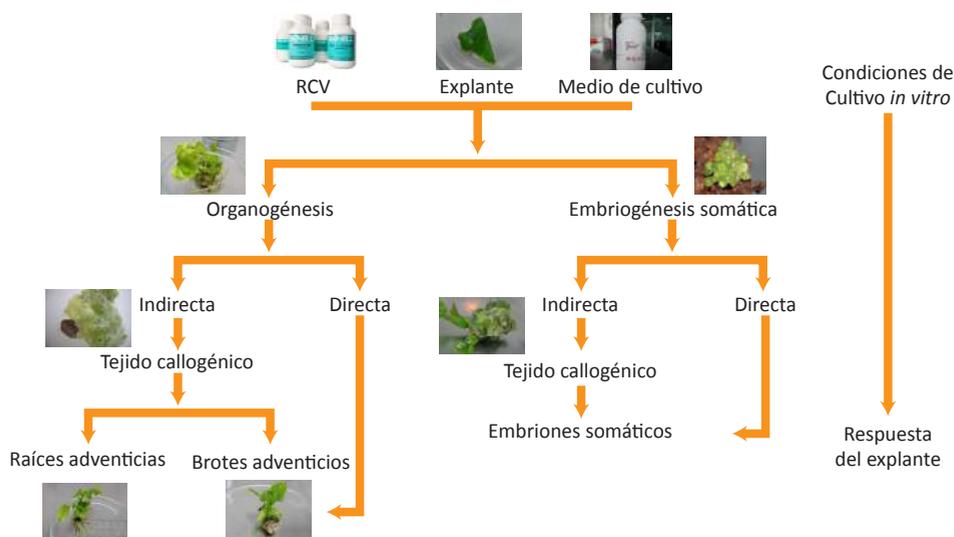


Figura 1. Rutas morfológicas en el cultivo *in vitro* de tejidos somáticos para la micropropagación de plantas.

## Resultados del proyecto

En el proyecto Mejoramiento genético de *Jatropha* para generar al menos una variedad con alto rendimiento agronómico, alto contenido de aceite y baja toxicidad para la obtención de biodiésel- 163502. La morfogénesis fue inducida a través de organogénesis adventicia de brotes lográndose obtener protocolos de micropropagación en los parentales y los híbridos F1.

**Material vegetal, manejo fitosanitario de la planta madre, selección, desinfección y establecimiento de explantes *in vitro***

### Material vegetal

El material vegetal de *J. curcas* que se utilizó para la experimentación fueron los parentales e híbridos F1 generados en el proyecto.

### Manejo fitosanitario de las plantas madre

El material vegetal se sometió a un control fitosanitario con la finalidad de eliminar bacterias, hongos y patógenos; las plantas madre se trataron con agroquímicos una semana antes del cultivo *in vitro*. En el Cuadro 1 se muestran los productos aplicados para el control fitosanitario.

#### Cuadro 1. Uso de agroquímicos para el control fitosanitario en plantas madre

Agroquímicos	Ingrediente activo	Preparación
Benomil (Fungicida)	Benomilo	5 g/L
Agrimy (bactericida-fungicida)	Estreptomicina + Oxitetraciclina + Oxiclورو de cobre	3 g/L

Los agroquímicos Benomil y agrimy se diluyeron para formar una solución según lo indicado en el Cuadro 1, el pH de la solución se ajustó a seis. A cada planta se le aplicó 50 ml de cada agroquímico. La aplicación fue cada dos días por las mañanas, las soluciones se aplicaron directamente al sustrato de la planta por una semana (Figura 2). Las plantas se regaron dos veces por semana.



Figura 2. Aplicación de tratamiento fitosanitario a plantas madre de *J. curcas* (Aké-Mex., 2015)

### Selección, desinfección y establecimiento *in vitro* de explantes

Con la finalidad de tener material vegetal de buena calidad para el cultivo *in vitro* se seleccionaron hojas jóvenes-maduras con tonalidad verde brillante, de aspecto saludable y libre de insectos. Las hojas seleccionadas se lavaron con agua de la llave y jabón comercial (no se enjuagaron), posteriormente se sumergieron en agua oxigenada por 30 segundos, se enjuagaron con agua estéril, se rociaron con etanol al 70% (v/v), y sin enjuagar, las hojas se introdujeron a la campana de flujo laminar, se remojaron por 10 minutos en hipoclorito de sodio comercial al 5% (v/v), se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril, finalmente los explantes de hoja se colocaron en un recipiente estéril. Los explantes desinfectados previamente se cortaron de forma longitudinal y transversal obteniendo un explante de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup>. Se colocó un segmento de hoja por caja Petri. El segmento de hoja se colocó horizontalmente, de manera que el envés de la hoja quedó en contacto directo con el medio de cultivo. Los pasos del protocolo se representan en la Figura 3.

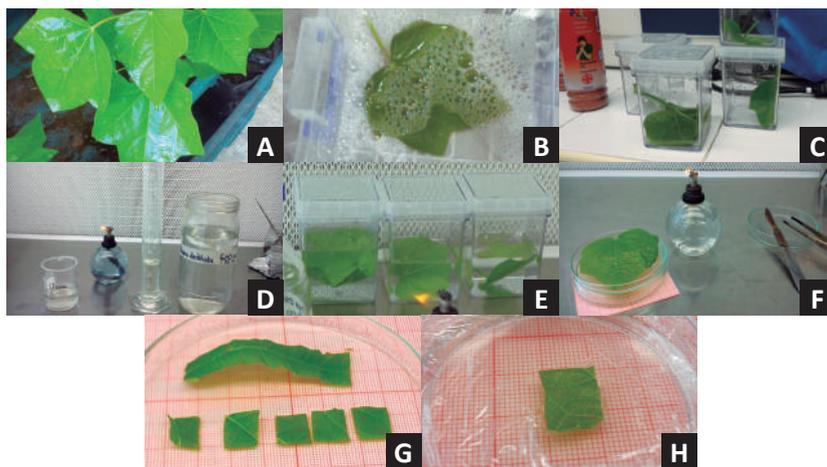


Figura 3. Protocolo de selección, desinfección y establecimiento *in vitro* de explantes en *J. curcas*. (A) Planta madre; (B) Hoja en agua de la llave y jabón comercial; (C) Hojas sumergidas en agua oxigenada; (D) Aplicación de etanol al 70% (v/v) e hipoclorito de sodio comercial al 5% (v/v); (E) Hojas en enjuague con agua destilada estéril; (F) Explante desinfectado; (G) Segmentación de los explantes desinfectados; (H) Siembra de explantes.

## Organogénesis de brotes adventicios de explante de hoja de *J. curcas*

A continuación, se describe de forma breve los antecedentes, generalidades de la metodología y los resultados obtenidos durante la inducción de organogénesis adventicia de brotes. Se presentan diferentes factores que influyen en la morfogénesis, haciéndose mayor énfasis en los RCV, ya que es uno de los factores que más influye durante la morfogénesis.

### Efecto del Tidiazuron (TDZ), concentración del medio basal, condiciones de cultivo y del genotipo

#### Antecedentes

EL TDZ es una fenilurea (N-fenil-N' - 1, 2,3-thidiazol-5- ilurea) que se utiliza para la regeneración de plantas *in vitro* (Jones *et al.*, 2007). El TDZ es un regulador altamente efectivo en la morfogénesis *in vitro* y puede inducir un amplio rango de respuestas (Visser *et al.*, 1992). Aunque el mecanismo de acción del TDZ es desconocido, existe la hipótesis de que promueve el crecimiento debido a que su actividad biológica es similar a las citocininas, también se cree que induce la síntesis y/o acumulación de citocininas endógenas, por ejemplo, promueve la liberación de brotes laterales que se encuentra en etapas de latencia y forma brotes en una amplia variedad de especies de plantas. El TDZ es capaz de inducir la producción brotes adventicios y/o axilares a través del proceso de organogénesis, y también, embriogénesis somática en muchas especies dicotiledóneas (Shan *et al.*, 2000).

#### Metodología

La desinfección de explante de hoja y el establecimiento de los cultivos se realizó siguiendo los pasos descritos en la Figura 3. El diseño experimental fue 4 X 2 X 2 X 2, se evaluó el efecto del TDZ a cuatro concentraciones, el medio basal a dos concentraciones, dos condiciones de cultivo, en dos genotipos: *J. curcas* ALJC01 y *J. curcas* PEBA, ambos son parentales del proyecto. Los factores y los niveles se describen en el Cuadro 2. Todos los tratamientos fueron evaluados por triplicado y se utilizó un control.

Todos los tratamientos se suplementaron con 30 g/L de sacarosa, 2.2 g/L de gel rite. El pH de todos los tratamientos se ajustó a 5.8 con ácido clorhídrico (HCl) 1N o hidróxido de sodio (NaOH) 1N, la esterilización de los medios de cultivo fue a presión de 15 psi, a 121 °C por 20 minutos.

La temperatura de los cuartos de cultivo *in vitro* fue  $23 \pm 2$  °C, y humedad relativa (HR) de 60%. La luz de los cuartos de cultivo fue proporcionada por lámparas blancas led con una intensidad lumínica de  $60 \mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Todos los cultivos fueron mantenidos en estas condiciones por 45 días. Se evaluó el número de brotes formados por explante. Los datos se analizaron con el software estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

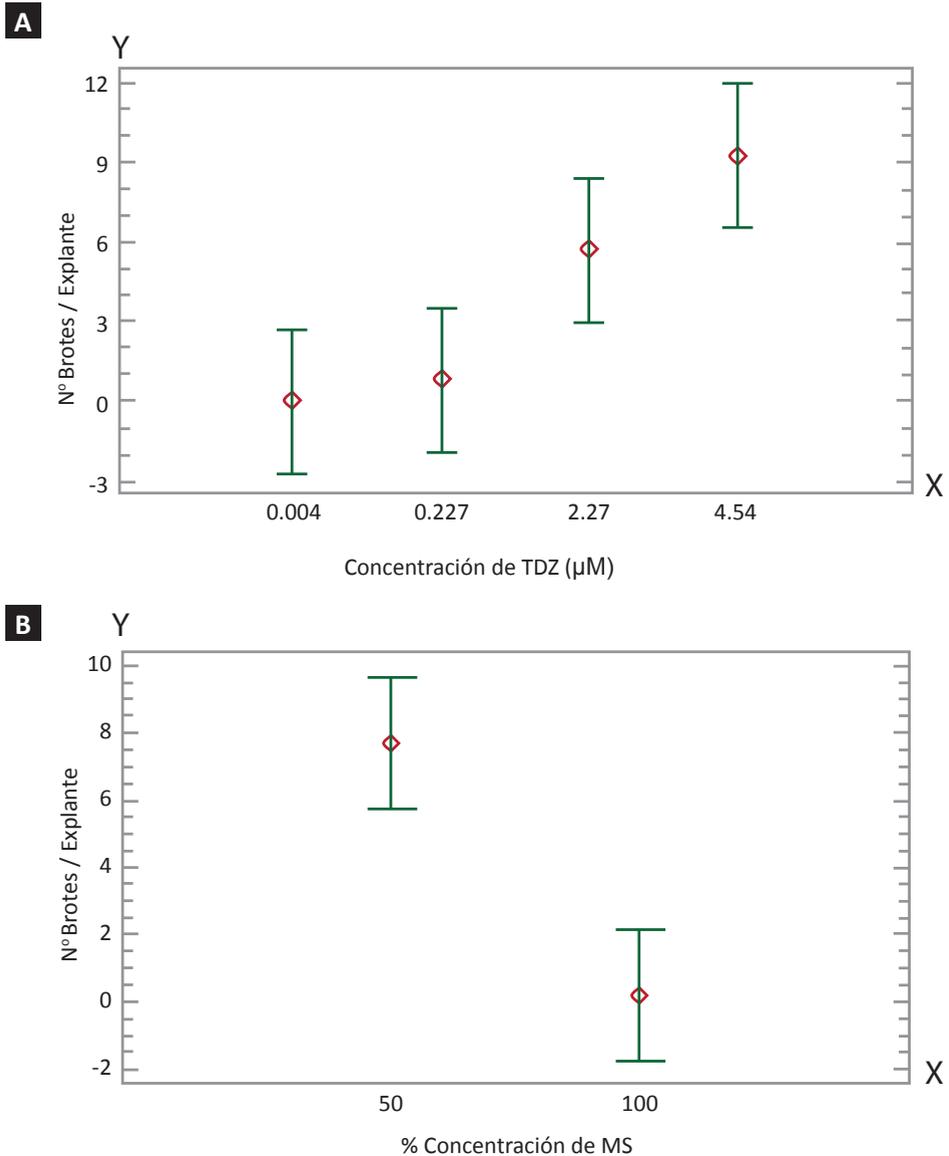
### Cuadro 2. El diseño experimental 4 X 2 X 2 X 2

Factor	Niveles
TDZ	0.004, 0.227, 2.27, y 4.54 $\mu\text{M}$
MS	La mitad de su fuerza iónica (1/2 MS) y 100% de su fuerza iónica (1MS)
Condiciones de cultivo	Oscuridad total y fotoperiodo con 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad
Genotipo	<i>J. curcas</i> ALJC01 y <i>J. curcas</i> PEBA

### Resultados

La ruta morfogénica obtenida fue organogénesis indirecta de brotes adventicios. En el análisis de los resultados de los diferentes factores evaluados se observó que la concentración del TDZ en la inducción de brotes adventicios tuvo diferencia significativa en el número de brotes formados. El mayor efecto se observó con 4.54  $\mu\text{M}$  de TDZ, concentración que permitió un promedio de 9 brotes por explante (Figura 4A). Cuando se utilizó 1/2MS se formó un promedio de 8 brotes por explante (Figura 4B). El genotipo de los materiales evaluados no tuvo diferencia significativa en el número de brotes formados

(Figura 4C). En el gráfico de medias de la Figura 4D se observa que el fotoperíodo permitió inducir más brotes.



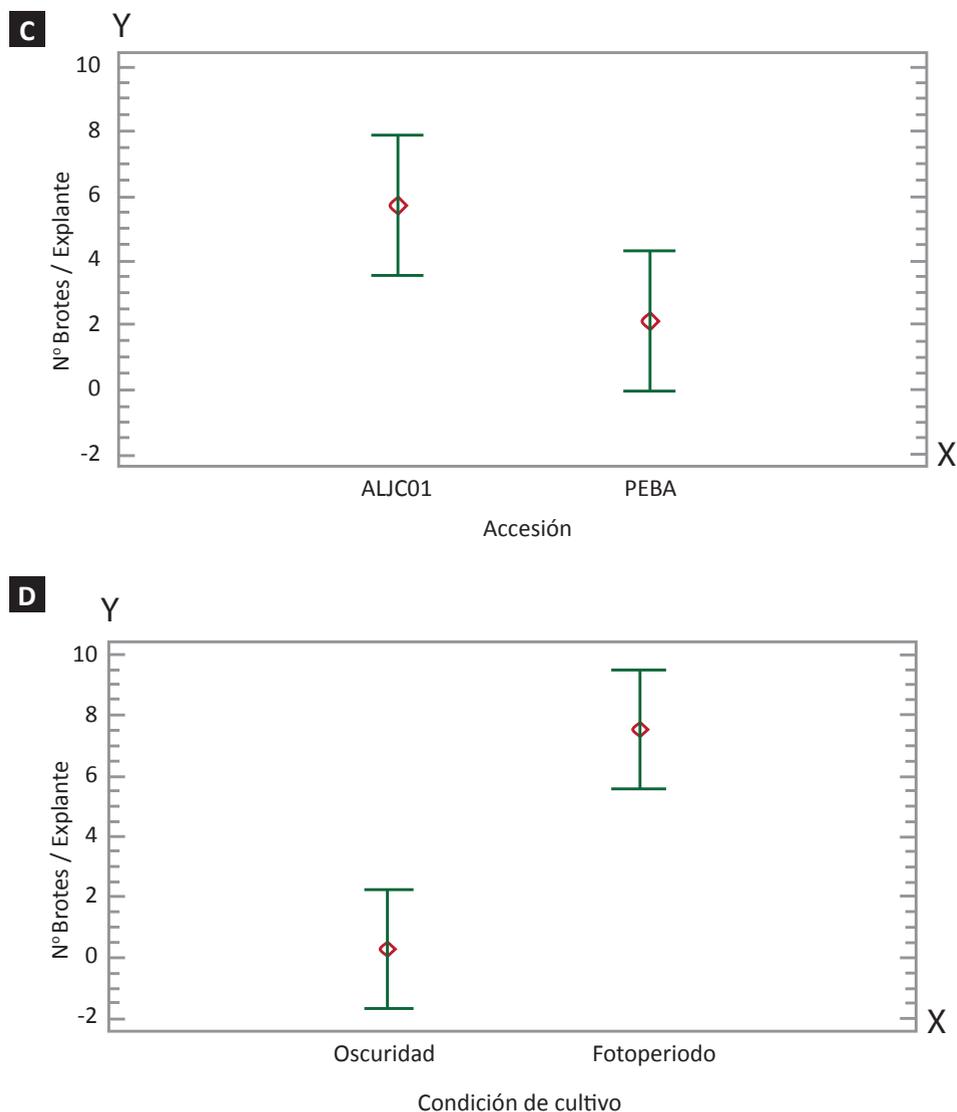


Figura 4. Medias de números de brotes adventicios inducidos en explante de hoja de *J. curcas*, por efecto de: (A) Concentración del TDZ, (B) Concentración del medio basal, (C) Genotipo y (D) Condiciones de iluminación de los cuartos de cultivo.

## Efecto del uso combinado del Ácido naftalenacético (ANA) y Zeatina (ZEA)

### Antecedentes

Las auxinas son RCV que se agregan a los medios de cultivo *in vitro*. Estas sustancias químicas tienen la capacidad de regular el crecimiento, la división celular y la diferenciación de raíces. En las plantas, las auxinas intervienen en el tropismo a la gravedad y a la luz, la dominancia apical, el crecimiento de las partes florales y la diferenciación de los tejidos vasculares (Davies, 2004).

Las citocininas son otro tipo de RCV y son comúnmente agregadas a los medios de cultivo *in vitro*. Son derivados de la adenina y promueven la división celular, el transporte de solutos hacia las hojas, las semillas, las flores y los frutos, y producen un retardo de la senescencia de las hojas. La inclusión de citocininas en el medio de cultivo permite formar callos en varias especies vegetales, aunque principalmente induce a las regiones meristemáticas multicelulares para que se diferencien en estructuras organizadas.

La proporción entre auxinas y citocininas permite regular la morfogénesis, por lo que se deben programar las concentraciones de auxinas y citocininas a través de diseños factoriales para cada especie y variedad vegetal y según el objetivo del trabajo. En general, cuando las concentraciones son auxina alta/citocinina baja forman raíces, cuando las concentraciones son auxina baja/citocinina alta se producen vástagos y cuando las concentraciones tienen una relación 1:1 en auxina/citocinina se producen callos (Nwankwo & Krikorian, 1986). Basándose en lo antes mencionado se planteó el uso combinado de una citocinina con una auxina.

### Metodología

La desinfección y pasos iniciales para el establecimiento de los cultivos se realizaron siguiendo los pasos descritos en la Figura 3. La morfogénesis fue evaluada en explante de hoja de *J. curcas* ALJC01 (parental del proyecto). El diseño experimental  $4^2$  fueron dos factores: ácido naftalen acético (ANA) y Zeatina (ZEA) con cuatro niveles, los tratamientos se describen en la Figura 5.

Todos los tratamientos se suplementaron con 4.4 g/L de MS, 30 g/L de sacarosa y 2.2 g/L de gel rite. El pH de todos los tratamientos se ajustó a 5.8 con ácido clorhídrico (HCl) 1N o hidróxido de sodio (NaOH) 1N, la esterilización de los medios de cultivo fue a presión de 15 psi, a 121 °C por 20 minutos.

El cuarto de cultivo fue con fotoperíodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad. La luz de los cuartos de cultivo fue proporcionada por lámparas blancas led con una intensidad lumínica de 60  $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$ . La temperatura de los cuartos de cultivo *in vitro* fue  $23 \pm 2$  °C, y humedad relativa (HR) de 60%. Todos los cultivos fueron mantenidos en estas condiciones por 45 días. Se evaluó el número de brotes formados por explante. Los datos se analizaron con el software estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

## Resultados

La ruta morfogénica obtenida fue organogénesis indirecta de brotes adventicios. En el análisis de los resultados de los diferentes factores evaluados se observó que al utilizar la combinación de ANA con ZEA, el tratamiento que permitió la inducción de un mayor número de brotes fue el tratamiento 11 con 8.055  $\mu\text{M}$  de ANA y 0.456  $\mu\text{M}$  de ZEA. Se observa que hay diferencia significativa entre el tratamiento 11 y los demás tratamientos evaluados (Figura 5).

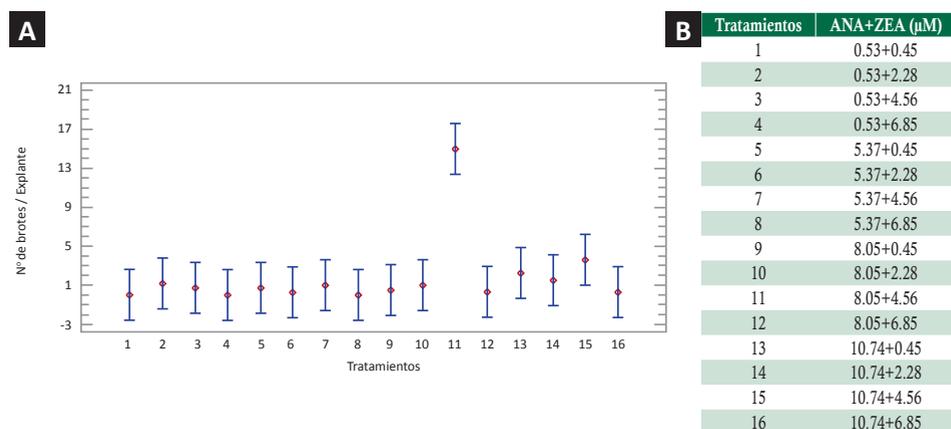


Figura 5. (A) Gráfico de medias de número de brotes formados en tratamientos con combinaciones de AIA y ZEA, (B) Cuadro con los tratamientos realizados

## Efecto del sulfato de adenina (Sad), 6- ( $\gamma$ , $\gamma$ -Dimetilalilamino) purina (2ip) y ácido indolacético (AIA)

### Antecedentes

La adenina es una nucleobase de purina con una amplia gama de funciones químicas y bioquímicas *in vivo* e *in vitro*. Es una molécula reguladora y un componente de las moléculas de ADN, ARN, cofactores (NAD, FAD) y de señalización (cAMP) (George, 2008a); de acuerdo con Murashige (1974) la adenina en forma de sulfato de adenina puede estimular el crecimiento celular y mejorar enormemente la formación de brotes; esto se debe a que actúa como un precursor de la síntesis de citocinina natural (Khan *et al.*, 2014). Los compuestos producidos podrían ser más efectivos a causa de una respuesta fisiológica de las citocininas añadidas al medio (Khan *et al.*, 2014; George, 2008b); provee también de un recurso adicional de nitrógeno a las células, el cual puede ser absorbido más rápidamente como nitrógeno inorgánico (Hussain *et al.*, 2006).

Las citocininas son un grupo de reguladores de crecimiento que producen varios efectos cuando son aplicados a los explantes y particularmente estimulan la síntesis de proteínas que participan en el control del ciclo celular (George, 2008a); estimulan el desarrollo de meristemos y promueven el desarrollo de brotes en combinación con concentraciones bajas de auxinas (Maharana *et al.*, 2012). La primera citocinina descubierta fue la kinetina (Barciszewski *et al.*, 2007), llamada así porque estimula la división celular, aunque la kinetina no ha sido aceptada como un regulador natural, se han identificado muchas citocininas estructuralmente relacionadas a la kinetina; hasta ahora algunas de las citocininas naturales o sintéticas utilizadas en el cultivo *in vitro* son la kinetina (Kin), bencilaminopurina (BAP), trans-zeatina, dihidro-zeatina, cis-zeatina, zeatina ribosa, tidiazuron (TDZ), 6- ( $\gamma$ ,  $\gamma$ -Dimethylallylamino) purina (2ip), entre otros (George, 2008a).

Las auxinas forman una parte integral del medio de cultivo; promueven principalmente (en combinación con las citocininas) el crecimiento de callo y células en suspensión, de igual forma regulan el desarrollo de órganos (George, 2008b); también controlan los procesos de división y elongación celular; están involu-

cradas en la formación de meristemas que dan surgimiento a órganos definidos. En los tejidos organizados, las auxinas están involucradas en el establecimiento y mantención de la polaridad, marcando en todas las plantas la dominancia apical (Zažímalová *et al.*, 2003). Entre las auxinas naturales o sintéticas que se pueden utilizar en el CTV podemos mencionar al ácido indolacético (AIA), ácido indolbutírico (AIB), ácido naftalenacético (ANA), glucobrassicina, 2,4-diclorofenoxiacético (2,4D), dicamba, Picloram entre otros.

## Metodología

La desinfección y pasos iniciales para el establecimiento de los cultivos se realizaron siguiendo los pasos descritos en la Figura 3. Los tratamientos se plantearon con base en un diseño factorial 3<sup>3</sup>: 3 niveles con 3 factores obteniéndose 27 tratamientos los factores evaluados fueron Sad, 2ip y AIA. Los tratamientos se describen en la Figura 6. Este diseño fue aplicado en *J. curcas* Ochkan y *J. curcas* Sikilte, ambos son híbridos F1 del proyecto 2011-163502 Sagarpa-Conacyt.

En todos los tratamientos se utilizó 4.4 g/L del medio basal MS (Murashige & Skoog, 1962), 30 g/L de sacarosa y 2.2 g/L de gel rite, el pH se ajustó a 5.8. Todos los tratamientos fueron esterilizados a 120 °C por 20 minutos.

Los explantes fueron incubados por 45 días en condiciones de fotoperíodo a 16/8 horas (luz/oscuridad), la luz fue proporcionada por lámparas blancas led con una intensidad lumínica de 60  $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$  a 23  $\pm$  2°C, 60% de humedad relativa. Al término del período de inducción se evaluó el número de brotes formados por explante. Los datos se analizaron con el software estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

## Resultados

En la inducción de la organogénesis, la variedad Ochkan formó mayor número de brotes en comparación con la variedad Sikilté. Esto puede deberse a que la respuesta morfogénica es altamente dependiente del genotipo (da Cámara Machado *et al.*, 1997; Kumar y Reddy, 2010). Para *J. curcas* Ochkan, los tratamientos que formaron mayor número de brotes fueron el 12 (124.95  $\mu\text{M}$  de 2ip,

1.1  $\mu\text{M}$  de AIA y 282.34  $\mu\text{M}$  de Sad) y 23 (110.25  $\mu\text{M}$  de 2ip, 1.44  $\mu\text{M}$  de AIA y 325.78  $\mu\text{M}$  de Sad). En *J. curcas* Sikilté, los tratamientos con mayor número de brotes fueron el 9 (124.95  $\mu\text{M}$  de 2ip, 1.27  $\mu\text{M}$  de AIA y 269.21  $\mu\text{M}$  de Sad) y el 16 (95.55  $\mu\text{M}$  de 2ip, 1.1  $\mu\text{M}$  de AIA y 282.34  $\mu\text{M}$  de Sad) (Figura 6).

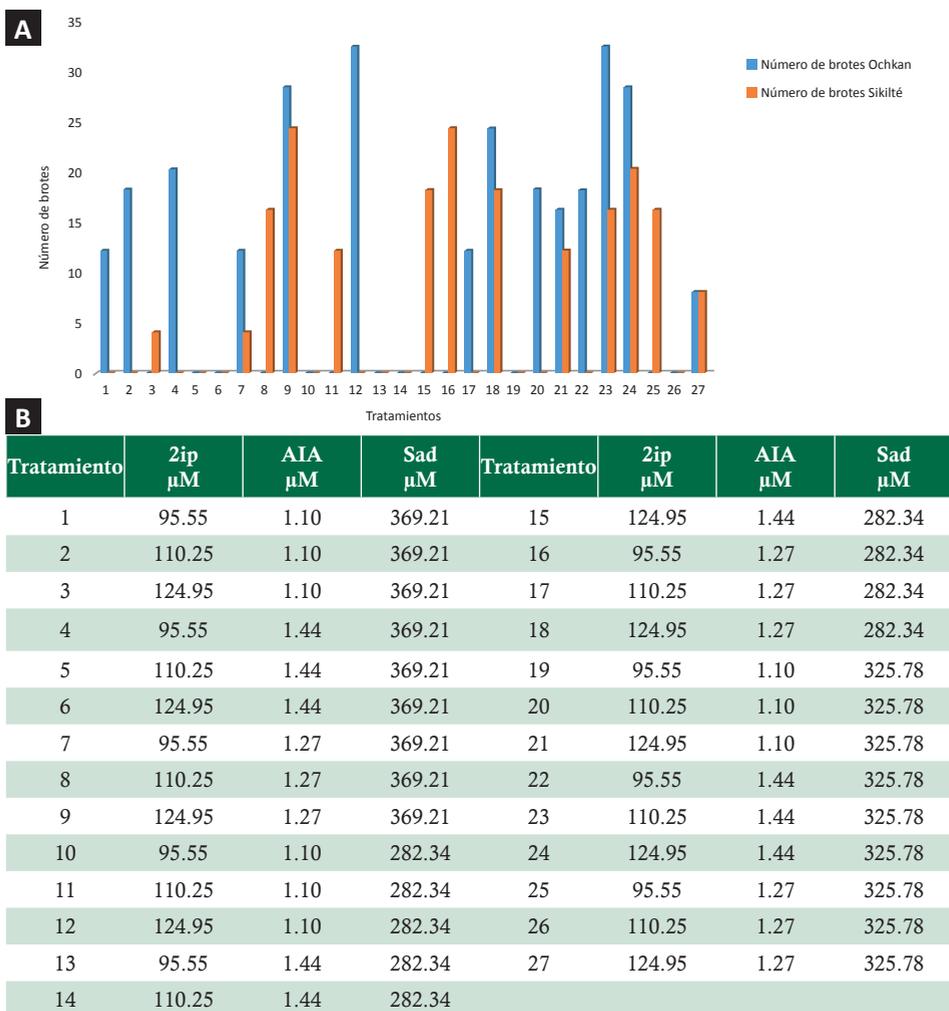


Figura 6. (A) Gráfico con número de brotes inducidos en explante de hoja de *J. curcas* Ochkan y *J. curcas* Sikilté, (B) Cuadro con los tratamientos realizados.

## Efecto del tipo de explante

### Antecedentes

El explante en cultivo de tejidos vegetales puede ser definido como cualquier célula somática, gamética o tejido vegetal, el cual, al ser cultivado en un medio basal de formulación conocida con ciertos factores físicos y químicos es capaz de adquirir competencia organogénica; esta competencia es definida como la habilidad de las células para reorganizarse mediante la respuesta a las señales hormonales y posteriormente las células competentes son canalizadas para la morfogénesis de órganos específicos influenciadas por el balance de los RCV (Sugiyama, 1999).

Bhojwani & Dantu (2013) mencionan que el explante es el tercer factor más importante, después de la composición del medio y el genotipo, y para que pueda adquirir la competencia organogénica, hay que considerar la fuente del explante, la edad del tejido, la planta de la que se deriva, la desinfección previa a la siembra, la manera en que se planta en el medio y la densidad del inóculo; Vasil & Hildebrandt (1965) mencionan que explantes jóvenes suelen tener mejor respuesta los factores durante el cultivo *in vitro*, esto puede deberse a que algunas células del explante joven aún son meristemáticas, o sea, son sólo parcialmente diferenciadas y aparentemente no tienen funciones especializadas. En *Jatropha curcas* se han reportado una vasta gama de explantes que cultivados en un medio basal conocido, con los RCV y aditivos adecuados puede formar estructuras organogénicas directas o indirectas, el uso de los reguladores de crecimiento vegetal (RCV) y el modo de regeneración obtenido por diferentes autores en varios tipos de explante (Cuadro 3).

### Cuadro 3. Estudios sobre el cultivo de tejidos en *Jatropha curcas* L.

Tipo de explante	Modo de regeneración	RCV	Referencias
Pecioló	Organogénesis directa de brotes	TDZ, Kin, BAP, ANA	(Kumar, Anand & Reddy, 2011)

Tipo de explante	Modo de regeneración	RCV	Referencias
Segmento de hoja	Brotación adventicia	TDZ, BAP, AIB	(Deore & Johnson, 2008)
Embrión inmaduro	Organogénesis indirecta	BAP, Kin, AIB	(Varshney & Johnson, 2010)
Hoja cotiledonar	Organogénesis directa de brote	TDZ, Kin, BAP, ANA	(Kumar & Reddy, 2010)
Segmentos nodales	Formación múltiple de brotes	BAP, Kin, AIA	(Kalimuthu <i>et al.</i> , 2007)
Segmentos foliares	Embriogénesis somática	Kin, AIB, Sad	(Baran Jha, Mukherjee & Manjari Datta, 2007)
Epicotilo e hipocotilo	Organogénesis directa e indirecta	TDZ, Kin, AIB	(Kaewpoo & Te-chato, 2010)
Hojas	Regeneración de embriones somáticos	BAP, AIA	(Jyoti, Amla & Ali, 2000)

RCV: reguladores de crecimiento vegetal, BAP: bencilaminopurina, Kin: kinetina, AIB: ácido indolbutírico, ANA: ácido naftalenacético, AIA: ácido indolacético, Sad: sulfato de adenina, TDZ: tiazuron.

## Metodología

El establecimiento del experimento fue a partir de plántulas *in vitro*, se cortaron explantes de 0.5 cm de longitud (para raíz, hipocotilo y peciolo) y hoja (1 cm<sup>2</sup>).

El diseño experimental fue un arreglo factorial de 4x3, siendo el primer factor el tipo de explante con cuatro niveles (raíz, hipocotilo, peciolo y hoja) y el segundo factor la concentración del medio de cultivo MS con tres niveles, variando la fuerza iónica, al 75% (3/4MS), 100% (1MS), 125% (1¼ MS).

El modelo estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

$\mu$  = la media global.

$\alpha_i$  = es el efecto debido al *i*-ésimo nivel del factor A.

$\beta_j$  = es el efecto debido al *j*-ésimo nivel del factor B.

$(\alpha\beta)_{ij}$  = representa el efecto de interacción en la combinación *ij*.

$\epsilon_{ijk}$  = es el error aleatorio.

Todos los tratamientos se suplementaron con 124.95  $\mu\text{M}$  de 2ip, 1.1  $\mu\text{M}$  de AIA y 282.34  $\mu\text{M}$  de Sad, 4.4 g/L del medio MS (Murashige & Skoog, 1962), 30 g/L de sacarosa y 2.2 g/L de gel rite, el pH se ajustó a 5.8. Todos los tratamientos fueron esterilizados a 120 °C por 20 minutos.

Los explantes fueron incubados por 45 días en condiciones de fotoperíodo a 16/8 horas (luz/oscuridad), la luz fue proporcionada por lámparas blancas led con una intensidad lumínica de 60  $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$  a 23  $\pm$  2°C, 55-60% de humedad relativa. Al término del período de inducción se evaluó el número de brotes formados por explante y porcentaje de explantes con respuesta. Los datos se analizaron con el software estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

## Resultados

El explante que mostró ser más responsivo a la organogénesis de brotes fue el hipocotilo con 1MS, obteniendo brotes de 1 cm de longitud. En el Cuadro 4 se observa que la concentración de medio MS y el hipocotilo como explante se obtuvo hasta 12 brotes adventicios en promedio para el tratamiento 6; también se observa que en la mayoría de los tratamientos mostraron baja o nula respuesta.

### Cuadro 4. Organogénesis *in vitro* de *J. curcas* por efecto del tipo de explante y la concentración del medio basal

# Tratamiento	Tipo de Explante	Medio de cultivo MS	Respuesta del explante (%)	Número de brotes
1	Raíz	3/4MS	66 $\pm$ 0.6 <sup>ab</sup>	00.0 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>
2	Hipocotilo	3/4MS	33 $\pm$ 0.6 <sup>ab</sup>	02.0 $\pm$ 3.0 <sup>a</sup>
3	Peciolo	3/4MS	-	00.0 $\pm$ 0.0 <sup>a</sup>

# Tratamiento	Tipo de Explante	Medio de cultivo MS	Respuesta del explante (%)	Número de brotes
4	Hoja	$\frac{3}{4}$ MS	66±0.6 <sup>ab</sup>	00.6 ± 0.5 <sup>a</sup>
5	Raíz	1MS	-	00.0 ± 00 <sup>a</sup>
6	Hipocotilo	1MS	100±00 <sup>b</sup>	12.3 ± 1.5 <sup>b</sup>
7	Peciolo	1MS	33±0.6a <sup>b</sup>	00.0 ± 0.0 <sup>a</sup>
8	Hoja	1MS	-	00.0 ± 0.0 <sup>a</sup>
9	Raíz	1 $\frac{3}{4}$ MS	-	00.0 ± 0.0 <sup>a</sup>
10	Hipocotilo	1 $\frac{3}{4}$ MS	-	00.0 ± 0.0 <sup>a</sup>
11	Peciolo	1 $\frac{3}{4}$ MS	-	00.0 ± 0.0 <sup>a</sup>
12	Hoja	1 $\frac{3}{4}$ MS	-	00.0 ± 0.0 <sup>a</sup>

Tratamientos con las mismas letras son estadísticamente iguales según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). (-): sin respuesta.

En el análisis de varianza realizado para la respuesta de los diferentes tipos de explante, se obtuvo un valor de P de 0.0128 para el efecto del medio de cultivo y de 0.0548 para el tipo de explante. Mientras que el valor de P de la interacción del medio de cultivo con el tipo de explante fue 0.0279. Con base en estos resultados hubo efecto significativo en la concentración del medio de cultivo y la interacción del medio con el tipo de explante, lo que señala que al menos un tratamiento tuvo diferencia con respecto de los demás.

En cuanto al número de brotes adventicios formados se observó diferencia significativa para los factores principales (tipo de explante y medio de cultivo), así como para la interacción entre ambos, los tres efectos tuvieron un valor P menor a 0.05. El factor que tuvo más efecto fue el medio de cultivo (Figura 7), ya que al utilizar 1MS se obtuvo hasta 100% de explantes de hipocotilo que formaron 12 brotes en promedio (Figura 8). Estos resultados son similares a lo reportado por Verma & Verma (2015), en el cual obtuvieron hasta 90% en la respuesta de los explantes de hoja, hipocotilo y peciolo, aunque el mayor número de brotes lo obtuvieron con explante de hoja con 12 brotes promedio, esta diferencia se pudo deber a la formulación del medio de cultivo y el tipo de variedad que utilizaron. La morfología de los brotes inducidos se observa en la Figura 9.

Tipo de explante

- Hipocotilo
- Hoja
- Pecíolo
- Raíz

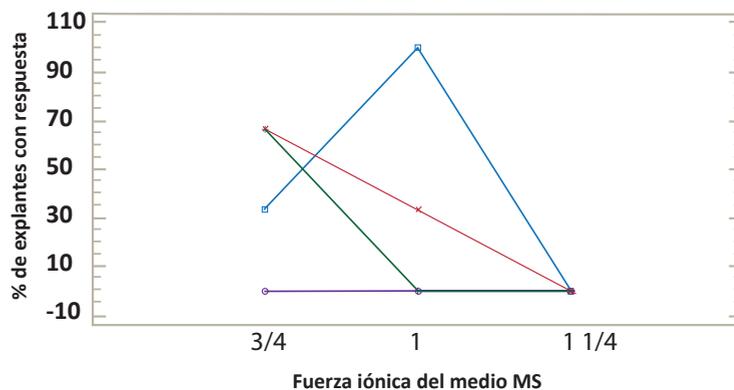


Figura 7. Porcentaje de explantes que formaron brotes por efecto de la fuerza iónica del medio de cultivo y tipo de explante.

Tipo de explante

- Hipocotilo
- Hoja
- Pecíolo
- Raíz

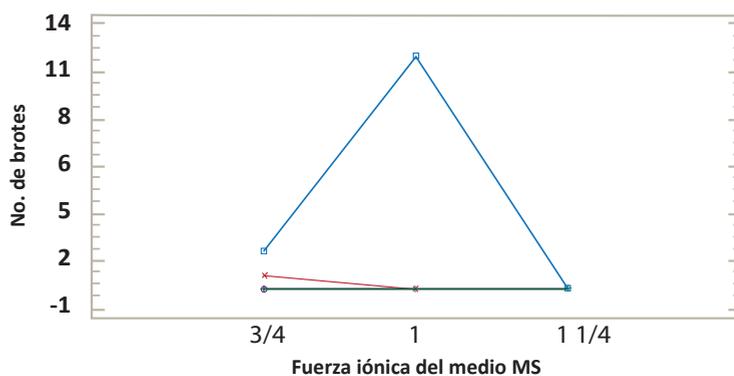


Figura 8. Número de brotes formados por efecto de la concentración de medio y tipo de explante.

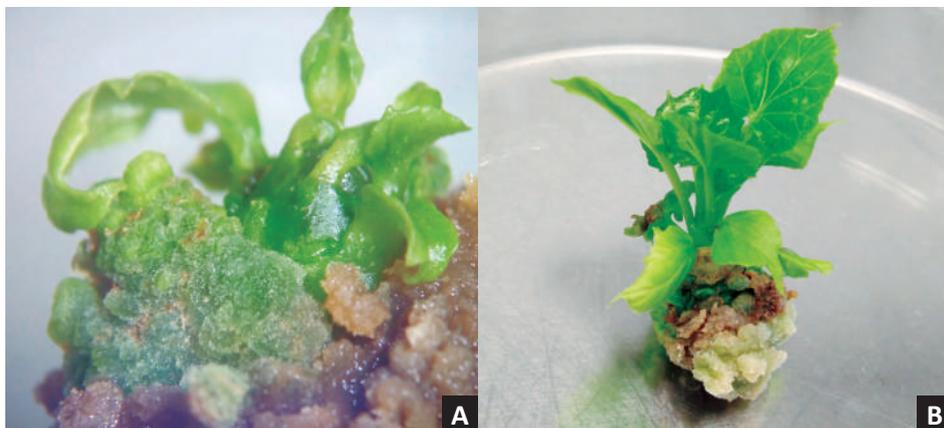


Figura 9. Brotes adventicios en explante de hipocotilo de *J. curcas*. (A) Brote en desarrollo a los 45 días de inducción; (B) Brote desarrollado a los 90 días de cultivo.

## Elongación de brotes adventicios

### Antecedentes

La asociación de citocininas con auxinas casi siempre genera respuestas organogénicas a los diversos explantes expuestos en el medio basal (George, 2008a). Las respuestas que se pueden generar depende de las concentraciones de cada una, por ejemplo, cuando se agregan concentraciones similares de cada una, la tendencia es desarrollo de tejido calloso; por otro lado, la adición de altas de concentraciones de auxinas y bajas concentraciones de citocininas genera raíces o embriogénesis somática, contrario a bajas concentraciones de auxina y alta de citocininas, tenderá a regenerar brotes adventicios o proliferación de yemas. La relación auxina citocinina en *J. curcas* se aprecia en el trabajo de Nogueira *et al.* (2011), indicando que el uso de altas concentraciones de citocininas (BAP) en combinación con bajas de auxinas (AIA) producen un mayor número de brotes; el desarrollo y la elongación de los brotes se inicia al unirse este tipo de RCV con un receptor, localizado en la cara externa de la membrana plasmática, posteriormente genera una serie de eventos que determinan la secreción de protones por la célula, dando como resultado la acidificación, que genera la activación de proteínas que rompen

los enlaces cruzados entre las moléculas de celulosa y permiten la elongación cuando aumenta la presión de turgencia (Gaspar *et al.*, 1996).

## Metodología

Los brotes adventicios de 45 días de edad fueron utilizados en los experimentos planteados para la elongación. El diseño factorial utilizado para el planteamiento de los tratamientos fue  $3^3$ . Considerando como factores los RCV: BAP, AIA y Sad, cada uno se evaluó a tres concentraciones. En total se establecieron un total de 27 tratamientos con tres réplicas.

En todos los tratamientos se utilizó 4.4 g/L del medio basal (Murashige & Skoog, 1962), 30 g/L de sacarosa y 7.5 g/L de agar, el pH se ajustó a 5.8. Todos los tratamientos fueron esterilizados a 120 °C por 20 minutos.

Los brotes fueron incubados por 45 días en condiciones de fotoperíodo a 16/8 horas (luz/oscuridad), la luz fue proporcionada por lámparas blancas led con una intensidad lumínica de  $60 \mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$  a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , 60% de humedad relativa.

La unidad experimental fue un brote de 0.5 cm de longitud inicial, que transcurridos 45 días se volvieron a medir para tener la longitud final, posteriormente se realizó una resta del crecimiento final menos crecimiento inicial y el resultado fue considerado el crecimiento total a los 45 días de cultivo. También se evaluó el número de hojas y brotes adicionales formados. Los datos se analizaron con el software estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

## Resultados

A los 45 días de cultivo, los brotes cultivados en el tratamiento T1 (4.44  $\mu\text{M}$  de BAP, 1.0  $\mu\text{M}$  de AIA y 543  $\mu\text{M}$  de Sad) elongaron hasta  $1.67 \pm 0.76$  cm de longitud; en cuanto al número de hojas se encontraron diferencias estadísticas significativas, sin embargo, el tratamiento T1 fue el que generó hasta  $18.00 \pm 2.65$  hojas en promedio. Aunque los tratamientos fueron evaluados con la finalidad de inducir elongación, se observó que algunos tratamientos desarrollaron brotes laterales, por ejemplo el T2 formó  $7.67 \pm 1.53$  brotes en promedio (Figura 10).

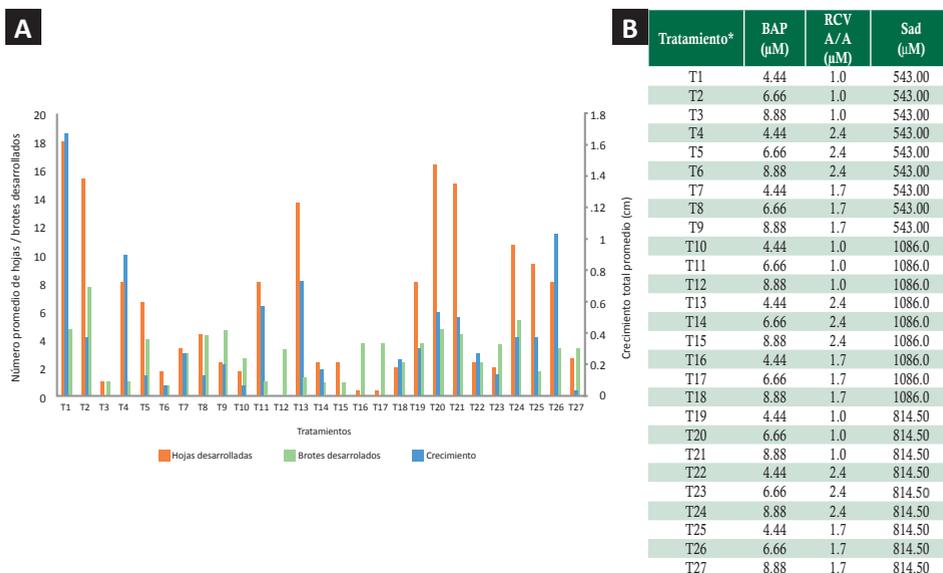


Figura 10. (A) Desarrollo de brotes adventicios de *J. curcas*: crecimiento del tallo en cm, número de hojas y número de brotes. BAP: Bencilaminopurina, AIA: Ácido indolacético, Sad: Sulfato de Adenina;\*todos los tratamientos se establecieron en medio basal MS al 100% de su fuerza iónica, (B) Cuadro con los tratamientos realizados.

Se pudo observar que el Sad tiene efecto en la inducción y en la elongación de los brotes adventicios *in vitro* de *J. curcas*, esto se debe posiblemente a la interacción del Sad con las citocininas que ayuda al crecimiento y desarrollo de los brotes en cultivo *in vitro* (Nwankwo & Krikorian, 1986); esto se corrobora con los trabajos realizados por (Shrivastava & Banerjee, 2008), en el cual, la inducción y desarrollo de los brotes de *J. curcas* la obtuvieron combinando Sad con BAP, ácido 3-indolbutirico (IBA) y otros aditivos como la glutamina, L-arginina y ácido cítrico.

### Enraizamiento de plántulas obtenidas *in vitro* de *J. curcas*

#### Antecedentes

El enraizamiento es una de las etapas de la micropropagación, importante para el buen desarrollo de las plántulas obtenidas *in vitro* y el buen desarrollo de las mismas en campo. Dewir *et al.* (2016) mencionan que las

mejores condiciones para el enraizamiento y desarrollo de brotes ayudan a obtener un sistema de micropropagación exitoso, esto quiere decir que la obtención de un buen número de raíces sanas permite que las plántulas se establezcan en el suelo y promueven el crecimiento y desarrollo normal durante el proceso de aclimatación. Algunos reportes sugieren el uso de IBA para inducir la organogénesis de raíces (Liu *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2016), sin embargo, la adición de compuestos orgánicos como el phloroglucinol (1,3,5-trihidroxibenceno), que es un producto de degradación de la floridicina y tiene propiedades de promotor de crecimiento (da Silva, Dobránszki & Ross, 2013), podría ayudar a mejorar la etapa de enraizamiento en *J. curcas* ya que Daud *et al.* (2013) mencionan que el phloroglucinol promueve fuertemente la inducción de raíces y que la transferencia de plántulas de *J. curcas* al suelo permite la supervivencia de las mismas, sugiriendo que el phloroglucinol ayuda al posterior crecimiento de los brotes.

## Metodología

Para el enraizamiento se utilizaron brotes de aproximadamente 2 cm de longitud; el diseño experimental fue un arreglo factorial 3<sup>2</sup>, siendo los factores la concentración iónica del medio basal MS y la auxina IBA; el diseño experimental se realizó con y sin floroglucinol. Las variables a medir fueron el porcentaje de raíces formadas, número y longitud de raíces. Los datos se analizaron con el software estadístico Statgraphics® Centurión XVI.

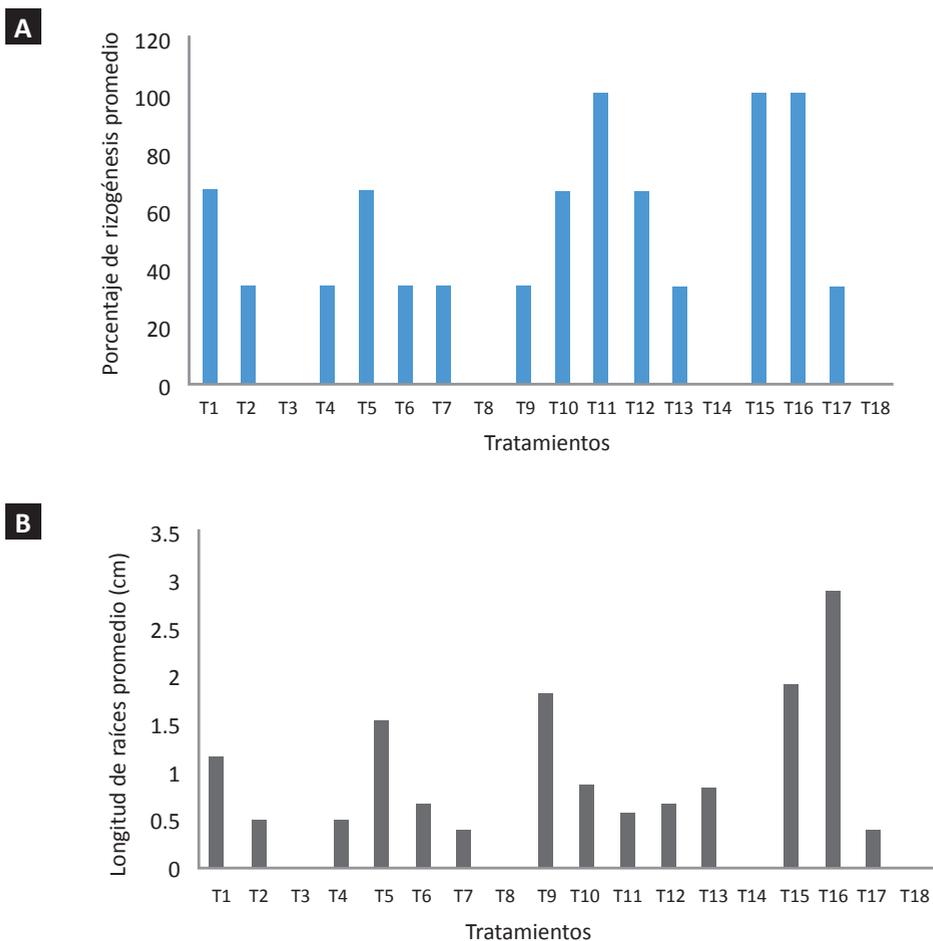
En todos los tratamientos se utilizó 2.2 g/L del medio MS (Murashige & Skoog, 1962), 20 g/L de sacarosa y 7.5 g/L de agar, el pH se ajustó a 5.8. Todos los tratamientos fueron esterilizados a 120 °C por 20 minutos.

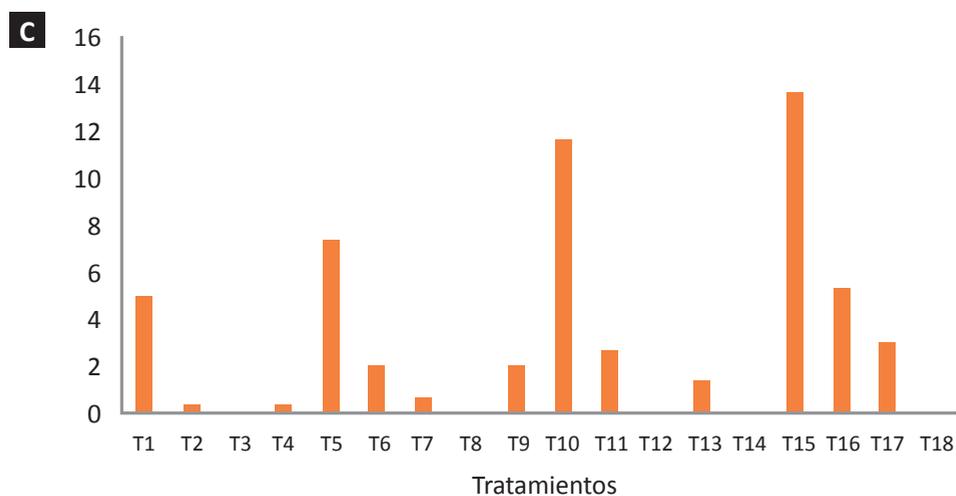
Los brotes fueron incubados por 45 días en condiciones de fotoperíodo a 16/8 horas (luz/oscuridad), la luz fue proporcionada por lámparas blancas led con una intensidad lumínica de 60  $\mu\text{mol}^{-2}\text{s}^{-1}$  a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , 60% de humedad relativa.

## Resultados

Se obtuvo hasta un 100% de raíces *in vitro* en plántulas de *J. curcas* para tratamientos que llevaron sólo la adición de AIB como se puede observar en la

Figura 11; los tratamientos que tuvieron mejor respuesta a la organogénesis de raíces fueron el 11, 15 y el 16 en medio MS al 25% + 14.7  $\mu\text{M}$  de IBA, MS al 25% + 20.7  $\mu\text{M}$  de IBA y MS al 100%+14.7  $\mu\text{M}$  de IBA , respectivamente (Figura 11A); por otro lado, en la Figura 11B se puede apreciar que la longitud de raíces promedio mayor fue en el tratamiento 16 con  $2.86\pm 1.87$  cm de longitud, sin embargo, el tratamiento que tuvo un mayor número de morfogénesis de raíces fue el tratamiento 15 (MS al 25% + 20.7  $\mu\text{M}$  de IBA) con un promedio de  $13.6\pm 15.0$  raíces (Figura 11C) y una longitud de  $1.90\pm 0.81$  cm.





**D**

Tratamiento	IBA $\mu\text{M}$ + 2.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Phl	MS g/L	Tratamiento	IBA $\mu\text{M}$	MS g/L
1	14.7	1.32	10	14.7	1.32
2	17.7	1.32	11	17.7	1.32
3	20.7	1.32	12	20.7	1.32
4	14.7	2.2	13	14.7	2.2
5	17.7	2.2	14	17.7	2.2
6	20.7	2.2	15	20.7	2.2
7	14.7	4.4	16	14.7	4.4
8	17.7	4.4	17	17.7	4.4
9	20.7	4.4	18	20.7	4.4

Figura 11. Respuesta en la inducción de raíces en plántulas *in vitro* de *J. curcas* (A) Porcentaje de rizogénesis promedio, (B) Longitud de raíces promedio, (C) Número de raíces promedio. IBA: ácido indolbutírico, Phl: Phloroglucinol, MS: medio basal Murashige & Skoog (1962) y (D) Cuadro con los tratamientos realizados.

Daud *et al.* (2013) mencionan que el phloroglucinol promueve fuertemente la inducción de raíces, sin embargo, diferentes concentraciones de IBA + phloroglucinol en un medio MS no arrojó buenos resultados.

La morfología de la respuesta organogénica adventicia obtenida se describe en la Figura 12. Los protocolos de inducción de brotes para diferentes variedades, así como la elongación y enraizamiento se describen en la Figura 13.

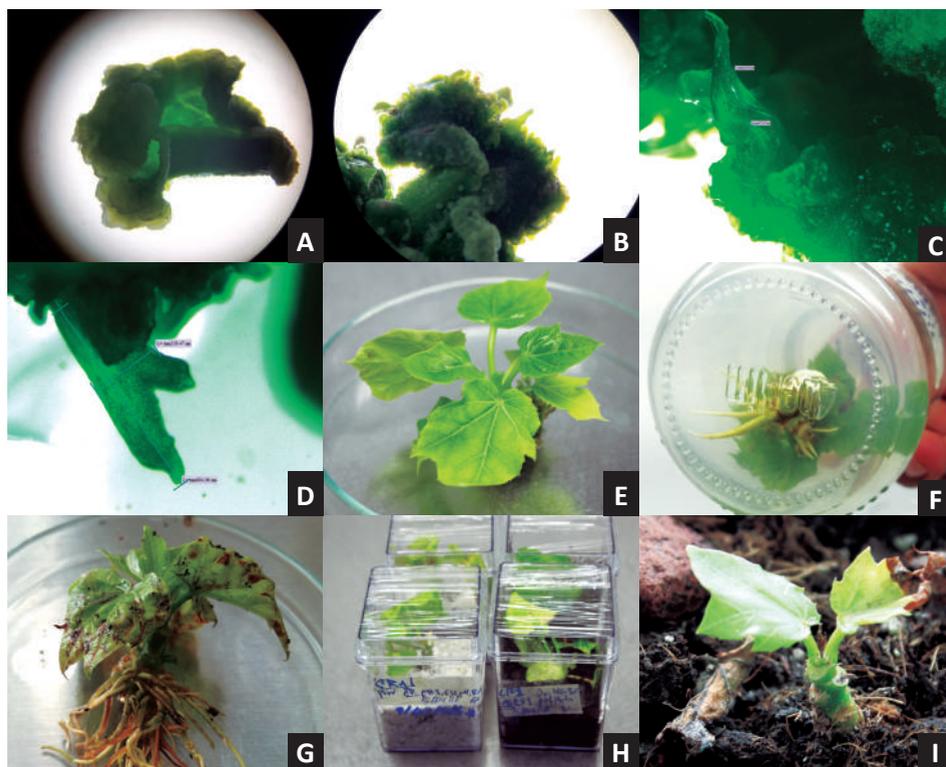


Figura 12. Organogénesis adventicia *in vitro* de *J. curcas*. (A) Callo blanco friable formado en los bordes de explante de hoja, a los 15 días de cultivo; (B) Brotes adventicios a partir de explante de hoja, en formación, a los 30 días de cultivo; (C) A los 45 días de cultivo; (D) A los 60 días de cultivo; (E) Brote elongado; (F) Plántula con raíces adventicias a los 45 días de cultivo en medio de enraizamiento; (G) Plántula con raíces, a los 60 días de enraizamiento; (H e I) Plántulas en aclimatación.

## Protocolos

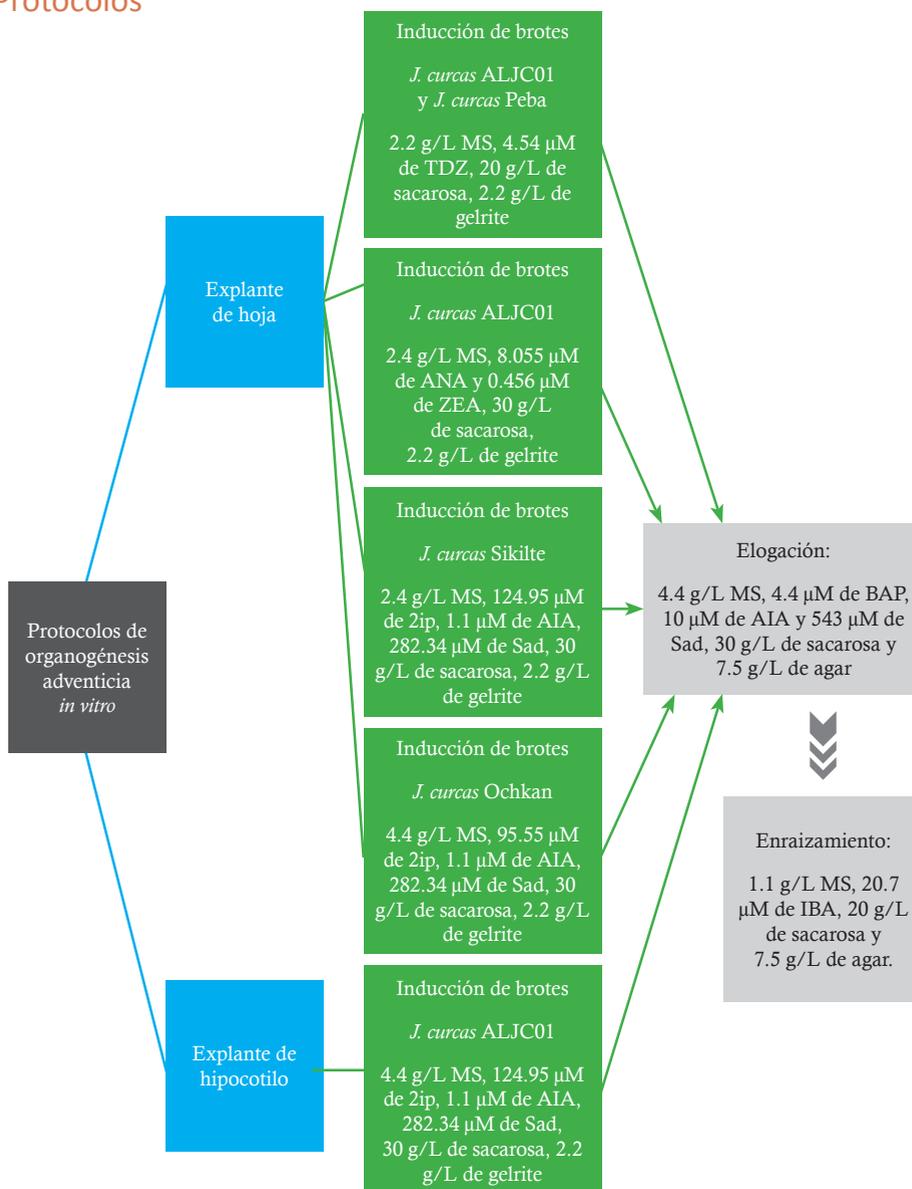


Figura 13. Protocolos de micropropagación por organogénesis adventicia en *J. curcas*.

## Conclusiones y perspectivas

Se estableció el protocolo de organogénesis adventicia a partir de explante de hoja de *J. curcas* en parentales e híbridos del proyecto 2011-163502 Sagarpa-Conacyt, obteniéndose las bases para la micropropagación de esta especie de interés agroindustrial, con fines de propagación comercial, pero principalmente con fines de mejoramiento genético. Es posible someter a los cultivos *in vitro* a condiciones de estrés biótico o abiótico para obtener materiales con tolerancia a estrés; también es posible adaptar el protocolo para evaluar la propagación en biorreactores para incrementar la eficiencia y hacer más redituable el cultivo *in vitro*.

## Bibliografía citada

- Alí, S., Afzal, A. & Usman, M. 2015. "Micropropagation of *Jatropha curcas* (L.)". *International Journal of Biology and Biotechnology*, 12(1), 29–38.
- Baran Jha, T., Mukherjee, P. & Manjari Datta, M. 2007. "Somatic embryogenesis in *Jatropha curcas* L., an important biofuel plant". *Plant Biotechnology Reports*, 1, 135–140. <https://doi.org/10.1007/s11816-007-0027-2>.
- Barciszewski, J., Massino, F. & Clark, B.F.C. 2007. "Kinetin — A multiactive molecule". *International Journal of Biological Macromolecules Structure, Function and Interactions*, 40, 182–192. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2006.06.024>.
- Bhojwani, S.S. & Dantu, P.K. 2013. "Plant tissue culture: An introductory text". In: *Plant Tissue Culture: An Introductory Text* (pp. 245–274). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1026-9>.
- da Silva, J.A.T., Dobránszki, J., Ross, S. 2013. "Phloroglucinol in plant tissue culture". In *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 49(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11627-013-9491-2>.
- Daud, N., Faizal, A. & Geelen, D. 2013. "Adventitious rooting of *Jatropha curcas* L. is stimulated by phloroglucinol and by red LED light". In *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 49(2), 183–190. <https://doi.org/10.1007/s11627-012-9486-4>.
- Davies, P.J. 2004. *Plant Hormones* (KLUWER ACA). Ithaca, NY, U.S.A.: Kluwer Academic Publishers.
- De Aquino, N.F., Ajala, M.C., Dranski, J.A., Ignácio, V.L., Malavasi, M.D.M., Malavasi, U.C. 2009. "Morfometria de sementes de *Jatropha curcas* L. em função da procedência". *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 8(2), 142–145.
- Deore, A. C. & Johnson, T.S. 2008. "High-frequency plant regeneration from leaf-disc cultures of *Jatropha curcas* L.: an important biodiesel plant". *Plant Biotechnology Reports*, 2, 7–11. <https://doi.org/10.1007/s11816-008-0042-y>.
- Dewir, Y.H., Murthy, H.N., Ammar, M.H., Alghamdi, S.S., Al-Suhaibani, N.A., Alsadon, A.A., Paek, K.Y. 2016. "In vitro rooting of leguminous plants: Difficulties, alternatives, and strategies for improvement". *Horticulture Environment and Biotechnology*, 57(4), 311–322. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-0060-6>.
- Divakara, B.N., Upadhyaya, H.D., Wani, S.P. & Gowda, C.L.L. 2010. "Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review". *Applied Energy*, 87(3), 732–742. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.013>.

- Gangwar, M., Pradesh, H., Sharma, S., Sood, H. 2016. "Indirect Shoot Organogenesis in *Jatropha curcas* (L.) for *in vitro* Propagation". *PARIPEX-Indian Journal of Research*, 4(12), 56–58.
- Gaspar, T., Kevers, C., Penel, C., Greppin, H., Reid, D. M., Thorpe, T.A. 1996. "Plant hormones and plant growth regulators in plant tissue culture". *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 32(4), 272–289. <https://doi.org/10.1007/BF02822700>.
- George, E.F. 2008a. "Plant Growth Regulators II : Cytokinins , their Analogues and Antagonists". In: *Plant Propagation by Tissue Culture* (3rd Editio, pp. 205–226). Springer.
- George, E.F. 2008b. "The Components of Plant Tissue Culture Media II : Organic Additions, Osmotic and pH Effects, and Support Systems". In: *Plant Propagation by Tissue Culture* (3rd Editio, pp. 115–173). Springer.
- Hussain, T., Shobha, P., Pal, B., Dwivedi, S., Shekar, M.R., Sureshbabu, K., Sankaranarayanan, R. 2006. "tRNA deacylase-like domain in threonyl-tRNA synthetase from archaea". *The EMBO Journal*, 25(17), 4152–4162. <https://doi.org/10.1038/sj.emboj.7601278>.
- Hussey, G. 1978. "The application of tissue culture to the vegetative propagation of plants". *Science Progress*, 65(258), 185–208.
- Jones, M.P.A., Cao, J., O'Brien, R., Murch, S. J., Saxena, P.K. 2007. "The mode of action of thiadiazuron: Auxins, indoleamines, and ion channels in the regeneration of *Echinacea purpurea* L." *Plant Cell Reports*, 26(9), 1481–1490. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0357-0>.
- Jyoti, S., Amla, B. & Ali, D.J. 2000. "An expeditious method for regeneration of somatic embryos in *Jatropha curcas* L." *International Society of Plant Morphologists*, 50, 239–242.
- Kaewpoo, M. & Te-chato, S. 2010. "Study on ploidy level of micropropagated *Jatropha curcas* L. via flow cytometry". *Journal of Agricultural Technology*, 6(2), 391–400.
- Kalimuthu, K., Paulsamy, S., Senthilkumar, R., Sathya, M. 2007. "In vitro Propagation of the Biodiesel Plant *Jatropha curcas* L." *Plant Tissue Culture and Biotechnology*, 17(2), 137–147.
- Khan, M.K., Misra, P., Sharma, T., Shukla, P.K., Ramteke, P.W. 2014. "Effect of adenine sulphate on *in vitro* mass propagation of *Stevia rebaudiana* Bertoni". *Journal of Medicinal Plants Research*, 8(13), 543–549. <https://doi.org/10.5897/JMPR2013.5217>.
- Kumar, N., Anand, V.K.G. & Reddy, M.P. 2011. "Plant regeneration of non-toxic *Jatropha curcas*-impacts of plant growth regulators, source and type of explants". *Journal Plant Biochemistry and Biotechnology*, 20(1), 125–133. <https://doi.org/10.1007/s13562-011-0037-6>.

- Kumar, N. & Reddy, M.P. 2010. "Plant regeneration through the direct induction of shoot buds from petiole explants of *Jatropha curcas*: a biofuel plant". *Annals of Applied Biology*, 156(3), 367–375. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00394.x>.
- Liu, Y., Lu, J., Zhu, H., Li, L., Shi, Y., Yin, X. 2016. "Efficient culture protocol for plant regeneration from cotyledonary petiole explants of *Jatropha curcas* L." *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 30(5), 907–914. <https://doi.org/10.1080/13102818.2016.1199971>.
- Liu, Y., Tong, X., Hui, W., Liu, T., Chen, X., Li, J., Liu, Z. 2015. "Efficient culture protocol for plant regeneration from petiole explants of physiologically mature trees of *Jatropha curcas* L." *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 29(3), 479–488. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1013308>.
- López Mendoza, J.C. 2015. *Caracterización de 60 accesiones de piñón (Jatropha curcas L.) Colectados en la provincia de manabí y loja*. Universidad Técnica de Manabí.
- Maharana, S., Mahato, V., Behera, M., Mishra, R., Panigrahi, J. 2012. "In vitro regeneration from node and leaf explants of *Jatropha curcas* L. and evaluation of genetic fidelity through RAPD markers". *Indian Journal of Biotechnology*, 11(July), 280–287. Retrieved from <http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/14567>.
- Mukherjee, P., Varshney, A., Johnson, T.S. & Jha, T.B. 2011. "*Jatropha curcas*: A review on biotechnological status and challenges". *Plant Biotechnology Reports*, 5(3), 197–215. <https://doi.org/10.1007/s11816-011-0175-2>.
- Murashige, T. 1974. "Plant propagation through tissue cultures". *Annual Reviews Plant Physiology*, 25, 135–166.
- Murashige, T. & Skoog, F. 1962. "A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures". *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473–497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
- Nogueira, A., Soares, A., Ibrahim, A., Campos, F. 2011. "Analysis of organogenic competence of cotyledons of *Jatropha curcas* and their *in vitro* histological behavior". *African Journal of Biotechnology*, 10(54), 11249–11258. <https://doi.org/10.4314/ajb.v10i54>.
- Nwankwo, B.A. & Krikorian, A.D. 1986. "Morpho-genetic potential of embryo and seedling derived callus of *Elaeis guineensis* Jacq. var. *pisifera* Becc." *Annals Botany*, 51(1), 65–76.
- Shan, X., Li, D. & Qu, R. 2000. "Thidiazuron promotes *in vitro* regeneration of wheat and barley". *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 36(June), 207–210.

- Shrivastava, S. & Banerjee, M. 2008. “*In vitro* clonal propagation of physic nut (*Jatropha curcas* L.): Influence of additives”. *International Journal of Integrative Biology*, 3(1), 73–79.
- Singh, G. & Shetty, S. 2012. “Evaluation of *in vitro* rooting efficiency in the biodiesel plant, *Jatropha curcas*”. *Biotechnol. Bioinf. Bioeng*, 2(1), 591–596.
- Sugiyama, M. 1999. “Organogenesis *in vitro*”. *Current Opinion in Plant Biology*, 2(1), 61–64. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(99\)80012-0](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(99)80012-0).
- Sujatha, M., Makkar, H. & Becker, K. 2005. “Shoot bud proliferation from axillary nodes and leaf sections of non-toxic *Jatropha curcas* L.” *Plant Growth Regulation*, 47, 83–90. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-0859-0>.
- Toral, O.C., Iglesias, J.M., Montes de Oca, S., Sotolongo, J.A., Garcia, S. & Torsti, M. 2008. “*Jatropha curcas* L., una especie arborea con potencial energético en Cuba”. *Pastos y Forrajes*, 31(3), 191–207.
- Varshney, A. & Johnson, T.S. 2010. “Efficient plant regeneration from immature embryo cultures of *Jatropha curcas*, a biodiesel plant”. *Plant Biotechnology Reports*, 4, 139–148. <https://doi.org/10.1007/s11816-010-0129-0>.
- Vasil, V. & Hildebrandt, A.C. 1965. “Differentiation of tobacco plants from single, isolated cells in microcultures”. *Science*, 150(3698), 889–892. <https://doi.org/10.1126/science.150.3698.889>.
- Verma, C.K. & Verma, S.K. 2015. “Interaction effect of explants types and phytohormones on tissue culture of *Jatropha curcas* seed embryo”. *The Bioscan, An International Quarterly Journal of Life Sciences*, 10(2), 563–566.
- Visser, C., Qureshi, J.A., Gill, R., Saxena, P.K. 1992. “Morphoregulatory Role of Thidiazuron’.” *Plant Physiology*, 99, 1704–1707.
- Zažímalová, E., Petrášek, J. & Morris, D.A. 2003. “The dynamics of auxin transport in tobacco cells”. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 207–224.



## Capítulo 9

### Roadmapping para el cultivo *in vitro* de *Jatropha curcas*: una visión para 2025

Gilbert José Herrera Cool<sup>1</sup>, Javier Rivera Ramírez<sup>1</sup>, Ariel Vázquez Elorza<sup>1</sup>, Guadalupe López Puc<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C., Sede Sureste. Parque Científico y Tecnológico de Yucatán, tablaje catastral 31264 km 5.5 carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto. CP 97302. Tel. 01 999 9202671.

Autor por correspondencia: glopez@ciatej.mx

#### Resumen

*Jatropha curcas* sigue siendo un cultivo energético prometedor para el futuro, debido al avance científico y tecnológico que ha alcanzado, sin embargo, aún falta obtener métodos eficientes en micropropagación y la obtención de variedades elites, así como el vínculo para la obtención de empresas de base tecnológicas para su propagación en campo, invernadero o *in vitro*. La visión para generar una empresa basada en el cultivo *in vitro* de *Jatropha curcas* ayudará a solucionar uno de los problemas para la producción a gran escala de plantas elite y mejoradas genéticamente; para la creación de este tipo de empresas es necesario utilizar herramientas como el roadmapping o mapas de de-

sarrollo tecnológicos, que contempla varios factores como el mercado, Proyectos de ID+i, Producto, Tecnología entre otros, para tener una visión proactiva del futuro y así generar un camino cercano a la realidad del desarrollo, crecimiento y éxito de una empresa.

## Palabras clave

Innovación y Desarrollo, mapa de desarrollo tecnológico, prospección, *Jatropha curcas*

## Introducción

*Jatropha curcas* es una planta perteneciente a la familia de las Euphorbeaceas, considerada un cultivo energético de segunda generación, a la cual se le puede extraer en sus semillas hasta 40% de aceite y transformarlo en biodiésel por transesterificación. Para un aprovechamiento integral hay interés en el uso de los residuos (seedcake o torta de extracción), uso de la biomasa para hacer pellets o briquetas, incluso algunas variedades no tóxicas, se pueden utilizar como alimento para ganado.

Actualmente, el cambio climático generado por los gases de efecto invernadero es uno de los problemas que afectan mundialmente, debido a esto problema se plantea el uso de energías renovables para mitigar el cambio, algunos países han estado sustituyendo el uso de combustibles derivados del petróleo por biocombustibles, logrando con ello una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, generada por fuentes móviles (Cortés-Marín *et al.*, 2011).

La necesidad de los cultivos energéticos en tiempos actuales y a futuro son de gran importancia, debido a que los problemas asociados con el cambio climático van en aumento, de ahí que uno de los cultivos energéticos a futuro

podría ser *J. curcas*, sin embargo, la falta de estudio y problemas asociados con el monocultivo ha evitado la obtención y generación de variedades con alto rendimiento y alto contenido de aceite en sus semillas, para solucionar este problema, el mejoramiento genético podría ser la herramienta clave para obtener estas variedades y así retomar nuevamente el curso de la obtención para biodiésel por medio de este cultivo.

Los roadmapping o mapas de desarrollo tecnológico ayudan a tener una visión del futuro para generar nuevas industrias, para ello el presente trabajo se enfoca en la creación de una nueva industria agroenergética que implica una cadena productiva que impactará en forma más directa a los diferentes sectores de la economía, especialmente en lo referente a la generación de empleo y desarrollo agrícola y agroindustrial (Marín *et al.*, 2009).

La generación de una empresa de base tecnológica con el apoyo del roamping en cultivo *in vitro* de *J. curcas* podría ayudar a aplicar técnicas y tecnología de punta para el mejoramiento genético *in vitro*; por otro lado, una vez obtenido protocolos de micropropagación *in vitro* y haber obtenido plantas elites y mejoradas, es necesario la búsqueda de mercados nacionales, latinoamericanos y mundiales para que ayude indudablemente a solucionar al menos uno de los problemas relacionados con la falta de bioenergías y el cambio climático.

## Roadmapping: planificando el futuro

El roadmapping es una herramienta ampliamente utilizada para unir acciones de corto plazo con acciones a largo plazo (Siebelink *et al.*, 2016). La planificación de la tecnología es importante por muchas razones, en el ámbito mundial las empresas se enfrentan a muchos problemas de competencia y en este sentido el roadmapping tecnológico es una forma de planificación de la tecnología que puede ayudar a lidiar con este ambiente cada vez más competitivo. A pesar de que ha sido utilizado por algunas empresas e industrias, el enfoque ha estado siempre en roadmap de la tecnología como un producto y no como un proceso (García *et al.*, 1997).

Existen diversos tipos de roadmapping para visionar un futuro proactivo y que pueda generar un panorama lo más cercano a la realidad; sin embargo el roadmapping de producto o servicio enfocado a una empresa de base tecnológica de cultivo *in vitro* de *J. curcas*, ayudaría a generar un panorama importante del cultivo para los próximos años.

Los roadmapping han tenido aplicación en diferentes áreas industriales (eléctrica, computación, química, política, construcción, etcétera). Phaal *et al.* (2004), realizaron una investigación documental sobre las aplicaciones de los roadmapping de 1995 al 2005, considerando dos perspectivas en el proceso: el desarrollo del avance tecnológico y el desarrollo multiorganizacional.

A pesar del desarrollo y la utilidad de los roadmapping, hoy día no se encuentra con una metodología que ayude su aplicación dentro de las organizaciones. Por lo tanto, en un entorno de constantes cambios tecnológicos, una metodología para construir un roadmapping aumenta la aplicación de esta herramienta y ayuda a las organizaciones a alcanzar sus objetivos (da Silveira *et al.*, 2018).

En el presente documento se presenta un roadmapping de planeación estratégica, buscando evaluar diferentes oportunidades o amenazas para la creación de una empresa de cultivo *in vitro* de *J. curcas*, este tipo de roadmap desarrolla una visión del futuro del negocio, en términos de mercado, proyectos de ID+i, Producto, Tecnología y Recursos (Phaal *et al.*, 2004).

## Mercados potenciales

Actualmente *J. curcas* es una especie que ha sido objeto de investigación en diversas regiones del mundo como Asia, Europa y Centroamérica. Esta especie sigue siendo considerada una fuerte candidata para la producción de biocombustibles de segunda generación, a pesar de los recientes fracasos a gran escala en todo el mundo por lograr rendimientos altos y consistentes de semillas en el campo (Navarro-Pineda *et al.*, 2016).

Una de las alternativas prometedoras para realizar negocios es, el mejoramiento genético de la especie, que en condiciones convencionales no es fácil

realizar, debido a los cruzamientos que se da en ciclos de floración y por la carga de horas laborales para realizar el trabajo en campo.

Actualmente, el mercado de los biocombustibles a partir de la extracción de aceite de semilla de *J. curcas* esta en Europa, Norteamérica y países emergentes como Brasil, India y China, que han desarrollado interacciones gubernamentales e institucionales para impulsar la producción de biocombustibles y así satisfacer la demanda de energía (Rucoba-García *et al.*, 2013).

Para poder tener éxito en la visión proactiva de la empresa de base tecnológica es necesario señalar la cadena de suministro (Figura 1), definido como un conjunto de tres o más entidades (organizaciones o individuos) directamente involucradas en los flujos ascendentes y descendentes de productos, servicios, finanzas y/o información de una fuente a un cliente (Mentzer *et al.*, 2001). Aunque la cadena de suministro lleva un número de componentes de negocio, la propia cadena se ve como una sola entidad. En su nivel más alto, una cadena de suministro está compuesta de dos procesos integrados a nivel básico: 1. El proceso de planificación de la producción y control de inventario; y 2. El proceso de distribución y logística (Beamon, 1998).

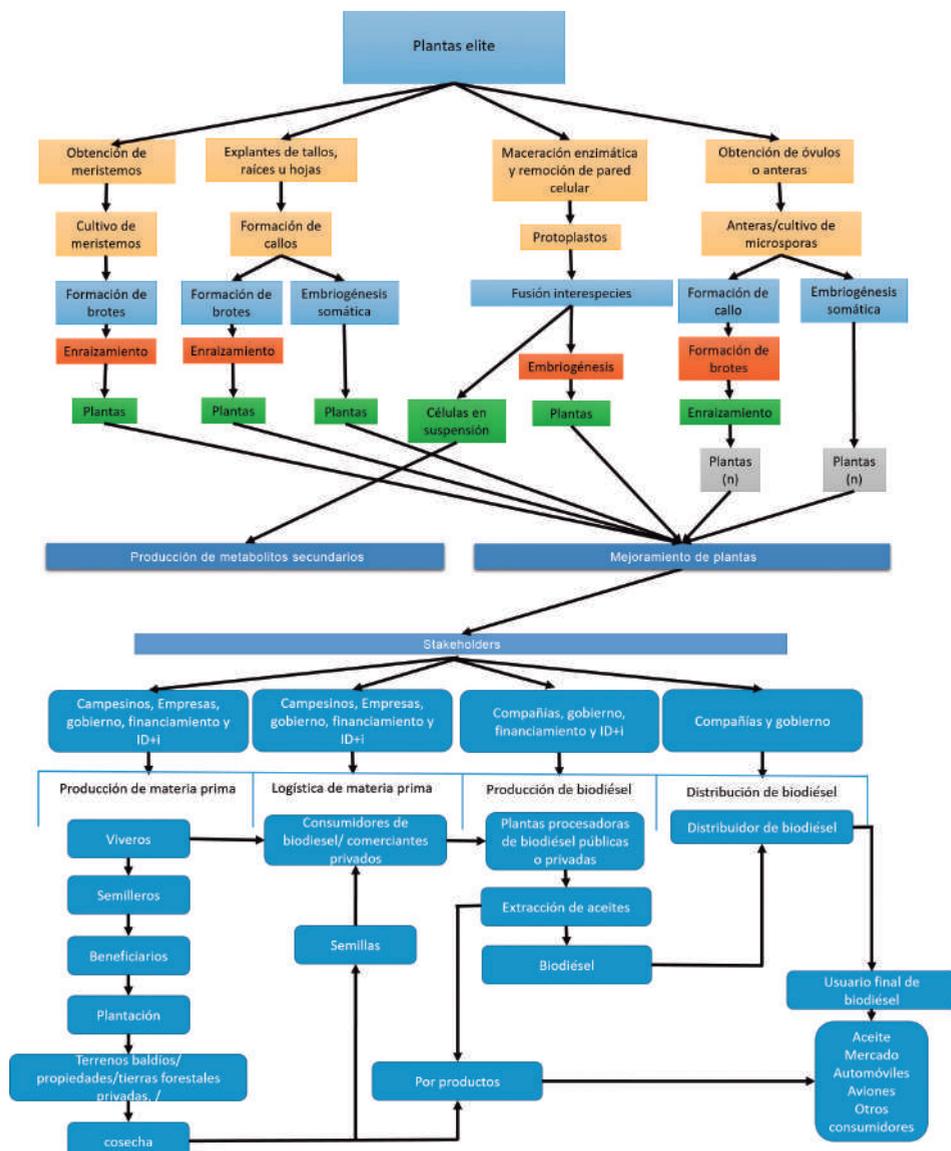


Figura 1. Marco conceptual de la cadena de suministro de biodiésel a partir de *Jatropha curcas*. Fuente: (Goswami & Hazarika, 2017; Moniruzzaman Yaakob & Khatun, 2016).

## Aspectos regulatorios de la biotecnología en México

La biotecnología es definida por El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) en la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro, como cualquier aplicación tecnológica que utilice sistemas biológicos, organismos vivos o sus derivados y que tenga como finalidad hacer o modificar productos o procesos para un uso específico (Naciones Unidas, 1992).

La biotecnología está dividida en biotecnología tradicional y biotecnología moderna, el impacto de la ingeniería genética que permite elaborar productos transgénicos que son claves en el tratamiento de enfermedades, aún se encuentra en etapa de prueba y no se conocen aún sus efectos secundarios en la salud (Madhok & Osegowitsch, 2016); pero son los productos de la segunda generación las llamadas “plantas transgénicas”, las que están sujetas actualmente a un intenso debate, en particular en lo que se refiere a su impacto en el medio ambiente, su efecto en los sistemas de producción y en general en la economía agrícola (Rubiano Sandoval, 2016).

En México la industria de la biotecnología es emergente, en la actualidad sólo existen alrededor de 406 empresas que utilizan biotecnología moderna y menos del 20% de ellas tienen como actividad principal la generación de bienes, servicios o investigación y desarrollo principalmente mediante biotecnología, sin embargo, el plan actual de desarrollo 2013-2018 proponen el diseño de agendas para la competitividad de sectores económicos de alto valor agregado y contenido tecnológico, así como de sectores precursores como la nanotecnología y la biotecnología, dado que estos sectores son claves por su fuerte incidencia sobre diversas actividades productivas y porque sus aplicaciones serían determinantes para el desarrollo competitivo del país (Castro Aranda *et al.*, 2016).

### El Protocolo de Cartagena

El Protocolo de Cartagena sobre Seguridad de la Biotecnología del Convenio sobre Diversidad Biológica es un tratado internacional que administra los movimientos de un país hacia otro de organismos vivos modificados (OVM) que resultan de la aplicación de la tecnología moderna (Moure Pino, 2013),

el cual fue adoptado el 29 de enero de 2000 como un acuerdo complementario al Convenio sobre Diversidad Biológica. México ratificó el Protocolo de Cartagena por acuerdo del Senado de la República en 2002, y entró en vigor el 11 de septiembre de 2003. Este Protocolo trata sobre la “Gestión de la biotecnología y distribución de los beneficios” que en su ítem 3 recomienda la elaboración de un protocolo que contribuya a garantizar un nivel adecuado de protección en la esfera de la transferencia, manipulación y utilización seguras de los Organismos Vivos Modificados (OVM) resultantes de la biotecnología moderna que puedan tener efectos adversos para la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica, tomando en cuenta los riesgos para la salud humana (Eggers & Mackenzie, 2000).

La adopción del protocolo de Cartagena apoya los aspectos regulatorios en México en cuestión de biotecnología, ya que permite garantizar que no habrá conflictos con la utilización de organismos vivos y organismos genéticamente modificados (OGM) con respecto de los aspectos regulatorios de otros países. Una de las ventajas del proceso *in vitro* con *Jatropha* es que al mejorarla genéticamente no sería una amenaza ambiental, sin embargo, el uso de la torta de extracción para alimentación de animales de granja, generaría la necesidad de apearse a las leyes mexicanas y al Protocolo de Cartagena en materia de OGM.

### Proyectos de investigación

Para desarrollar proyectos de investigación y desarrollo más innovación (ID+i) es importante conocer el contexto del producto o proceso que se desea innovar y tener un pensamiento proactivo. En diversos estudios se ha demostrado que “los contextos socioculturales operan como una restricción fundamental en la consolidación de equipos y sistemas de investigación y desarrollo exitosos en la comunidad científica internacional” (Greif, 2013).

Por otro lado, el estudio de la innovación ha evolucionado en las últimas cinco décadas. Las disciplinas involucradas se han diversificado, así como las investigaciones sobre el tema. Los estudios de la innovación tienen entre sus propósitos impulsar el desarrollo de medidas para enfrentar el problema de la inequitativa distribución de la riqueza a través del crecimiento económico.

Sin embargo, a pesar del crecimiento de los estudios sobre innovación el impacto que han tenido en la generación de beneficios sociales, particularmente en el ámbito de los países en desarrollo y en las poblaciones más desfavorecidas, ha sido sumamente limitado (Hernández & Pérez, 2016).

La innovación como un fenómeno social y económico se ha reconocido como un campo de estudio necesario y valioso, que requiere (a pesar de sus avances) de programas de investigación sistemática y confiables basados en dos aspectos: la innovación en sí misma y los efectos de la innovación (Fagerberg *et al.*, 2013).

## La investigación y desarrollo en cultivo *in vitro* de *Jatropha curcas*

### La biotecnología y el cultivo de tejidos vegetales *in vitro*

La aplicación de la biotecnología incluye una serie de procesos industriales que involucran organismos vivos o partes de ellos. La interacción del genotipo con los demás factores de manipulación industrial, aunque controlables, provoca que el sistema sea estocástico o no determinista, caracterizado por acciones predecibles y con elementos aleatorios. La producción masiva de plantas *in vitro* es un ejemplo de este tipo de industrias biotecnológicas, en el que se cultivan plantas seleccionadas bajo condiciones controladas de incubación y en medios nutritivos. Durante el proceso se producen pérdidas por contaminación o muerte del material y reprocesos, cuando las plantas se oxidan o deforman, pero una parte de ellas se puede rescatar y reintegrar a la etapa anterior (Sánchez-Brenes *et al.*, 2015).

El cultivo de tejidos vegetales es una técnica que ayuda a la propagación masiva de plantas con diversos objetivos como la obtención de protocolos para generar mayor cantidad de plantas en menos tiempo, para producción de metabolitos secundarios o incluso para mejoramiento genético vegetal y el establecimiento de plantaciones clonales fieles a la planta madre.

## Productos generados a partir de micropropagación

La obtención de protocolos de propagación incluye cuatro etapas y algunos autores incluyen una etapa cero en la cual se seleccionan las plantas elite o plantas madre y se disminuye el exceso de microorganismos aplicándoles fungicidas y bactericidas; la etapa 1 es el establecimiento que consiste en extraer un explante o tejido vegetal de la planta madre y colocarlo en un medio de cultivo de formulación conocida en condiciones estériles para obtener el desarrollo de brotes; la etapa 2 es la multiplicación, una vez obtenido los brotes pertinentes lo siguiente es tener mayor cantidad de plántulas en menos tiempo; la etapa 3 es el enraizamiento, en el cual, la inducción de la raíz es obtenida en un medio de cultivo de formulación conocida y reguladores de crecimiento vegetal, por lo general auxinas; por último, la etapa 4 es la aclimatación, una vez obtenidas las plántulas *in vitro*, se aclimatan en invernaderos especializados para que puedan ser nuevamente autótrofas. El proceso descrito anteriormente implica obtener plántulas en un protocolo de micropropagación, sin embargo, no sólo es la obtención del protocolo, ya que diversos factores pueden generar diferentes respuestas y podría ayudar a obtener o no un mayor número de plántulas en menos tiempo y con las características deseadas. Posterior a obtener un protocolo, el mejoramiento genético o simplemente la obtención de plántulas elites con las características genéticas iguales a la planta madre o planta donadora inicial, es vital para tener un éxito en la empresa de base tecnológica (Figura 2).



Figura 2. Proceso de micropropagación vegetal. Fuente: Elaboración propia.

Uno de los riesgos que se tiene de la formación de una empresa en cultivo *in vitro* de *J. curcas* es la diversidad genética que se presenta, ya que ésta influye en la respuesta *in vitro*. En el Cuadro 1 se puede resumir los diversos estudios realizados; estos estudios pueden ayudar a obtener una base para obtener un protocolo propio e innovar eficazmente el proceso de micropropagación, así como su mejoramiento genético.

**Cuadro 1. Investigaciones realizadas en protocolos de micropropagación *in vitro* de *Jatropha curcas***

Tipo de explante	Modo de regeneración	*RCV + aditivos orgánicos	Referencias
Yemas axilares	Embriogénesis	BAP, Kin, AIB + Sad	(Baran Jha <i>et al.</i> , 2007)
Yema axilar y segmento de hoja	Multiplicación adventicia de brotes por regeneración directa	TDZ, BAP, AIB	(Sujatha <i>et al.</i> , 2005)
Hipocotilo, Pecíolo y segmento de hoja	Regeneración vía brotación adventicia, enraizamiento <i>in vitro</i>	BAP, AIB	(Sujatha & Mukta, 1996)
Ápices	Organogénesis, enraizamiento de brotes <i>in vitro</i>	BAP, AIA + Sad, Glutamina	(Rajore & Batra, 2005)
Pecíolo	Inducción directa de brotes	TDZ, Kin, BAP, ANA	(Kumar & Reddy, 2010)

Tipo de explante	Modo de regeneración	*RCV + aditivos orgánicos	Referencias
Segmento de hoja	Brotación adventicia	TDZ, BAP, AIB	(Deore & Johnson, 2008)
Yemas axilares	Regeneración directa de brotes	BAP, IBA + Sad, glutamina, ácido cítrico	(Shrivastava & Banerjee, 2008)
Embrión inmaduro	Organogénesis indirecta (mediante callos)	BAP, Kin, AIB + PVP, ácido cítrico	(Varshney & Johnson, 2010)
Hoja cotiledonar	Regeneración directa de brotes	TDZ, Kin, BAP, ANA	(Sharma <i>et al.</i> , 2011)
Segmentos nodales	Formación múltiple de brotes	BAP, Kin, AIA	(Kalimuthu <i>et al.</i> , 2007)
Segmentos foliares	Embriogénesis somática	Kin, AIB + Sad	(Baran Jha <i>et al.</i> , 2007)
Epicotilo e hipocotilo	Organogénesis directa e indirecta	TDZ, Kin, AIB	(Kaewpoo & Te-chato, 2010)
Yema axilar	Inducción a la brotación múltiple	BAP, AIB	(Thepsamran <i>et al.</i> , 2008)

\*RCV: Reguladores de Crecimiento Vegetal; BAP: Bencilaminopurina; Kin: Kinetina; AIB: Ácido indolbutírico; TDZ: Tidiázuron; AIA: Ácido indolacético; ANA: Ácido naftalenacético; PVP: Polivinilpirrolidona; Sad: Sulfato de adenina. Fuente: Elaboración propia.

## Biología sintética y nanobiotecnología

### Posibles aplicaciones de biología sintética

La biología sintética es una de las tendencias más grandes y de mayor crecimiento, pero menos definidas en las tecnologías de ciencias de la vida; los científicos han estado manipulando los genes durante décadas: la inserción, eliminación y modificación de los genes y su expresión se han convertido en una función de rutina en miles de laboratorios. Nuestra capacidad de modificar el ADN y el código genético a través de la biología molecular nos ha dado la capacidad de usar células como hardware y el código genético como un software para el diseño de microorganismos para los nuevos propósitos que se extienden más allá de los objetivos que podrían alcanzarse mediante técnicas recombinantes. Esto incluye nuevas estrategias para la ingeniería genética, la creación de nuevos elementos de ADN y ARN, expansión del código genético y la síntesis química de polímeros biocompatibles novedosos (Weninger *et al.*, 2016).

La biología sintética podría ayudar al mejoramiento genético de *J. curcas*, la recombinación de genes podría ayudar a generar nuevos individuos con tolerancia a plagas y enfermedades que afectan al monocultivo, o incluso se pudiese seleccionar el o los genes involucrados en la ruta de la producción del aceite en sus semillas y tratar de introducirla a alguna bacteria como *E. coli* que pudiese producir ese metabolito en grandes fermentadores, sin embargo, aún queda mucho por investigar sobre estas rutas metabólicas y los genes involucrados en la producción de los metabolitos.

### La nanobiotecnología aplicada a *Jatropha curcas*

La nanobiotecnología tiene varias aplicaciones universales significativas en el campo de la medicina, la alimentación, la agricultura, el medio ambiente y la conservación de la biodiversidad. Se tienen avances con la nanotecnología como los nanotubos de carbono que proporcionan mejores condiciones de conservación de los alimentos para inhibir el crecimiento de microbios o los nanosensores y nanofiltros que ofrecen la perspectiva de un entorno limpio y saludable (Ponce *et al.*, 2018).

Durante las dos últimas décadas, la investigación sobre nanopartículas se ha desarrollado rápidamente debido a sus excepcionales características físicas, químicas, catalíticas, magnéticas y otras propiedades que son bastante diferente de las partículas mayores (Ozin, 1992). Entre las nanopartículas metálicas utilizadas, la de plata es quizá la más usada por su aplicación en la fotónica, microelectrónica, fotocatalisis, litografía entre otras (Bar *et al.*, 2009).

La utilización de las nanopartículas para diversos fines puede abrir una ventana de oportunidades para aplicaciones biotecnológicas para *J. curcas*; obteniendo un protocolo de cultivo *in vitro*, se puede investigar diversas rutas para obtener sustancias de algún uso nanobiológico, como el reportado por Bar *et al.* (2009) quienes desarrollaron un método ecológico para sintetizar nanopartículas usando extractos acuosos de semilla de *J. curcas* demostrando que la síntesis verde y el látex renovable de esta especie se pueden usar como agente reductor para la síntesis de nanopartículas de plata. En otros reportes, Hudlikar *et al.* (2012) y Goutam *et al.* (2018) obtuvieron la síntesis verde de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  (dióxido de titanio) mediante el uso de extracto acuoso del látex de *J. curcas* para proporcionar un enfoque alternativo fácil confiable, respetuoso con el medio ambiente y con aplicaciones en biomedicina, bioingeniería, electrónica y sistemas ambientales. Así que la búsqueda de residuos como materia prima para el desarrollo de la síntesis de nanocatalizadores podría ser atractiva para eliminar los desechos y simultáneamente producir catalizadores altamente rentables (Teo *et al.*, 2017).

## Tecnología: empresas de base tecnológica (EBT)

Una empresa es una colección de activos tanto tangibles como intangibles, organizados para que un producto pueda ser vendido en el mercado y mantener ventaja competitiva (Grant, 1991). Otra definición desde el punto de vista económico neoclásico considera a la empresa como una caja negra en donde entran insumos y se obtienen productos (Coase, 1934). En el contexto actual de la empresa se sabe que el avance tecnológico cada vez más rápido genera nuevas oportunidades de negocio, así como nuevas necesidades en las personas (Osuna & Pérez, 2016) (Amaro-Rosales & Villavicencio-Carbajal, 2015).

Las EBT ha llevado a algunas empresas a basarse en explotar nuevas oportunidades de negocios derivadas del avance tecnológico (Onetti *et al.*, 2012). Hay que considerar que aunque toda empresa tiene una base tecnológica, no toda empresa se considera una EBT, debido a que se requiere de una tecnología actualizada que genere nuevas oportunidades de negocio en los mercados (Osuna & Pérez, 2016).

Para obtener una empresa de base tecnológica en cultivo *in vitro* de *J. curcas* es necesario conocer lo indispensable para el desarrollo de este proceso, para ello el conocimiento de las instalaciones de un laboratorio, el equipamiento el uso de biorreactores y equipo para análisis molecular y genético y la generación de patentes son necesarios y son etapas que ayudarán a mantener una empresa con tecnología de punta.

### Generación de patentes

Una patente es un derecho exclusivo concedido por el estado a una invención que es nueva; implica una actividad inventiva y es susceptible a tener una aplicación industrial (Díaz Pérez, 2008). La patente da derecho al inventor para que no se le pueda dar un uso comercial a la invención, a menos que se vendan los derechos a empresas comerciales para que pueda ser explotada. La patente permite desarrollar una sólida posición en el mercado a través de la concesión de licencias. Un producto complejo (por ejemplo, una cámara, un teléfono móvil, un coche) puede incorporar varias invenciones que estén cubiertas por varias patentes, que pueden pertenecer a titulares diferentes (OMPI, 2006).

Hasta el año 2011 las patentes otorgadas a innovaciones biotecnológicas en el mundo fue de 16,097 según la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), siendo los principales países con gastos de Innovación y Desarrollo: Estados Unidos con 27,374, Francia con 2,790, Japón con 1,230, Alemania con 1,168 y Corea con 1,082 millones de dólares (Dutta, 2012).

En México, varias empresas son parte de un sector vulnerable, esto quiere decir que se pueden considerar una fuente de maquila para otros países y no

empresas innovadoras. México debe ser una fuente de innovación tecnológica debido al potencial y talento de su población, al igual que por las fuentes de recursos naturales propias del país (Téllez *et al.*, 2014; Amaro-Rosales & Villavicencio-Carbajal, 2015).

### Técnicas y tecnología de punta para análisis de plantas cultivadas *in vitro*

En los procesos de micropropagación es necesario realizar pruebas que aseguren los objetivos de los protocolos de producción *in vitro*, éstos van a depender de los objetivos planteados, por ejemplo para la producción de plantas elite es necesario conocer la estabilidad genética, así se asegura que todas la plantas generadas son idénticas al tejido de la planta madre del cual procedieron.

Para realizar las pruebas de estabilidad en plantas regeneradas *in vitro* es necesario el uso de ciertos equipos como el citómetro de flujo, que es un instrumento muy utilizado para cuantificar y estimar características y productos celulares como el contenido de ADN.

### Una aproximación del roadmapping para generar una empresa de base tecnológica *in vitro* de *Jatropha curcas*

Uno de los problemas que será necesario solucionar para el futuro son los requerimientos energéticos. A nivel mundial, los combustibles fósiles se han utilizado de manera indiscriminada para obtener combustible y diversas formas de energía más barata; por otro lado, la disminución de combustibles fósiles y las enormes cantidades de residuos que se generan es otro problema que enfrenta el mundo. Estos problemas junto con el cambio climático han llamado la atención hacia el desarrollo de biocombustibles y combustibles renovables para cumplir las demandas de energía (Mohan, 2016).

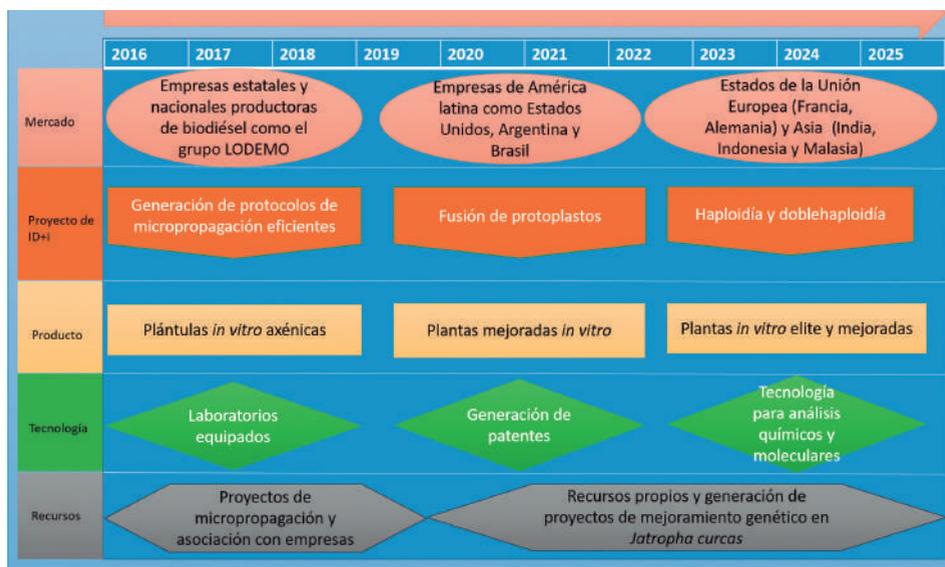


Figura 3. Roadmapping para la formación de una empresa de base tecnológica en cultivo *in vitro* para *Jatropha curcas*. Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción del roadmapping (Figura 3) de una empresa de base tecnológica de cultivo *in vitro* de *Jatropha curcas* se identificaron 5 etapas:

1. El mercado. El enfoque del mercado en primera instancia será estatal, realizando convenios con empresas del ramo. Una vez que la empresa empiece a generar sus recursos propios y se obtenga la certificación, se explorarán los mercados de Latinoamérica, como Argentina y Brasil, posteriormente empresas mundiales como Francia, Alemania, India, Indonesia y Malasia.
2. Proyectos. Para los proyectos, la generación de protocolos de micropropagación eficientes; y el mejoramiento será a partir de la fusión de protoplastos y la haploidía y doblehaploidía de la especie.

3. Productos. Los productos que se buscarán en el proceso serán plantas certificadas elite y fieles genéticamente a la planta madre, así como el mejoramiento genético de las mismas.
4. Tecnología. Se buscará tener laboratorios equipados, así como la generación de patentes y tecnología de punta que permitan realizar análisis químicos y moleculares para certificación del producto.
5. Recursos. Los recursos propuestos para los primeros tres años, serán de proyectos de micropropagación para generar recursos en la investigación inicial, así mismo, se plantea utilizar recursos propios o asociaciones con empresas de micropropagación; una vez que la empresa logre desarrollarse en sus primeros años, la innovación con recursos propios ayudará a la prevalencia de la empresa.

## Conclusiones y perspectivas

La visión proactiva de la generación de una empresa de base tecnológica de cultivo *in vitro* en *Jatropha curcas* puede ser prometedora en 10 años, debido a la gran demanda de recursos energéticos y a la necesidad de disminuir la contaminación causada por los gases de efecto invernadero.

Por otro lado, una de las debilidades es que la aplicación de tecnologías de punta puede ser, en un principio, limitadas por la falta de recursos, aunque una vez obtenido el mejoramiento genético y los convenios con empresas para el desarrollo y crecimiento de la misma, podría ser un éxito en un futuro no muy lejano.

El mercado de los biocombustibles se está haciendo cada vez más grande, sobre todo por el Protocolo de Kyoto de 1997 que representa el primer compromiso cuantitativo de países industrializados para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (Roca Jusmet & Padilla Rosa, 2003) y de forma más reciente el Acuerdo de París, en el cual México anunció un objetivo inspirador de reducción de emisiones 50% por debajo de 2000 niveles para 2050 (Rong, 2010) y que además, se reconoce la necesidad urgente de que países en desarrollo realicen proyectos de ID+i para obtener energías renovables y sostenibles (UNFCCC, 2016).

## Bibliografía citada

- Amaro-Rosales, M. & Villavicencio-Carbajal, D.H. 2015. “Incentivos a la innovación de la biotecnología agrícola-alimentaria en México”. *Estudios Sociales*, 23(45), 33–45.
- Bar, H., Bhui, D. K., Sahoo, G. P., Sarkar, P., Pyne, S., & Misra, A. (2009). Green synthesis of silver nanoparticles using seed extract of *Jatropha curcas*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 348(1-3), 212-216. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.02.008>.
- Baran Jha, T., Mukherjee, P. & Manjari Datta, M. 2007. “Somatic embryogenesis in *Jatropha curcas* L. an important biofuel plant”. *Plant Biotechnology Reports*, 1, 135–140. <https://doi.org/10.1007/s11816-007-0027-2>.
- Beamon, B.M. 1998. “*Supply Chain Design and Analysis : Models and Methods*”, 1, 1–22.
- Castro Aranda, S., López Torres, V.G., Guerra Rivas, G. 2016. “Propuesta de Modelo de Negocio Base para las Empresas de Biotecnología en México”. *Revista Global de Negocios*, 4(4), 29–51.
- Coase, R.H. 1934. “*The Nature of the Firm*”, 4(440), 440–446.
- Cortés Marín, E.A., Ciro Velásquez, H.J. & Moreno Cárdenas, E.L. 2011. “Biocombustibles: búsqueda de alternativas”. *CES Medicina Veterinaria Y Zootecnia*, 6(2), 118–123. <https://doi.org/10.21615/2063>
- da Silveira Junior, L.A.B., Vasconcellos, E., Vasconcellos Guedes, L., Guedes, L.F.A., Machado Costa, R. 2018. “Technology roadmapping: A methodological proposition to refine Delphi results”. *Technological Forecasting and Social Change*, 126, 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.08.011>.
- Deore, A.C. & Johnson, T.S. 2008. “High-frequency plant regeneration from leaf-disc cultures of *Jatropha curcas* L.: an important biodiesel plant”. *Plant Biotechnology Reports*, 2, 7–11. <https://doi.org/10.1007/s11816-008-0042-y>.
- Díaz Pérez, M. 2008. “*La propiedad industrial y los sistemas de patentes en el mundo de la información*”, 18, 1–11.
- Dutta, S. 2012. “*The Global Innovation Index 2012 Stronger Innovation Linkages for Global Growth*”. (INSEAD, Ed.). INSEAD.
- Eggers, B. & Mackenzie, R. 2000. “The Cartagena Protocol on biosafety”. *Journal of International Economic Law*, (March), 525–543.

- Fagerberg, J., Martin, B.R. & Andersen, E.S. 2013. “*Innovation studies evolution and future challenges*”. Oxford Uni. United Kingdom.
- García, Marie L., Bray, O.H. 1997. *Fundamentals of Technology Roadmapping*. Albuquerque, Nuevo México: Sandia National Laboratories.
- Goswami, K. & Hazarika, A. 2017. “Supply chain network of *Jatropha* based biodiesel industry in North East India”. *Sustainable Production and Consumption*, 6, 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.01.002>.
- Goutam, S.P., Saxena, G., Singh, V., Yadav, A.K., Bharagava, R.N., Thapa, K.B. 2018. “Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using leaf extract of *Jatropha curcas* L. for photocatalytic degradation of tannery wastewater”. *Chemical Engineering Journal*, 336, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.029>.
- Grant, R.M. 1991. “The Resource-Based Theory of Competitive Advantage: Implications for Strategy Formulation”. *Knowledge and Strategy*, 33(3), 3–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7088-3.50004-8>.
- Greif, E. 2013. “Kreimer, Pablo: Ciencia y periferia. Nacimiento, muerte y resurrección de la biología molecular en la Argentina, Buenos Aires”, Eudeba, 2011. *Rey Desnudo*, 1(2), 107–113.
- Hernández, J.L.S. & Pérez, C.D. 2016. “Innovación para el desarrollo inclusivo: Una propuesta para su análisis”. *Economía Informa*, 396, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.01.002>.
- Hudlikar, M., Joglekar, S., Dhaygude, M., Kodam, K. 2012. “Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles by using aqueous extract of *Jatropha curcas* L. latex”. *Materials Letters*, 75, 196–199. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.02.018>.
- Kaewpoo, M. & Te-chato, S. 2010. “Study on ploidy level of micropropagated *Jatropha curcas* L. via flow cytometry”. *Journal of Agricultural Technology*, 6(2), 391–400.
- Kalimuthu, K., Paulsamy, S., Senthilkumar, R. & Sathya, M. 2007. “*In vitro* Propagation of the Biodiesel Plant *Jatropha curcas* L.” *Plant Tissue Culture and Biotechnology*, 17(2), 137–147.
- Kumar, N. & Reddy, M.P. 2010. “Plant regeneration through the direct induction of shoot buds from petiole explants of *Jatropha curcas*: a biofuel plant”. *Annals of Applied Biology*, 156(3), 367–375. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00394.x>.
- Luis, J., Hernández, S. & Pérez, C.D. 2002. “Innovación para el desarrollo inclusivo: Una propuesta para su análisis”. *Economía Informa*, 396, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.01.002>.

- Madhok, A. & Osegowitsch, T. 2016. “The International Industry: Biotechnology Dynamic Capabilities Perspective”. *Journal of International Business Studies*, 31(2), 325–335.
- Marín, E.C., Mahecha, H.S. & Carrasco, S.P. 2009. “Biocombustibles y autosuficiencia energética”. *Dyna*, 76(158), 101–110.
- Mentzer, J.T., De Witt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., Zacharia, Z.G. 2001. “Defining supply chain management”. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>.
- Mohan, S.R. 2016. “Strategy and design of Innovation Policy Road Mapping for a waste biorefinery”. *Bioresource Technology*, 215, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.090>.
- Moniruzzaman, M., Yaakob, Z. & Khatun, R. 2016. “Biotechnology for *Jatropha* improvement: A worthy exploration”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1262–1277. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.074>.
- Moure Pino, A.M. 2013. “El principio de prevención en el Derecho Internacional del medio ambiente”. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC: Instituto de Filosofía*, 21–37.
- Navarro-Pineda, F.S., Baz-Rodríguez, S.A., Handler, R., Sacramento-Rivero, J.C. 2016. “Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 247–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.009>.
- OMPI. 2006. “*Inventar el futuro*”. *Cimbra*. WIPO Copyright. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=990084>.
- Onetti, A., Zucchella, A., Jones, M.V., McDougall-Covin, P.P. 2012. “Internationalization, innovation and entrepreneurship: Business models for new technology-based firms”. *Journal of Management and Governance*, 16(3), 337–368. <https://doi.org/10.1007/s10997-010-9154-1>.
- Osuna, M.A.A. & Pérez, C. del C.D. 2016. “La empresa de base tecnológica y su contribución a la economía mexicana en el período 2004-2009”. *Contaduría y Administración*, 61(1), 106–126. <https://doi.org/10.1016/j.cya.2015.09.004>.
- Ozin, G.A. 1992. “Nanochemistry : Synthesis in Diminishing Dimensions”. *Advanced Materials*, 4(10), 612–649.
- Phaal, R., Farrukh, C.J.P. & Probert, D.R. 2004. “Technology roadmapping — A planning

- framework for evolution and revolution". *Technological Forecasting & Social Change*, 71, 5–26. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6).
- Ponce, A.G., Ayala-Zavala, J.F., Marcovich, N.E., Vázquez, F.J., Ansorena, M.R. 2018. "Industry: Recent Developments, Risks". Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811441-4/00005-4>.
- Rajore, S. & Batra, A. 2005. "Efficient Plant Regeneration via Shoot Tip Explant in *Jatropha curcas* L." *Journal Plant Biochemistry and Biotechnology*, 14, 73–75.
- Roca Jusmet, J. & Padilla Rosa, E. 2003. "Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España. La Curva de Kuznets Ambiental y el Protocolo de Kyoto". *Economía Industrial*, 3(351), 73–86.
- Rong, F. 2010. "Understanding developing country stances on post-2012 climate change negotiations: Comparative analysis of Brazil, China, India, Mexico and South Africa". *Energy Policy*, 38(8), 4582–4591. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.014>.
- Rubiano Sandoval, L.M. 2016. "*Biotecnología moderna y su estudio de Derecho*". Universidad Católica de Colombia.
- Rucoba García, A., Munguía Gil, A. & Sarmiento Franco, F. 2013. "Entre la *Jatropha* y la pobreza: reflexiones sobre la producción de agrocombustibles en tierras de temporal en Yucatán". *Estudios Sociales*, 21(41), 115–141.
- Sánchez-Brenes, A., Alvarado-Ulloa, C., Solís-Blanco, R., Chacón-Cerdas, R., Villalta-Solano, H. 2015. "Aplicación de Cadenas de Markov en un proceso de producción de plantas *in vitro*". *Tecnología en Marcha*, 29(506), 74–82.
- Sharma, S., Kumar, N. & Reddy, M.P. 2011. "Regeneration in *Jatropha curcas*: Factors affecting the efficiency of *in vitro* regeneration". *Industrial Crops and Products*, 34(1), 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.02.017>.
- Shrivastava, S. & Banerjee, M. 2008. "*In vitro* clonal propagation of physic nut (*Jatropha curcas* L.): Influence of additives". *International Journal of Integrative Biology*, 3(1), 73–79.
- Siebelink, R., Halman, J.I.M. & Hofman, E. 2016. "Scenario-Driven Roadmapping to cope with uncertainty: Its application in the construction industry". *Technological Forecasting & Social Change*, 110, 226–238. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.01.030>.
- Sujatha, M., Makkar, H. & Becker, K. 2005. "Shoot bud proliferation from axillary nodes and leaf sections of non-toxic *Jatropha curcas* L." *Plant Growth Regulation*, 47, 83–90. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-0859-0>.
- Sujatha, M. & Mukta N. 1996. "Morphogenesis and plant regeneration from tissue culture of *Jatropha curcas*". *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 44, 135–141.

- Téllez, G.F., González, J.G. & Rivera, E.A.M. 2014. “TRIZ como elemento de integración de planes de negocios en la creación de nuevos productos y servicios. Caso: Productores de la Sierra Norte del estado de Puebla”. 9o Congreso Iberoamericano de Innovación Tecnológica Y Desarrollo de Productos, 4–18.
- Teo, S.H., Islam, A., Masoumi, H.R.F., Taufiq-Yap, Y.H., Janaun, J., Chan, E.-S., Khaleque, M. 2017. “Effective synthesis of biodiesel from *Jatropha curcas* oil using betaine assisted nanoparticle heterogeneous catalyst from eggshell of *Gallus domesticus*”. *Renewable Energy*, 111, 892–905. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.039>.
- Thepsamran, N., Thepsithar, C. & Thongpukdee, A. 2008. “*In vitro* induction of shoots and roots from *Jatropha curcas* L. explants”. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 83(1), 106–112. <https://doi.org/10.1080/14620316.2008.11512354>.
- Varshney, A. & Johnson, T.S. 2010. “Efficient plant regeneration from immature embryo cultures of *Jatropha curcas*, a biodiesel plant”. *Plant Biotechnology Reports*, 4, 139–148. <https://doi.org/10.1007/s11816-010-0129-0>.
- Weninger, A., Killinger, M. & Vogl, T. 2016. “*Key Methods for Synthetic Biology: Genome Engineering and DNA Assembly*”. (S.I.P. Switzerland, Ed.) (Austrian C). Austria. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22708-5>.

## Documentos impresos y en línea

Biológica, C.S. la D. 2006. Cbd convenio sobre la diversidad biológica, (iv), 1–8.

Naciones Unidas. 1992. Convenio sobre la diversidad biológica, Naciones Unidas.

UNFCCC, S. 2016. Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session. Bonn: United Nations Framework Conventi.

*Jatropha curcas* en México: Avances y perspectivas de un cultivo Bioenergético  
Este libro se terminó de imprimir en Junio de 2018, en Corporativo Inteliplan S.A de C.V.  
Calle 60 No. 299-C Int. L270 Revolución Cordemex C.P. 97115, Mérida, México.  
El Tiraje fue de 1000 ejemplares, en papel couché de 115 g para los interiores.  
Los Forros en couché de 200 gr laminado mate y encuadenado a Hotmelt en cartóné.





