

Evaluación preliminar del etanol anhidro como solvente en la extracción de aceite de semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.)

Por Cecilia O. Brossard-González,^a Roseli A. Ferrari,^b Anna L. Pighinelli^a y Kil Jin Park^{a*}

^a Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil

^b Instituto de Tecnologia de Alimentos. Av. Brasil 2880, 13070-178. Campinas. São Paulo. Brasil.

(* Autor para la correspondencia: kil@feagri.unicamp.br)

RESUMEN

Evaluación preliminar del etanol anhidro como solvente en la extracción de aceite de semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.)

Fue realizada una evaluación preliminar de la extracción con etanol anhidro, del aceite de semillas enteras de *Jatropha curcas* L. (32,24% lípidos y 16,05% proteínas) provenientes de Mato Grosso, Brasil. El estudio incluye una comparación con las extracciones por n-hexano y prensado, que siguió la metodología de diseños factoriales 2^k. El modelo de regresión correspondiente a la comparación etanol/n-hexano, variando el tiempo de extracción, presenta buen ajuste y R² de 99%. Sin embargo, el diseño para el prensado, variando velocidad de rotación de la prensa y temperatura, condujo a un modelo lineal que resultó inapropiado. La composición del aceite extraído con etanol es similar a las obtenidas por prensado y por n-hexano. El mayor rendimiento (36,7%) fue obtenido con etanol durante 4 horas. El exceso de material extraído se atribuye a la solubilización adicional de impurezas que podrían disminuirse limitando el tiempo de extracción a 1 hora. El aceite extraído con etanol tiene la misma coloración que el obtenido por prensado. Se presume que ambos aceites puedan tener procesos de purificación semejantes. Se sugieren estudios posteriores utilizando mezclas de etanol con pequeñas proporciones de n-hexano para disminuir la extracción de impurezas sin afectar el rendimiento de aceite.

PALABRAS CLAVE: Aceite vegetal – Diseño factorial experimental – Etanol – n-Hexano – Temperatura – Tiempo.

SUMMARY

Preliminary evaluation of anhydrous ethanol as a solvent in the oilseed extraction of *Jatropha curcas* L.

A preliminary evaluation was performed on anhydrous ethanol as a solvent for the extraction of oil from whole *Jatropha curcas* L. seeds (32.24 % lipids, 16.05 % proteins), supplied from Mato Grosso, Brazil. The methodology of factorial 2^k designs was followed, which included a comparison between pressing and n-hexane extraction methods. The regression model corresponding to the comparison between ethanol and n-hexane, varying extraction time, did not have lack of fit and presented an R² of 99%. The experimental design for the pressing method, varying press rotation speed and temperature, yielded a poorly fitted linear model. The oil composition extracted with ethanol was similar to those obtained by n-hexane and by pressing. The highest yield

(36.7%) was obtained using ethanol for 4 hours. The excess of extracted material was attributed to additional solubilization of impurities that could be diminished by limiting the extraction time to 1 hour. The oil extracted with ethanol and by pressing have the same color. It is presumed that the purification steps for both oils should be similar. Further studies using mixtures of ethanol with small proportions of n-hexane are suggested.

KEY-WORDS: Ethanol – Experimental factorial design – n-Hexane – Temperature – Time – Vegetable oilseed.

1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de combustibles renovables en nuestros días ha conducido a las investigaciones en el área energética al estudio de la utilización de la biomasa y a la producción de etanol, bio-óleo y biodiesel, entre otros (Achten *et al.*, 2008). Entre los biocombustibles anteriormente señalados, el biodiesel ha tenido gran aceptación y es obtenido generalmente a partir de aceites vegetales o grasas animales. Se prefiere el uso de aceites vegetales no comestibles con el fin de evitar competencia con la producción de alimentos. En este contexto, las semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.), desempeñan un papel importante pues poseen alto contenido de lípidos y proteínas. El aceite puede ser usados en la producción de biodiesel y la harina remanente de la extracción del aceite, podría usarse como alimento animal, toda vez que sea desintoxicada (Kumar y Sharma; 2008; Martínez - Herrera *et al.*, 2006).

Los procesos de extracción de aceite vegetal son generalmente llevados a cabo mediante los métodos de prensado y por solvente. La extracción por prensado puede ser en frío o en caliente (Thomas, 2003). El calentamiento de las semillas se realiza con el objeto de tornar las membranas celulares más permeables al paso de las grasas (Marcus, 1999). Esta fase aumenta el rendimiento de la extracción si la humedad de las semillas oscila en un rango adecuado (Bredeson, 1983; Zavala Pope, 1972).

El proceso de extracción por solvente es un método de separación sólido-líquido también conocido

como lixiviación (Ullmann's Encyclopedia of Chemical Engineering, 1995; Svarovsky, 1990). Existen investigadores que destacan que para una capacidad de producción de más de 50 toneladas de biodiesel por día, la extracción por solvente se hace económica (Adriaans, 2006). Según las investigaciones de Achten *et al.* (2008), en la extracción química, aparece la extracción con *n*-hexano como la más común y la que exhibe mayor rendimiento, de 95-99%.

El etanol anhidro podría ser un solvente alternativo para ser tomado en cuenta debido a su baja toxicidad y a su carácter renovable. En Brasil, se han llevado a cabo estudios preliminares sobre el uso del etanol anhidro como solvente para la extracción de aceites vegetales (Lago, 1985). Con esto, se aprovecharía la gran capacidad productiva de etanol a partir de la caña de azúcar con que cuenta este país y podría minimizarse el impacto ambiental por el uso de sustancias tóxicas usadas para estos fines. No obstante, no es común hallar en la literatura especializada reportes de estudios de extracciones realizadas con etanol. Escasean también trabajos enfocados hacia la comparación de este método con otros métodos extractivos más frecuentes, tales como, por *n*-hexano y por prensado. Precisamente, el propósito central de este trabajo es evaluar el método de extracción por etanol anhidro de aceite de jatrofa, valiéndose de comparaciones con los métodos de extracción por prensado y *n*-hexano, utilizando para ello la metodología del diseño factorial de experimentos 2^k .

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Esquema del trabajo experimental

El trabajo experimental fue realizado en el Instituto de Tecnología de Alimentos (ITAL), Campinas, del Estado de São Paulo, Brasil. Los pasos del trabajo aparecen resumidos en la Figura 1. Las semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.), procedieron del Estado de Mato Grosso, Brasil, de la cosecha del mes de Febrero/2009.

2.2. Caracterización de las semillas de *Jatropha curcas* L.

En esta primera etapa fue realizado el análisis centesimal de las semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.). Esto es, porcentos de humedad: método de estufa ventilada a $130 \pm 3^\circ\text{C}$ por 2 horas, conforme método BC 2-49 (AOCS, 2008), lípidos conforme método 945.38 F, utilizando éter de petróleo como solvente, durante 8 horas de extracción, con extractor tipo Butt; ceniza: método 945-42 (Zenebon y Pascuet, 2005); proteínas: método 945.39 (AOAC, 2006) y de fibra bruta por el método de Scharrer y Kürschner, (Diemair, 1963).

Para la realización del análisis centesimal, la materia prima fue triturada y homogeneizada en

molino de laboratorio. Para cada uno de los análisis fueron pesados $5 \pm 0,5\text{g}$ de materia prima homogeneizada en balanza analítica, excepto para la determinación del contenido de fibra bruta que fueron pesadas $2 \pm 0,01\text{g}$.

Fue determinado el peso y las dimensiones geométricas de las semillas enteras y también descascaradas. En esta etapa fueron escogidas aleatoriamente 140 semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.) de una muestra de 1 kg de semillas. Las medidas fueron realizadas con pie de rey marca Digimess.

2.3. Metodología de la investigación

Todos los resultados fueron analizados mediante la metodología del diseño factorial de experimentos 2^k (Montgomery, 2005; Barros Neto *et al.*, 1995). Esta metodología tuvo como objetivo la obtención de modelos de regresión donde la respuesta analizada, en este caso el rendimiento de aceite vegetal extraído aparezca en función de las variables controlables o factores considerados en el estudio.

En este trabajo, el modelo de regresión fue obtenido en forma codificada donde cada factor es simbolizado mediante una letra. Los factores así denotados pueden asumir valores adimensionales codificados desde -1 (para el valor natural inferior) hasta el +1 (valor natural superior). Los factores cuantitativos (ej.: velocidad de rotación y temperatura) pueden asumir cualquier valor entre esos extremos incluyendo el valor cero, el cual significa que el factor está operando en el centro de la región experimental estudiada. Los factores cualitativos (Ej.: tipo de solvente) solo pueden asumir valores +1 y -1.

Los resultados de cada diseño son recogidos en la correspondiente tabla de análisis de varianza (ANOVA). Este tipo de tablas muestra cuáles factores resultan significativos. Esto es, factores con p valor $< 0,05$. Presenta además la falta de ajuste del modelo de regresión obtenido así como su coeficiente de determinación múltiple (R^2). Estos dos parámetros son indicativos de la calidad del modelo obtenido.

2.4. Extracción por prensado en caliente del aceite de Jatrofa (*Jatropha curcas* L.)

Las semillas de jatrofa fueron tamizadas para retirar las impurezas presentes. Esta materia prima limpia fue calentada en un tanque rotatorio con capacidad para 50 kg. Las temperaturas fueron determinadas con termómetro Industrial sin contacto IR marca BT TIP 400 con resolución $0,1^\circ\text{C}$. Posteriormente, las semillas enteras fueron sometidas a prensado en mini prensa de capacidad de 40 kg, marca *Ecirtec*, modelo MPE-40.

El aceite bruto obtenido fue filtrado en tamiz de 300 mm en la planta piloto y guardado en recipientes tapados, de vidrio. Este aceite fue finalmente

filtrado en el laboratorio con papel de filtro, en kitasato con la ayuda de bomba al vacío acoplada y posteriormente almacenado en recipientes de vidrio herméticamente cerrados, a temperatura aproximada de 20°C.

Esta etapa fue realizada a través de un diseño factorial de experimentos 2^2 , teniendo como factores la velocidad de rotación de la prensa y la temperatura de calentamiento de las semillas y como respuesta el rendimiento de aceite filtrado. Se realizó un total de 7 experimentos, 3 de los cuales fueron ejecutados en el punto central. Cada corrida fue hecha con 5 kg de semillas enteras de jatrofa.

2.5. Extracción por solvente del aceite de jatrofa (*Jatropha curcas* L.)

La extracción por solvente fue realizada a nivel de laboratorio con extractor Butt. La extracción de grasas para las semillas de jatrofa siguió la metodología descrita en el método 945.38 F en AOAC (2005), excepto que los solventes usados fueron alcohol etílico PA (99,5%) y n-hexano PA (98,5%). El tiempo de cada experimento dependió de los tiempos de extracción contemplados en el diseño experimental (Tabla 5), en lugar de las 8 horas de extracción y del uso de éter de petróleo como solvente, que fueron las condiciones experimentales previstas en el citado método y que fueron las

adoptadas en la caracterización de las semillas. Las temperaturas de extracción fueron 50-60°C para el n-hexano y de 60-70°C para el etanol.

Fue seguido un diseño factorial de experimentos $2^2 = 4$ experimentos, teniendo como factores: tipo de solvente y tiempo de extracción. Fueron replicados cada uno de los experimentos con un total de 8. Cada experimento fue realizado con $5 \pm 0,5$ g de semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.). La materia prima usada fue previamente homogeneizada y secada en estufa al vacío a 70°C hasta alcanzar humedad mínima constante. La respuesta estudiada fue rendimiento de aceite extraído.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las semillas de *Jatropha curcas* L.

Las características físicas de las semillas se muestran en la Tabla 1 y la composición centesimal en la Tabla 2. Las semillas enteras exhiben características físicas similares a las reportadas en la literatura consultada (Garnayak *et al.*, 2008, Willems *et al.*, 2008 y Martínez-Herrera *et al.*, 2006). El análisis centesimal mostrado revela un alto porcentaje de aceite tanto en las semillas enteras como en las almendras. Sin embargo, los resultados

Tabla 1
Características físicas de la semilla de jatrofa (*Jatropha curcas* L.)

Propiedades físicas	Valores
<i>Semillas enteras</i>	
Masa (g)	0,72 ± 0,02
Ancho (mm)	11,31 ± 0,05
Longitud (mm)	18,77 ± 0,14
<i>Almendras</i>	
Masa (g)	0,44 ± 0,02
% masa almendra respecto a la semilla entera	59,72 ± 1,39
Ancho (mm)	8,71 ± 0,17
Longitud (mm)	14,70 ± 0,14
<i>Cáscaras</i>	
Masa (g)	0,28 ± 0,00

Tabla 2
Análisis centesimal de la harina de las semillas enteras de jatrofa (*Jatropha curcas* L.)

Análisis realizados	Intervalo de Confianza de los resultados ^a
Humedad (g/100g)	9,35 ± 2,06
Cenizas (g/100g)	3,89 ± 0,08
Lípidos (g/100g)	32,24 ± 1,55 (50,89 ± 0,81 ^b)
Fibra bruta (g/100g)	15,63 ± 0,38
Proteínas (g/100g)	16,05 ± 0,20 (24,97 ± 0,72 ^b)

^a Para un 95 % de intervalo de confianza. ^bPara la almendra

reportados por Martínez Herrera *et al.* (2006) en su estudio de desintoxicación de semillas de jatrofa de 4 regiones diferentes de México, toman como base la semilla descascarada y por lo tanto reportan porcentajes mayores de lípidos y proteínas.

Calidad de las semillas

En la materia prima se observó la presencia de moho. Las causas del deterioro pudieron ser ocasionadas por una cosecha en presencia de gran humedad (hecho confirmado por el proveedor) y por condiciones de almacenamiento inadecuadas, por ejemplo, local no climatizado. Estas razones pudieron haber sido la causa de los altos valores de índice de acidez observados tanto para el aceite extraído por prensado como por n-hexano (Tabla 7).

El aceite extraído con etanol no fue sometido a este análisis. Considerando que las condiciones de almacenamiento de los aceites extraídos fueron las adecuadas se infiere que no hubo envejecimiento de los aceites extraídos y sí baja calidad de la materia prima.

3.2. Análisis de Varianza para extracción por prensado

Los rendimientos de aceite extraído para cada experimento son mostrados en la Tabla 3. La media de los rendimientos fue de 14,6%, lo que representa un 45,6% del aceite total de las semillas empleadas. Es válido destacar que, en cada experimento, fue hecho un único prensado. Esto es, la torta resultante para cada caso no fue prensada nuevamente para

Tabla 3
Rendimiento del aceite de *Jatropha curcas* L. extraído por el método de prensado a partir de un diseño factorial de experimentos 2²

Temperatura (Codificada)	Velocidad de rotación (Codificada)	Temperatura °C	Velocidad de rotación (rpm)	Rendimiento (%)
-1	-1	70	85	13,4
1	-1	100	85	16,6
-1	1	70	119	11,0
1	1	100	119	15,0
0	0	85	102	15,6
0	0	85	102	15,1
0	0	85	102	15,8

Tabla 4
Análisis de Varianza para el Rendimiento de aceite extraído por prensado

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad (GL)	Cuadrado medio	Relación F	p-Valor
Temperatura	12,96	1	12,96	99,69	0,01
Velocidad de rotación	4,00	1	4,00	30,77	0,03
Falta de ajuste	4,02	2	2,01	15,45	0,06
Error puro	0,26	2	0,13		
Total (corr.)	21,23	6	71,00		

R-Cuadrado (%) = 79,86

Tabla 5
Rendimientos obtenidos a nivel de laboratorio para la extracción por solvente del aceite de *Jatropha curcas* L.

Solvente (Codificado)	Tiempo (Codificado)	Solvente	Tiempo (h)	Rendimientos (%)	
-1	-1	n-Hexano	1	31,11	30,87
1	-1	Etanol	1	32,43	31,59
-1	1	n-Hexano	4	31,44	31,46
1	1	Etanol	4	36,75	36,57

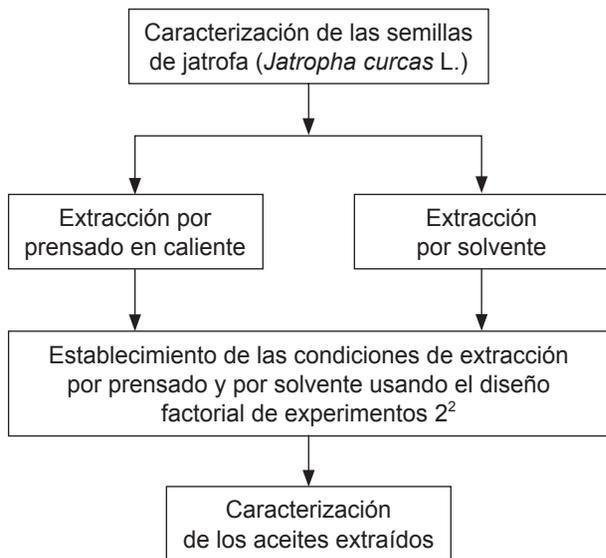


Figura 1
Esquema experimental de trabajo para la obtención de aceite para la producción de biodiesel.

extraer el exceso de aceite. Esto determinó que no fueran altos los rendimientos obtenidos.

El análisis de varianza para este diseño (Tabla 4), excluyendo la interacción binaria no significativa, *temperatura- velocidad de rotación*, reveló en el modelo de regresión resultante un R² relativamente alto, aunque con una falta de ajuste significativa. Esto último indica la poca capacidad predictiva del modelo obtenido. Este resultado es atribuido a que en la zona experimental de trabajo la respuesta estudiada no varía linealmente con los factores, y por consiguiente, un modelo lineal no representa apropiadamente lo que sucede en la experimentación.

Un modelo predictivo es aquel que posee un coeficiente de determinación múltiple (R cuadrado) ≥ 80% y no presente falta de ajuste. Este fue el tipo de modelo buscado para representar lo que ocurre en la zona experimental seleccionada. El diseño realizado para la extracción por prensado no posee las características antes señaladas y por eso solo se analiza la influencia relativa de los factores considerados.

La falta de ajuste, mostrada en la Tabla 4, corresponde casi totalmente a la suma de cuadrados de curvatura, tal como se puede apreciar a continuación:

$$SC_{curvatura} = \left[n_f * n_c * (\bar{\gamma}_f * \bar{\gamma}_c)^2 \right] / (n_f + n_c) =$$

$$= 4 * 3 * (14 - 15,5) / (4 + 3) = 3,86... (1)$$

Donde:

n_f = puntos experimentales en el cuerpo del factorial;

n_c = puntos experimentales en el centro del diseño;

$\bar{\gamma}_f$ = media de las respuestas de los experimentos en el cuerpo del diseño;

$\bar{\gamma}_c$ = media de las réplicas en el centro del diseño.

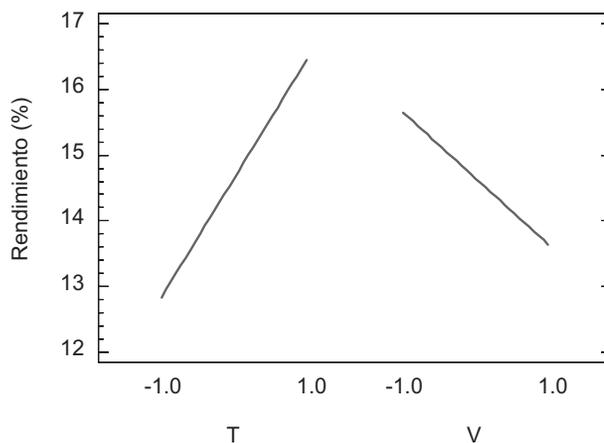


Figura 2
Gráfico de los efectos de los factores sobre el rendimiento de aceite extraído por prensado.

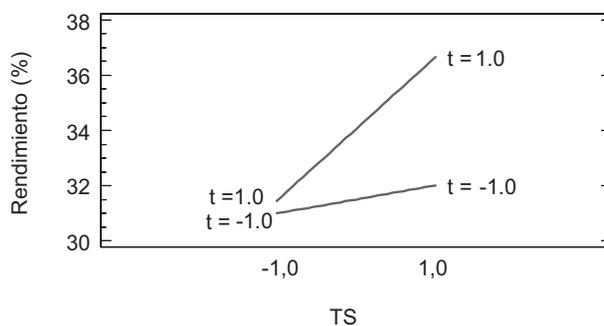


Figura 3
Gráfico de la interacción binaria TS*t para el diseño factorial 2² en la extracción por solvente.

La suma de cuadrados de curvatura está formada por la contribución de los términos cuadráticos del modelo y se hace evidente que un modelo lineal como el obtenido de un diseño 2² no puede presentar estos términos. En este caso, para obtener un modelo predictor, se haría necesario un estudio posterior de optimización con el uso de modelos factoriales de segundo orden, como un diseño central compuesto rotacional. No obstante, en la Tabla 4 se observa que la temperatura de calentamiento previo de los granos a la etapa de prensado es el factor fundamental y que en menor medida lo es la velocidad de rotación de la prensa. Analizando la , se tiene que cuando la temperatura se encuentra en su nivel superior y la velocidad de rotación en su nivel inferior, se observan los valores más altos del rendimiento de aceite. Resultados inversos se verifican para los rendimientos obtenidos a partir del nivel inferior de temperatura y superior de la velocidad de rotación de la prensa.

Etanol vs prensado

El rendimiento medio obtenido para el aceite extraído con etanol fue de 34,34%, que representa un 107,3% del aceite total presente en las semillas. Esta cifra duplica la media del rendimiento del acei-

te extraído por prensado: 14,6%. Es válido destacar que el porcentaje calculado de aceite extraído por etanol está referido al contenido de aceite reportado en la caracterización (32,24%), realizada con éter de petróleo.

En los aceites de las semillas enteras de jatrofa fue observada una coloración marrón-rojiza tanto en la extracción con etanol como por prensado. Esto pudiera deberse a que en ambos aceites fueran extraídas las mismas impurezas contenidas en las semillas enteras. Esto es, gomas, pigmentos, etc. Con el uso de etanol, podría haber sido debido a una solubilización de los carbohidratos presentes en la semilla, provocada por la similitud de polaridades del solvente con estas sustancias. En la extracción por

prensado, la trituración de las semillas ocasiona que los lípidos presentes se mezclen con las impurezas y salgan como un solo producto final. Por lo anteriormente expuesto, es de esperar que el proceso de purificación del aceite extraído con etanol deba seguir los mismos pasos que presenta normalmente el aceite crudo obtenido por el prensado: desgomado, clarificación, etc. Pudiera esperarse también, que el costo de purificación de ambos aceites sea similar. No obstante, debe señalarse que este estudio es de carácter preliminar y está sujeto a posteriores comprobaciones y análisis.

Finalmente, al comparar la composición de los ácidos grasos de los aceites obtenidos por ambos métodos, se observa una gran similitud (Tabla 8).

Tabla 6
Análisis de Varianza de para los rendimientos de aceites extraídos por solvente

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad (GL)	Cuadrado medio	Relación F	p-Valor
TS	19,41	1	19,41	195,04	0,00
t	13,06	1	13,06	131,22	0,00
TS* t	8,78	1	8,78	88,22	0,00
Error puro	0,398	4	0,10		
Total	41,64	7			

R-Cuadrado (%) = 99,04

Tabla 7
Análisis de los aceites extraídos por prensado y solvente (n-hexano)

Análisis	Aceite extraído por n-Hexano	Aceite extraído por prensado
Humedad y materia volátil (g/100g)	0,05	1,00
Índice de Peróxido (meq/kg)	0,34	0,63
Índice de acidez (mg KOH/g)	12,5	9,0

Tabla 8
Composición de ácidos grasos del aceite extraído por prensado y solvente

Ácidos grasos	Prensado (%)	Solvente (%)	
		Etanol	n-hexano
C14:0	0,15	ND*	ND
C16:0	14,22	15,61	15,63
C16:1	0,76	0,77	0,86
C17:0	0,09	ND	ND
C18:0	6,61	6,52	6,45
C18:1	42,91	42,21	42,09
C18:2	34,96	34,88	34,98
C20:0	0,13	ND	ND
C18:3	0,17	ND	ND

*: No detectado.

3.3. Análisis de varianza para extracción por solvente

Los rendimientos del aceite extraído por solvente son mostrados en la Tabla 5. La media del rendimiento de aceite extraído con n-hexano fue 31,22% que representan un 97,5% del contenido total de lípidos en las semillas. Este valor es inferior al 34,34% encontrado para el etanol.

El análisis de varianza (Tabla 6) del diseño para la extracción por solvente muestra que tanto los factores como la interacción binaria son significativos. Según el análisis de la ecuación codificada (2), se tiene:

$$\text{Rendimiento} = 32,78 + 1,56 \cdot \text{TS} + 1,28 \cdot t + 1,05 \cdot \text{TS} \cdot t \dots (2)$$

Donde:

TS: Tipo de solvente (etanol o n-hexano);

t: Tiempo de extracción;

TS*t: Interacción binaria entre los factores *tipo de solvente* y *tiempo de extracción*;

Cuando los factores trabajan en su nivel superior (+1), se obtiene el rendimiento más alto: 36,7%, que representa 114,4% de contenido de lípidos de las semillas. En otras palabras, los mayores resultados se obtienen con el etanol como tipo de solvente, concordando con lo reportado por Drummond *et al.* (2005), para 4 horas de extracción, ver. No obstante, ya en la primera hora ambos tipos de solventes extraen el 31 % de lípidos de un total de 32,24%.

Etanol vs n-Hexano

Las extracciones fueron realizadas en las semillas enteras cuyas cáscaras presentan una pigmentación oscura. Probablemente, los aceites extraídos por ambos solventes, tienen marcadas diferencias en composición debido a las diferentes polaridades y constantes dieléctricas de los solventes. Es importante destacar que posiblemente el aumento del tiempo de extracción con etanol facilita la solubilización de los pigmentos y carbohidratos presentes. Sin embargo, en el caso de n-hexano debido a su carácter no polar no tienen lugar los citados fenómenos de solubilización. Esta puede ser la causa de la no observación de cambios en el rendimiento de producto extraído, cuando se varía el tiempo de extracción usando n-hexano.

La Tabla 8, muestra que la composición porcentual de los ácidos grasos analizados es prácticamente la misma para los aceites extraídos con los dos solventes bajo estudio.

4. CONCLUSIONES

La extracción del aceite de jatrofa, (*Jatropha curcas* L.), mediante etanol, fue estudiada utilizando la metodología de diseño de experimentos 2^k. El estudio incluye una comparación con los métodos de extracción de prensado y n-hexano. Como resulta-

do se llevaron a cabo los análisis de varianza de los experimentos correspondientes a los métodos de extracción estudiados. Para el método de prensado no se obtuvo un modelo de regresión apropiado mientras que para la extracción por solvente el modelo de regresión correspondiente presentó un R² de 99%.

La extracción con etanol conduce a rendimientos superiores a los obtenidos por los métodos de prensado y por n-hexano. El rendimiento máximo se observa para 4 horas de extracción usando el etanol anhidro (36,7%). El exceso de material extraído sobre el 32,24% del total original de lípidos es atribuido principalmente a la solubilización de gomas y azúcares libres presentes en las semillas debido al incremento en el tiempo de extracción. Probablemente la extracción de parte de los pigmentos presentes en las cáscaras provoca en el extracto alcohólico una coloración oscura, semejante a la observada en el aceite extraído por prensado. Es de esperar que el proceso de purificación (y el costo de purificación) del aceite extraído con etanol deba seguir los mismos pasos que presenta normalmente el aceite crudo obtenido por el prensado.

Para disminuir la incorporación de estas impurezas al aceite extraído, el tiempo de extracción puede limitarse a 1 hora. La extracción de impurezas podría disminuirse mediante la mezcla de etanol con pequeñas proporciones de n-hexano.

La composición de ácidos grasos del extracto alcohólico es semejante a la de los aceites extraídos con n-hexano y por prensado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Tecnología de Alimentos de São Paulo (ITAL), a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), y FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo) por el apoyo financiero, así como a la empresa Energy Camp (Brasil) por el suministro de las semillas de jatrofa (*Jatropha curcas* L.). Agradecemos también la inestimable orientación del Prof. Dr. Luis E. Brossard-Pérez en el procesamiento estadístico del trabajo.

REFERENCIAS

- Achten WMJ, Verchot L, Franken, YJ, Mathijs, E, Singh VP, Aerts R y Muys B. 2008. *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass & Bioenergy*. **32**, 1063-1084.
- Adriaans T. 2006. Suitability of solvent extraction for *Jatropha curcas*. *Eindhoven: FACT Foundation*.
- AOCS. 2008. *Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists Society*. 4ta ed. Firestone D. AOCS Press Champaign, Illinois, EEUU.
- Barros Neto B, Scarminio IS, Bruns RE. 1995. *Planejamento e Otimização de Experimentos*. Editora da UNICAMP. Campinas.
- Bredeson DK. 1983. Mechanical Oil Extraction, *Journal American Oil Chemical Society*, **60**.

- Diemair W. 1963. *Laboratoriumbuch Fur Lebens Mittelchemiker*, 8aufl. Drisdén: Verlag Von Theodor Steinkopft.
- Drummond ARF, Gazineu MHP, Almeida L, Souto Maior A. Metanol e Etanol como Solventes na Extração de Aceite de Mamona. <http://www.biodiesel.gov.br/docs/congressso2006/agricultura/Metanol.pdf>
- Garnayak DK, Pradhan RC, Naik SN y Bhatnagar N. 2008. Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (*Jatropha curcas* L.). *Industrial crops and Products*, **27**, 123-129.
- AOAC. 2006. *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 18 ed. Horwitz W. Gaithersburg, Maryland. EEUU.
- Kumar A y Sharma S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Industrial Crops and Products*, **2**, 1–10.
- Lago RCA, Szpiz RR, Jablonka FH, Pereira DA y Hartman L. 1985. Extraction and transesterification of vegetable oils with ethanol. *Oleagineux*, **40**, 147-151.
- Marcus Y. 1999. *The Properties of Solvents*. John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Martínez -Herrera J, Siddhuraju P, Francis G, Dávila-Ortiz G y 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**, 80–89.
- Montgomery DC. 2005. *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition Design.
- Svarovsky L. 1990. *Solid- Liquid Separation*. 3^{ra}. Ed, Butterworth & Co. Ltd.
- Thomas GC. 2003. *Análise Teórico Experimental da Extração de Óleo de Soja em Instalação Industrial do tipo Rotocell*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Ullmann's Encyclopedia of Chemical Engineering, 1995.
- Willems P, Kuipers NJM y De Haan AB. 2008. Hydraulic pressing of oilseeds: Experimental determination and modeling of yield and pressing rates. *Journal of Food Engineering*, **89**, 8-16.
- Zavala Pope JM. 1972. *Obtenção Industrial de Óleo do Farelo de Arroz*. Tese de Mestrado, UNICAMP, São Paulo, 16-23.
- Zenebon O y Pascuet NS. 2005. *Métodos físico-químicos para análise de Alimentos*. 4ed. Brasília: Ministério da Saúde/ANVISA, São Paulo: Instituto Adolfo Lutz.

Recibido: 3/8/09
 Aceptado: 22/1/10