



Modelación y optimización del proceso de extracción de aceite esencial de eucalipto (*Eucalyptus globulus*)

Modeling and optimization of extraction process of eucalyptus essential oil (*Eucalyptus globulus*)

Jeancarlos Moreno ¹, Gabriel López ², Raúl Siche ^{2,*}

¹, Consorcio Raimondi, Jr. República de Alemania N° 482 Ciudad de Dios, Guadalupe, La Libertad, Perú.

² Facultad de CC. Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

Recibido 05 Mayo 2010; aceptado 12 Junio 2010

Resumen

En el presente trabajo se estudiaron el efecto de la humedad de la hoja de eucalipto y el tiempo de extracción sobre el rendimiento de aceite esencial y el costo de producción. Se tuvieron en cuenta parámetros como la temperatura de vapor, la presión de extracción, la porosidad de lecho, flujo de vapor y temperatura de condensación. Fue utilizado un Diseño Compuesto Central Rotacional para evaluar las zonas óptimas de extracción y el costo que ocasionaría, buscando en todo momento aumentar los rendimientos y disminuir los gastos. Según este diseño, la extracción con menores costos de producción (0.57 Nuevos Soles por mL de aceite esencial) se alcanza cuando las hojas tienen una humedad entre 25 y 30% y se extraen con tiempos entre 98 y 126 min.

Palabras clave: *Eucalyptus globulus*, extracción, aceite esencial, optimización.

Abstract

In this paper we have studied the effect of the moisture from the eucalyptus leaf and the time of extraction on the yield of essential oil and the production cost. We took into account parameters such as steam temperature, pressure extraction, porous bed, steam flow and temperature of condensation. A Central Composite Rotational Design was used to evaluate optimum extraction areas and the cost that would follow, searching always to increase yields and reduce costs. According to this design, the extraction with the lowest production costs (0.57 Nuevos Soles by mL of essential oil) is reached when the leaves have moisture between 25 and 30% and are extracted with times between 98 and 126 min.

Keywords: *Eucalyptus globulus*, extraction, essential oil, optimization.

1. Introducción

El eucalipto blanco o albar "*Eucalyptus globulus*" es la especie más frecuentemente usada de este género, a nivel mundial. Aparece de forma natural en el sur de Australia (Victoria), Tasmania y las islas del estrecho de Bass, además es cultivado en el sur de Europa y California (Palomino y Calderón, 1977).

En el Perú, el ritmo de las plantaciones de eucalipto ha ido creciendo en los últimos

años, siendo una esta especie forestal con un enorme potencial en la actualidad (Álvarez *et al.*, 2000). El eucalipto tiene glándulas que segregan aceites esenciales en sus hojas, los cuales producen su característico olor y poseen componentes que pueden ser diferenciados en productos químicos de valor industrial (Álvarez *et al.*, 2000). Éstos aceites esenciales pueden extraerse mediante varios métodos: expresión, destilación con vapor de agua, extracción con solventes volátiles, enflorado y con fluidos supercríticos. En la

* Autor para correspondencia
E-mail: rsiche@unitru.edu.pe (R. Siche)

destilación por arrastre con vapor de agua, la muestra vegetal generalmente fresca y cortada en trozos pequeños, es encerrada en una cámara inerte y sometida a una corriente de vapor de agua sobrecalentado. La esencia así arrastrada es posteriormente condensada, recolectada y separada de la fracción acuosa. Esta técnica es muy utilizada especialmente para esencias fluidas, especialmente las utilizadas para perfumería. Se utiliza a nivel industrial debido a su alto rendimiento, la pureza del aceite obtenido y porque no requiere tecnología sofisticada (Martínez, 2001). Desde hace muchas décadas, se asume que el proceso está regido por la vaporización del aceite esencial “libre” o disponible en la superficie de las hojas o flores, cuando una corriente de vapor saturado atraviesa un lecho conformado por este material vegetal (Günther, 1948 citado por Cerpa, 2007). Sin embargo, el rendimiento del proceso no sigue un comportamiento como el calculado por la destilación, porque la velocidad de obtención del aceite disminuye más rápidamente, conforme el tiempo transcurre. Cerpa (2007) afirma que por lo menos existen tres fenómenos controlantes del proceso: (a) una vaporización instantánea del aceite esencial en la interfase de la película, formada en la superficie del material vegetal y el vapor circundante; (b) la difusión del aceite vaporizado al seno de la corriente del vapor circundante, debido a la convección que ejerce el vapor en el lecho, y su inmediato transporte al exterior del equipo; y (c) una exudación (o excreción) del aceite esencial desde el interior de los tricomas glandulares, a través de su cutícula, a la película superficial del material vegetal.

En este trabajo, utilizando la extracción por arrastre de vapor, se plantearon los siguientes objetivos (a) estudiar el efecto del porcentaje de la humedad de hoja y el tiempo de extracción sobre el rendimiento de aceite esencial y el costo de producción, teniendo en cuenta la temperatura de vapor, la presión de extracción, la porosidad de lecho, flujo de vapor

y la temperatura de condensación; y (b) analizar y evaluar las propiedades organolépticas, físicas y químicas del aceite obtenido, comparándolas con las establecidas por las Normas Técnicas Peruanas.

2. Materiales y métodos

Las hojas de “*Eucalyptus globulus*” provenientes del distrito de Usquil, provincia de Otuzco (Perú), utilizadas en este experimento presentaron una densidad promedio de 0.8756 g/cm³. Fueron utilizadas hojas sin presencia de magulladuras, cortes o lesiones. Se procedió al secado de las hojas seleccionadas de eucalipto en una incubadora en las condiciones mostradas en la Tabla I, condiciones que fueron variando debido al fenómeno de respiración (liberación de H₂O y energía) que ocurría en las hojas verdes.

Tabla 1

Condiciones de operación del secado de las hojas de eucalipto.

Parámetro	Inicio	Fin
Temperatura de bulbo seco (°C)	36	42
Temperatura de bulbo húmedo (°C)	27	30
Humedad relativa (%)	38	40

El tiempo de secado estuvo en función de la humedad requerida para la extracción, para lo cual fue necesario construir la curva de secado a las condiciones de operación de la incubadora. Para este fin, se colocaron muestras en la incubadora bajo las condiciones mencionadas en la Tabla 1 y pesadas cada cierto tiempo para obtener la humedad en función del tiempo. Sabiendo que la temperatura de secado varía con el tiempo no se pudo modelar según la Ley de Fick, por tanto se hizo uso de regresiones lineales y polinómicas. Las ecuaciones fueron validadas estadísticamente mediante el valor de significancia ($P < 0.05$) y los coeficientes de determinación (R^2). Las hojas ya secas fueron cortadas para aumentar el área de contacto

con el vapor de agua, el corte fue hecho manualmente y en promedio en cuadrados de 1cm de lado. La extracción del aceite esencial de eucalipto se realizó en un equipo de arrastre por vapor no convencional (Figura 1).

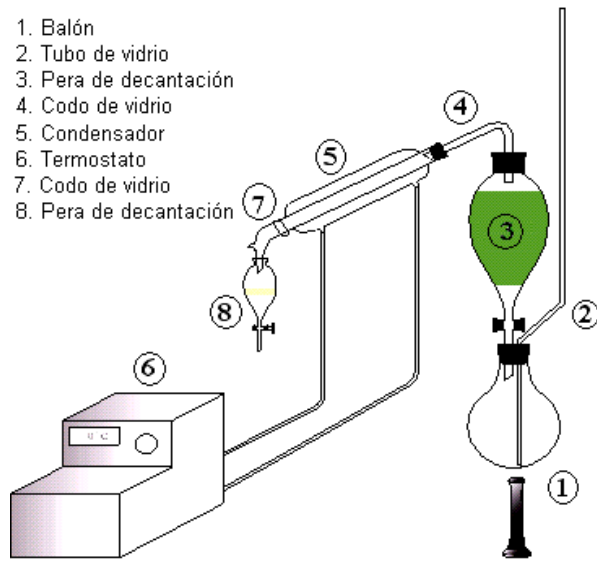


Figura 1. Esquema del equipo de extracción.

El proceso de extracción se llevó a cabo bajo condiciones obtenidas en pre-experimentos (Tabla 2).

Tabla 2
Parámetros de extracción de aceite esencial de “*Eucalyptus globulus*”.

Parámetro	Valor
Flujo de vapor (cm ³ /s)	28.96 – 33.79
Temperatura de vapor (°C)	100
Presión de extracción (atm)	1
Porosidad de lecho (%)	34.2
Altura de lecho (cm)	15
Temperatura del agua de condensación (°C)	0 – 2

Además, para evaluar el efecto de la humedad de las hojas y el tiempo de extracción en el rendimiento de la extracción y el costo, fue utilizado un Diseño Compuesto Central Rotacional de 2² + 4 puntos axiales + 3 repeticiones en el punto central (Tabla 3). El tiempo de extracción varió de 20 min (-1.41) a 140 min (+1.41), contándose desde el

instante en el que caía la primera gota en la pera de decantación. La humedad de las hojas colocadas para la extracción varió desde 12% (-1.41) a 40% (+1.41).

Tabla 3
Diseño codificado para la evaluación del efecto de humedad de hoja y el tiempo de extracción en el rendimiento y el costo del aceite esencial.

Humedad de hoja (%)	Tiempo de extracción (min)
-1	-1
-1	+1
+1	-1
+1	+1
-1.41	0
+1.41	0
0	-1.41
0	+1.41
0	0
0	0
0	0

La fase de condensación fue muy importante. Por ello, la temperatura del agua de enfriamiento se debió mantener en todo momento en un rango de 0 a 2° C. Este rango tuvo como finalidad evitar pérdidas de aceite esencial por falta de condensación de la mezcla agua-aceite. La separación de la menor porción de agua, por el poco volumen de aceite extraído, se llevó a cabo por decantación, para evitar mayores pérdidas de aceite y desnaturalización de sus componentes. El aceite esencial fue envasado en frascos ámbar de 12mL de capacidad, para luego almacenarlo a 4° C. El rendimiento (mL/100g.hoja) de la extracción fue determinada dividiendo la masa (en g) del aceite esencial obtenido entre la densidad del aceite esencial (0.9083g/mL) por cada 100g de hoja. Finalmente, el costo de cada extracción fue evaluado de la sumatoria de los costos asociados al gasto de combustible (3.2 Nuevos Soles / kg gas propano) y energía eléctrica (0.3196 Nuevos Soles / kW-h). El costo fue expresado por cada mililitro de aceite esencial obtenido.

3. Resultados y discusión

Modelación del proceso de secado

La curva de secado obtenida bajo las condiciones especificadas en la Tabla 1 se muestra en la Figura 2. La curva de secado obtenida se dividió en dos partes: la primera en donde el secado se daba a velocidad constante (-◇-), y la segunda cuando la velocidad de secado disminuye con el tiempo (-▲-).

Para la primera etapa (0-335 min y 55.17-34.35 %H), los datos se ajustaron mediante una regresión lineal (p-valor = 4.35E-25; $R^2 = 0.9989$); mientras que, para la segunda etapa (335-1328min y 34.35 y 11.33% H), los datos se ajustaron mediante una relación polinómica de segundo orden (p-valor = 1.96E-14; $R^2 = 0.9999$). Ambos modelos mostraron muy buen ajuste ($R^2 \approx 1$) y son altamente significativos ($p \ll 0.05$).

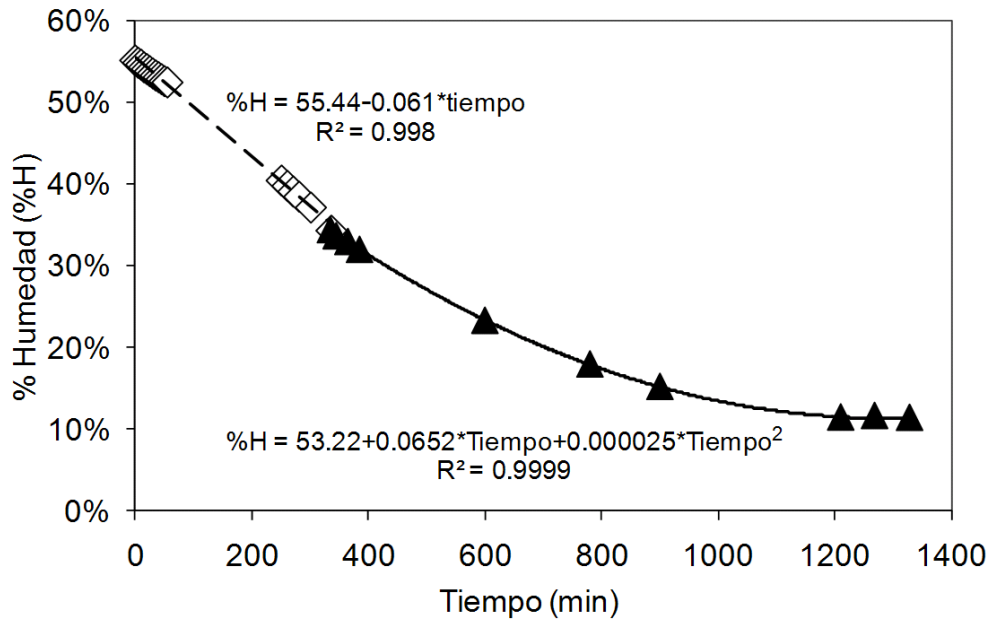


Figura 2. Curva de secado de hojas de “*Eucalyptus globulus*”.

Modelación y optimización de la extracción de aceite esencial de Eucalipto

En la Tabla 4 se muestran los resultados de la etapa de extracción. Se observa que a igual tiempo de extracción (37.6 mL/100g.hoja p.e), cuando la humedad de la hoja aumenta (de 16.1% a 35.9% p.e), el rendimiento disminuye (de 1.69 a 1.38 mL/100g.hoja). Esto significa que el rendimiento en aceite esencial se ve afectado por el proceso de secado, debido a su alta volatilidad (Vásquez *et al.*, 2001). En el caso del costo ocurre lo mismo. Por ejemplo, a las mismas condiciones anteriormente mencionadas, el costo disminuye de S/. 0.81 a 0.37 por cada mL de aceite esencial.

El mayor rendimiento (2.34mL/100g.hoja) fue obtenido con 16.1% de humedad y 122.4 min de tiempo de extracción, y el menor rendimiento (1.38mL/100g.hoja) con 35.9% de humedad y 37.6 min de tiempo. El mayor costo (S/. 0.95) está asociado con la más baja humedad (12%) y un tiempo mediano (80 min), lo que indicaría que la variable que más influye en el costo, es la humedad, debido a que a menor humedad se requiere mayor gasto energético.

Los resultados de los ensayos 9, 10 y 11 reflejan una buena repetitibilidad del proceso, ya que los valores de rendimiento y costo para estos ensayos son muy cercanos.

Tabla 4

Rendimientos y costo de la extracción de aceite esencial de Eucalipto.

Ensayo	Variables Independientes		Variables Dependientes	
	Humedad de hoja (%)	Tiempo de extracción (min)	Rendimiento (mL/100g hojas)	Costo (S./mL)
1	16.1	37.6	1.6888	0.8129
2	16.1	122.4	2.3354	0.7895
3	35.9	37.6	1.3789	0.3660
4	35.9	122.4	1.6798	0.5148
5	12.0	80.0	2.1339	0.9466
6	40.0	80.0	1.7016	0.3433
7	26.0	20.0	1.2524	0.5639
8	26.0	140.0	2.1449	0.6033
9	26.0	80.0	1.8856	0.5304
10	26.0	80.0	1.9410	0.5153
11	26.0	80.0	1.9021	0.5258

Tabla 5

Análisis de Regresión para el Rendimiento y el Costo.

Factor	Rendimiento		Costo	
	Coefficientes	p	Coefficientes	p
Media/Intercepto	1.03291	0.01301	1.75249	0.00034
(1) Humedad de hoja (%) (L)	-0.00061	0.93803	-0.06109	0.00097
Humedad de hoja (%) (Q)	-0.00005	0.69955	0.00064	0.00274
(2) Tiempo de extracción (min) (L)	0.02207	0.00400	-0.00493	0.00595
Tiempo de extracción (min) (Q)	-0.00006	0.01068	0.00002	0.01055
1L x 2L	-0.00021	0.02599	0.00010	0.00802

Tabla 6

Análisis de varianza para el Rendimiento y el Costo del proceso de extracción

Factor	Rendimiento					Costo				
	SC	GL	CM	F _{cal}	F _{tab}	SC	GL	CM	F _{cal}	F _{tab}
Regresión	1.0303	4	0.2576	47.4	4.5	0.3444	5	0.0689	115.5	5.1
Residuos	0.0326	6	0.0054			0.0029	5	0.0006		
Total	1.0629	10				0.3474	10			

Utilizando Statistica 6.0 y con los datos de la Tabla 4, se obtuvo el Análisis de Regresión (Tabla 5), del cual considerando sólo los coeficientes significativos ($p < 0.05$) se obtuvieron modelos siguientes para las variables *Rendimiento (R)* y *Costo (C)*:

$$R = 1.03291 + 0.02207t - 0.00006t^2 - 0.00021H*t$$

$$C = 1.75249 - 0.06109%H + 0.00064%H^2 - 0.00493t + 0.00002t^2 + 0.00010%H*t$$

De la Tabla 6 se observa que el modelo para el rendimiento es significativo ($F_{cal} > F_{tab}$), y junto a su alto grado de determinación ($R^2 =$

0.97; y $R^2_{ajustado} = 0.94$) indica lo adecuado del modelo para predecir esta variable. Lo mismo ocurre con el costo ($F_{cal} > F_{tab}$; $R^2 = 0.99$; y $R^2_{ajustado} = 0.98$). Esta validación estadística permite interpretar los resultados mediante las superficies de respuesta. En las Figuras 3 y 4 se muestran las superficies de respuesta y de contornos para el rendimiento y el costo en función de la humedad de hoja y el tiempo de extracción. Los menores costos se muestran en las regiones de color rojo, mientras que los costos más elevados para la extracción se dan en la región de color verde.

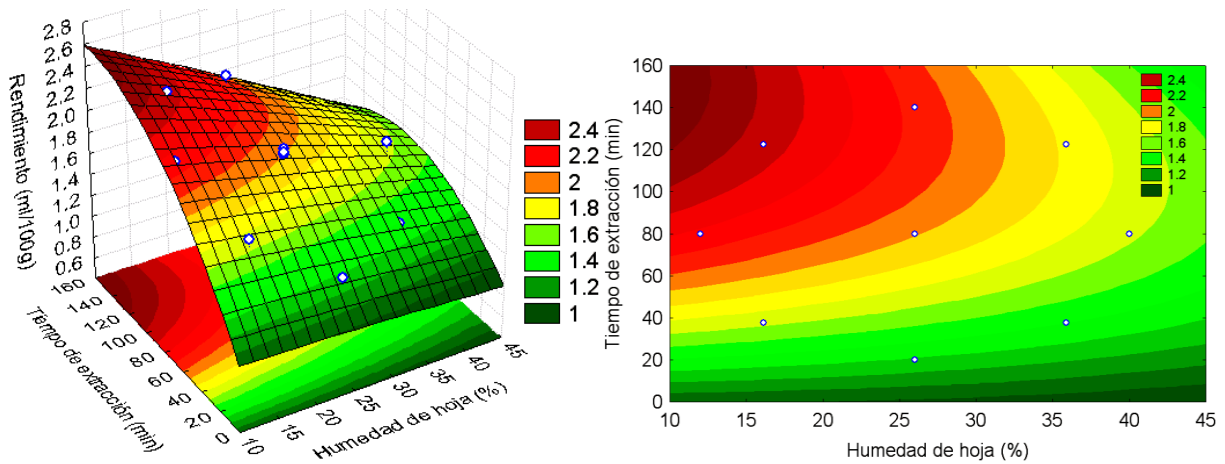


Figura 3. Superficie respuesta y de contorno para el Rendimiento.

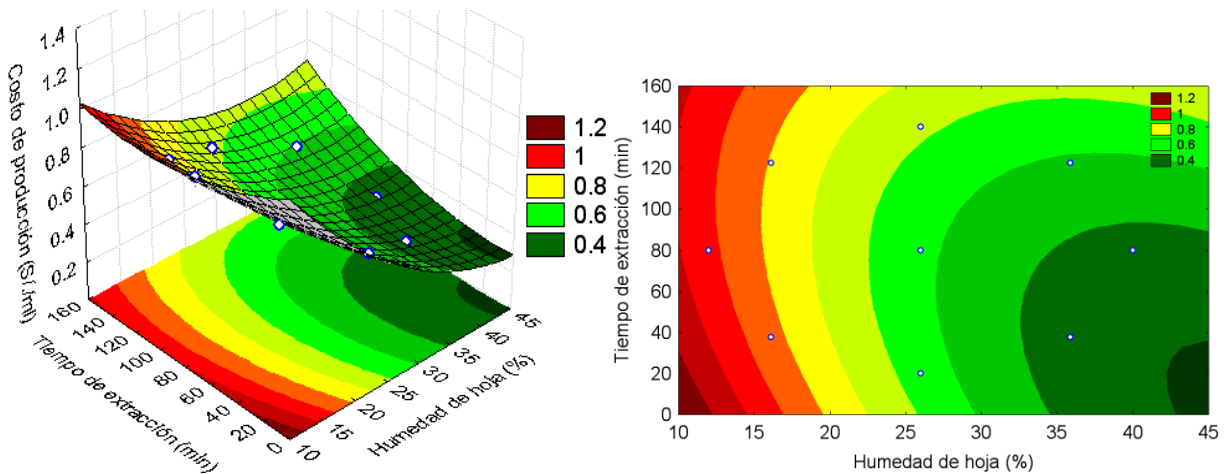


Figura 4. Superficie respuesta y de contorno para el Costo.

La optimización del proceso se realizó superponiendo las superficies de contorno de las variables (Figura 5).

Considerando que el precio del aceite esencial de eucalipto en el mercado europeo varía 0.5 a 0.8 Euros/mL (o 2.1 a 3.3 soles/mL) (FI, 2010), el considerar un costo entre 0.5 y 0.7 soles/mL resulta más que aceptable para nuestro fin. Así, el rendimiento se ubicaría entre 1.9 y 2.1 mL/100g.hoja. Para lograr tal objetivo se necesitan hojas con humedad entre 25 y 30% y tiempos de extracción entre 98 y 126 min (región blanca de la Figura 5).

Finalmente, se hicieron tres repeticiones para validar experimentalmente esta región gráfica, tomando tiempos de extracción y humedad de hoja dentro de la región óptima. Las tres repeticiones realizadas dan respuestas similares a los que se calculan con los modelos obtenidos anteriormente (Tabla 7), obteniendo desvíos relativos menores a 6%. Esto significa que los modelos encontrados, pueden ser utilizados para predecir el rendimiento de extracción y los costos de producción del aceite esencial de eucalipto con arrastre de vapor en forma óptima y con desvíos muy bajos.

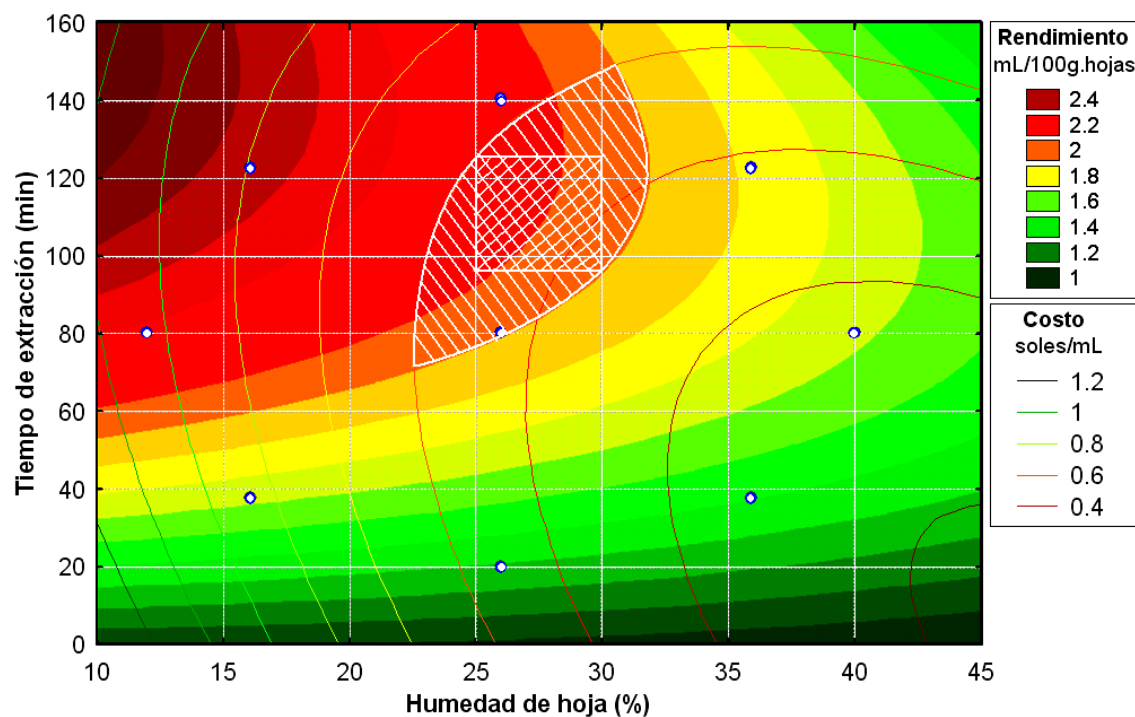


Figura 5. Optimización del proceso de extracción de aceite esencial de “*Eucalyptus globulus*”.

Tabla 7

Validación experimental del modelado de extracción de aceite esencial por arrastre con vapor.

Humedad de hoja (%)	Tiempo de extracción (min)	Rendimiento (ml/100g hojas)		Desvío relativo (%)	Costo de producción (S./ml)		Desvío relativo (%)
		Experimental	Modelo		Experimental	Modelo	
26	100	2.07	2.0939	1.16	0.56	0.5638	0.68
26	115	2.12	2.1496	1.39	0.58	0.5933	2.30
28	126	2.15	2.1203	1.38	0.56	0.5929	5.87
Promedio		2.11	2.1213	1.31	0.57	0.5833	2.95

Tabla 8

Rendimiento de extracción de aceite esencial de “*Eucalyptus globulus*”.

Fuente	Rendimientos promedios (ml de aceite por 100g de hojas)			
	Hojas frescas	Hojas secas	Tallos	No determinado
Frerichs y Zornig (1950)	0.92	3	--	--
Calderón <i>et al.</i> (1974)	--	--	--	1.61 – 2.19
Llaza (1981)	--	1.05	--	--
Chirinos y Ponciano (1994)	0.75	1.98	0.20	--
Sánchez (2006)	--	--	--	0.9
Este trabajo	--	2.11	--	--

Trabajando en condiciones óptimas, se obtiene en promedio 2.11 mL de aceite esencial de eucalipto por cada 100 g de hojas, valor superior a los reportados en la bibliografía (Tabla 8).

4. Conclusiones

Se logró optimizar el proceso de extracción de aceite esencial de eucalipto mediante el Método de Superficie Respuesta, logrando superar los rendimientos reportados en la literatura, pero sin perjudicar los costos de extracción. Operando con tiempos de extracción entre 98 y 126 min y con hojas entre 25 y 30% de humedad se obtuvieron rendimientos de 2.11 mL de aceite esencial por cada 100g de hojas. Estas condiciones generan un costo de producción promedio de 0.57 Nuevos Soles por mL de aceite esencial extraído.

Referencias

- Álvarez, D.; Chang, G.; Mendizábal, R.; Roggero, M. 2000 Seminario de Agro-negocios. Eucalipto. Universidad del Pacífico. pp. 17-33.
- Calderón, E.; De Nigrinis, S.; Calle, J. 1974 Estudio de aceites esenciales colombianos III. Aceites esenciales de eucaliptos I. Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas 3(1): 95-105.
- Cerpa, M.G. 2007. Hidrodestilación de aceites esenciales: Modelado y caracterización. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente. Universidad de Valladolid. pp. 25-53.
- Chirinos, L.; Ponciano, L. 1994. Extracción de aceite de eucalipto e identificación de sus grupos funcionales. Tesis. Universidad Nacional de Trujillo. 81pp.
- FI - Farmacia Internacional. 2010. Tienda Online. Disponible en: <http://www.farmacia-internacional.net>
- Frerichs, B.; Zornig, H. 1950. Tratado de Farmacia Práctica; Tomo II; Editorial Labor, S.A.; 3era Edición; pp. 1427-1525.
- Llaza, M. 1981. Extracción y análisis de aceites esenciales a partir de hojas de eucalipto. Tesis. Universidad Nacional de Trujillo. Escuela de Ingeniería Química. Perú. pp. 17-28.
- Martínez, A. 2001. Aceites esenciales. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. pp. 4-17.
- Palomino, E.; Calderón, E. 1977. Estudio fitoquímico del aceite esencial de "Psidium Caudatum McVaugh". Revista colombiana de Ciencias Químico - Farmacéuticas 3: 57-74.
- Sánchez, F. 2006. Extracción de aceites esenciales. II Segundo Congreso Internacional de Plantas Medicinales y Aromáticas. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. pp.4-7.
- Vásquez, O.; Alva, A.; Marreros, J. 2001. Extracción y caracterización del aceite esencial de Jengibre (*Zingiber officinale*). Revista Amazónica de Investigación Alimentaria 1(1): 38-42.