

DISEÑO DE PROCESOS
PARA LA OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES
DE PIMENTA RACEMOSA Y MORINDA CITRIFOLIA

Amaury Pérez Martínez
Isnel Benítez Cortés
Juan Esteban Miño Valdés



EDITORIAL UNIVERSITARIA

**DISEÑO DE PROCESOS
PARA LA OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES
DE *PIMENTA RACEMOSA* Y *MORINDA CITRIFOLIA***

| Amaury Pérez Martínez

| Isnel Benítez Cortés

| Juan Esteban Miño Valdés

EDITORIAL UNIVERSITARIA

**DISEÑO DE PROCESOS
PARA LA OBTENCIÓN DE ACEITES ESENCIALES
DE *PIMENTA RACEMOSA* Y *MORINDA CITRIFOLIA***

| Amaury Pérez Martínez

| Isnel Benítez Cortés

| Juan Esteban Miño Valdés

EDICIONES ESPECIALES

EDITORIAL UNIVERSITARIA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES

Cnel. José Félix Bogado 2160
Posadas – Misiones – Tel-Fax 0054 376 4428601

Correo electrónico:
ventas@editorial.unam.com.ar

Página web:
www.editorial.unam.edu.ar

Colección: Ediciones especiales
Coordinación de la edición: Claudio O. Zalazar
Diseño: Javier B. Gimenez
Revisión técnica y corrección: Juan Esteban Miño Valdés
Revisión: Luis Ramón Bravo Sánchez, Licenciado en Ciencias Química , PhD. Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador.
Walter Francisco Quezada Moreno, Ingeniero Químico, PhD. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Rio Bamba, Ecuador.

Miño Valdés, Juan Esteban
Diseño de procesos para la obtención de aceites esenciales de pimenta racemosa y morinda citrifolia / Juan Esteban Miño Valdés; Amaury Pérez Martínez; Isnel Benítez Cortés. - 1ª ed. - Posadas: Edunam - Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones, 2018.
84 p.; 23 x 16 cm.
ISBN 978-950-579-493-5
1. Industria Química. 2. Investigación Básica. Título
CDD 338.4766

Hecho el depósito de la Ley Nº 11.723
Impreso en Argentina
ISBN: 978-950-579-493-5
©Editorial Universitaria
Universidad Nacional de Misiones, Posadas, 2018
Todos los derechos reservados para la primera edición

SOBRE LOS AUTORES

Pérez Martínez Amaury, (amperez@uea.edu.cu) y (aperezmartinez2009@gmail.com)

Ingeniero Químico

Doctor en Ciencias Técnicas

Máster en Análisis de Procesos

Profesor Titular e Investigador en la Carrera de Ingeniería Agroindustrial de la Facultad de Ciencias de la Tierra en la Universidad Estatal Amazónica, Puyo Ecuador.

Profesor Titular, Investigador en el Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Camagüey Cuba.

Benítez Cortés Isnel, (isnel.benites@reduc.edu.cu)

Ingeniero Químico

Doctor en Ciencias Técnicas

Profesor Titular, Investigador en el Departamento de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Camagüey Cuba.

Decano de la Facultad de Ciencias Aplicadas de la Universidad de Camagüey “Ignacio Agramonte Loynaz”, Camagüey Cuba.

Miño Valdés Juan Esteban, (minio@fio.unam.edu.ar)

Laboratorista Químico Industrial

Ingeniero Químico.

Especialista en Gestión de la Producción y el Ambiente

Máster en Tecnología de los Alimentos

Doctor en Ciencias Técnicas.

PosDr. en Gerencia de Ciencia e Innovación en la Industria Química

PosDr. en Política Científica I+D+i para el desarrollo local.

PosDr. en Capital intangible de la Universidad para el desarrollo de la industria química

Profesor Titular Regular, Investigador categoría II, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, Argentina.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

Aceites esenciales	13
Breve reseña histórica.....	13
Función de los aceites esenciales	16
Composición química de los aceites esenciales.....	17
Ensayos de reconocimiento de los aceites esenciales	18
Usos y aplicaciones de los aceites esenciales	19
Mercado.....	20
Clasificación de los Aceites Esenciales	22
Métodos de separación	23

CAPÍTULO II

Métodos de extracción de los aceites esenciales	27
Extracción con solventes	27
Extracción sólido – líquido (lixiviación)	30
Extracción con solvente liposoluble (grasas)	32
Extracción Soxhlet.....	33
Extracción por infusión y decocción	34
Extracción por destilación.....	34
Extracción con fluidos supercríticos.....	36
Extracción por ultrasonido.....	38
Extracción por microonda.....	39

CAPÍTULO III

Estrategia para la creación de nuevas capacidades	
industriales	41
Procedimiento para el diseño del proceso	41
Pasos de la metodología	42

CAPÍTULO IV

Aceite esencial de Pimenta racemosa	49
Pasos para la obtención	49
Paso 1. Producto	49
Paso 2. Selección de la tecnología	52
Paso 3. Definición del esquema tecnológico.....	52
Paso 4. Estimación de la capacidad de la planta.....	53
Paso 5. Realización del estudio de macro localización.....	54
Paso 6. Realización de los balances de masa y energía	54
Paso 7. Constatación de la disponibilidad y consumo de la ma- teria prima.....	58
Paso 8. Constatación de la compatibilidad ambiental	59
Paso 9. Realización de modificaciones tecnológicas.....	60
Paso 10. Determinación de la capacidad de los equipos y el costo de adquisición.....	60
Paso 11. Determinación de la disponibilidad de los equipos....	61
Paso 12. Control automático del proceso	62
Paso 13. Realización del análisis económico.....	62
Paso 14. Optimización.....	63
Paso 15. Alternativa económicamente factible	64
Paso 16. Existen otras tecnologías	64
Paso 17. Existen nuevas capacidades.....	65
Paso 18. La tecnología y capacidad.....	65

CAPÍTULO V

Aceite esencial de Morinda citrifolia	67
Pasos para la obtención	67
Paso 1. Producto	67
Paso 2: Selección de la tecnología	68
Pasos 3 y 4: Definición del esquema tecnológico y de la capaci- dad de la planta.....	69
Paso 5. Realización del estudio de macro localización.....	70
Paso 6. Realización de los balances de masa y energía	70
Paso 7 y 8. Constatación de la disponibilidad y consumo de la materia prima y la compatibilidad ambiental	70
Paso 9. Realización de modificaciones tecnológicas.....	71
Paso 10 y 11. Determinación de la capacidad y disponibilidad de los equipos y el costo de adquisición	71
Paso 12. Control automático del proceso	71
Paso 13. Realización del análisis económico.....	72

CAPÍTULO VI	
Estudios de sensibilidad	73
Resultados obtenidos durante la simulación del Caso base en el SuperPro Designer.....	74
Resultados obtenidos para el estudio de sensibilidad N° 1	75
BIBLIOGRAFÍA	79

CAPÍTULO I

ACEITES ESENCIALES

Breve reseña histórica

Las plantas, como organismos sedentarios, tienen que ajustar su ciclo de vida al medio ambiente que las rodea. Con el fin de compensar la inmovilidad, ellas han desarrollado mecanismos para su interacción con el ambiente, que incluyen el desprendimiento de numerosos compuestos volátiles de sus hojas, flores y frutas hacia la atmósfera, así como de las raíces y rizomas hacia el suelo. A estos compuestos volátiles se les denomina aceites esenciales. En la actualidad, se han identificado cerca de 1.700 componentes volátiles de más de 90 familias de plantas. Estos compuestos constituyen alrededor del 1% de los metabolitos secundarios de las plantas conocidos hasta la fecha.

Un aceite esencial o aceite etéreo refiere a metabolitos secundarios de las plantas lipofílicas y altamente volátiles alcanzando una masa por debajo de su peso molecular de 300, que se puede separar físicamente de otros componentes de la planta o tejido membranoso. Según lo definido por la Organización Internacional de Normalización, el término “aceite esencial” está reservado para un “producto obtenido a partir de materia prima vegetal, ya sea por destilación con agua o vapor, o desde el epicarpio de los cítricos mediante un proceso mecánico, o por destilación seca” (ISO 9235,1997), es decir, únicamente por medios físicos. Por consiguiente, los aceites esenciales más disponibles en el mercado se obtienen por hidrodestilación.

Se trata de productos químicos intensamente aromáticos, no grasos, volátiles y ligeros (poco densos). Son insolubles en agua, levemente solubles en ácido acético y solubles en alcohol, grasas, ceras y aceites vegetales. Se oxidan por exposición al aire.

Los aceites esenciales son mezclas de varias sustancias químicas biosintetizadas por las plantas, que dan el aroma característico a algunas flores, árboles, frutos, hierbas, especias, semillas y a ciertos extractos de origen animal (almizcle, civeta, ámbar gris). Se trata de productos químicos intensamente aromáticos, no grasos (por lo que no se enrancian), volátiles por naturaleza (se evaporan rápidamente) y livianos (poco densos). Son insolubles en agua, levemente solubles en vinagre, y solubles en alcohol, grasas, ceras y aceites vegetales. Se oxidan por exposición al aire. Se han extraído más de 150 tipos, cada uno con su aroma propio y virtudes curativas únicas.

La proporción de estas sustancias varía de un aceite esencial a otro, incluso dentro de una misma especie, dándoles propiedades medicinales y de toxicidad característica para cada planta. Estas proporciones varían en función del momento de recolección de la planta, dependiendo del acondicionamiento de la especie a ser extraída y del tipo de extracción, se obtendrán aceites esenciales de mayor o menor calidad.

Se plantea que son la quinta esencia de la planta, es decir, sus hormonas vegetales y constituyen la reserva energética que ayuda a proteger y reforzar la inmunidad de la especie vegetal. Son productos de composición generalmente muy compleja que contienen los principios volátiles que se encuentran en los vegetales más o menos modificados durante su preparación.

En algunos casos, se distribuyen uniformemente por todas las células, como en el caso de los pétalos de rosa, que necesitan un proceso de extracción especial. También pueden localizarse en las denominadas bolsas secretoras, que son sacos que almacenan aceite y en su parte superior contienen las células o glándulas secretoras que los producen y van llenando la bolsa. El ejemplo más claro es el de la corteza de naranja, limón, mandarina y de otras 24 plantas de la familia de las rutáceas. Si se frota fuertemente la corteza saldrá el aceite esencial como consecuencia de la rotura de las bolsas secretoras.

Las umbelíferas, como el anís y el comino, contienen canales o tubos secretores que por su parte interior están forrados de células secretoras. Si se observan sus frutos en el microscopio se pueden ver multitud de orificios, que son en realidad las salidas de los canales secretores. Las labiadas, como el tomillo o el orégano tienen los denominados pelos secretores, que tienen una gran célula en su parte

inferior, rodeada de células secretoras. Esta célula se llena como un balón de la secreción aromática.

Se desconoce la función exacta de un aceite esencial en un vegetal; puede ser para atraer los insectos para la polinización, o para repeler a los insectos nocivos, o puede ser simplemente un producto metabólico intermedio. Así mismo, los aceites esenciales son productos químicos que forman las esencias odoríferas de un gran número de vegetales. El concepto “aceite esencial” se aplica también a las sustancias sintéticas obtenidas a partir del alquitrán de hulla, y a las sustancias semisintéticas preparadas a partir de los aceites esenciales naturales. Éstos son usados en un amplio rango de alimentos, perfumes, productos cosméticos, farmacéuticos y detergentes.

Los aceites esenciales normalmente adquieren el nombre de la planta de las que se derivan. Las plantas que contienen estos aceites esenciales incluyen un rango generoso de especies, que se utilizan por su valor aromático como condimentos en comidas y bebidas, como fragancias en farmacéuticos y como productos industriales en cosméticos, que son comercializados en todo el mundo. Por otra parte, son considerados las “armas químicas” de las plantas ya que sus olores son capaces de detener insectos y protegerá las plantas del ataque de bacterias y hogos.

Estos son frecuentemente llamados “la fuerza vital de las plantas”, son extraídos de flores, hojas, tallos, raíces, semillas, cortezas y cáscaras de frutas. La cantidad de aceites esenciales encontrados en estas plantas puede estar en 0.01- 10 % del total. Estos aceites tienen potentes propiedades antimicrobianas, espasmolítica, hepatoprotectora, antiviral, anticancerígena, entre otras teniendo gran variedad de componentes terapéuticos, a menudo son utilizados por su sabor y olor, en una selección ancha de productos como comidas, la medicina, y los cosméticos.

Aunque la química de los aromas se inició entre los finales de la década de los 60 y principios de los 70 del siglo pasado en los EE.UU., Europa y Japón, la historia recoge el hecho que la reina Cleopatra conocía sobre los poderes de los aceites esenciales, y se platea que utilizó el aceite esencial de rosas para cegar a Marco Antonio con su belleza.



Figura 1: Historia de los aceites esenciales.

Fuente: <https://pt.slideshare.net/johnjdriguez/historia-de-los-aceites-esenciales>

Con la introducción de la cromatografía de gases, a partir de mediados de la década de los 60, de su acoplamiento primero a la espectrometría de masas y después a las técnicas de olfatometría, la introducción y perfeccionamiento de todo un sistema computacional para el manejo de la información generada, esta especialidad de la química ha alcanzado en la actualidad un gran avance, particularmente en países altamente desarrollados. Este desarrollo del conocimiento nos ha llevado desde obtener largas listas de compuestos químicos volátiles encontrados en las plantas, a los estudios de su aroma y sabor. Es improbable que ésta sea la última frontera del conocimiento en este campo. Lo que, si resulta evidente, es que la naturaleza nos ha dejado compartir fácilmente sus secretos del aroma y el placer que proporciona en nuestras vidas diarias, muchos han sido los esfuerzos por desentrañar tan apasionado mundo.

Con frecuencia se suele confundir el término esencia o fragancia, con el de aceite esencial. Existen esencias fabricadas sintéticamente, similares a los aceites esenciales naturales y que son utilizadas en la industria de la cosmética y de los productos de limpieza. Estas esencias no son adecuadas para el uso médico, debiendo utilizarse en este caso tan sólo los aceites esenciales obtenidos por destilación de la planta en su estado natural (fresca o desecada).

Función de los aceites esenciales

En general, la función biológica de los aceites esenciales sigue estando poco clara, siendo probable que tengan un papel ecológico. Como parte a esta hipótesis, se han establecido experimentalmente el papel de alguno de ellos como inhibidores de la germinación, protección contra los depredadores y atracción de polinizadores.

Composición química de los aceites esenciales

Los componentes que proporcionan mayor calidad a los aceites son los compuestos oxigenados, principalmente los aldehídos, cetonas, alcoholes y ésteres. Los aldehídos proporcionan el aroma típico del aceite esencial y adquieren importancia para los cítricos, el neral y el general (mezcla citral) y el etanal, entre otros. Entre las cetonas son de especial interés la carvona, la piperitona, la 2- decanona sesquiterpeno y la notkatona.

En el caso de los alcoholes, se han encontrado alifáticos, saturados e insaturados, entre los que se destacan el metanol, n-hexanol, 3-hexen-1ol y heptanol entre otros. Respecto a los alcoholes terpénicos acíclicos o monocíclicos se encuentran el genariol, citronelol, nerol, linalool y sesquiterpenos como el farnesol o elemol.

Actualmente se han identificado alrededor de 400 componentes químicos constituyentes de los aceites esenciales. La mezcla compleja que integra los aceites esenciales pertenecen, de manera casi exclusiva, a grupos característicos distintos: el grupo de los terpenos, el grupo de los compuestos derivados del fenilpropano, los terpenos originarios del ácido acético y otros como los compuestos procedentes de la degradación de terpenos. Los monoterpenos y sesquiterpenos son terpenos de 10 y 15 átomos de carbonos. La figura 2 muestra algunos de los compuestos químicos que están presentes en los aceites esenciales y que son responsables de sus aromas.

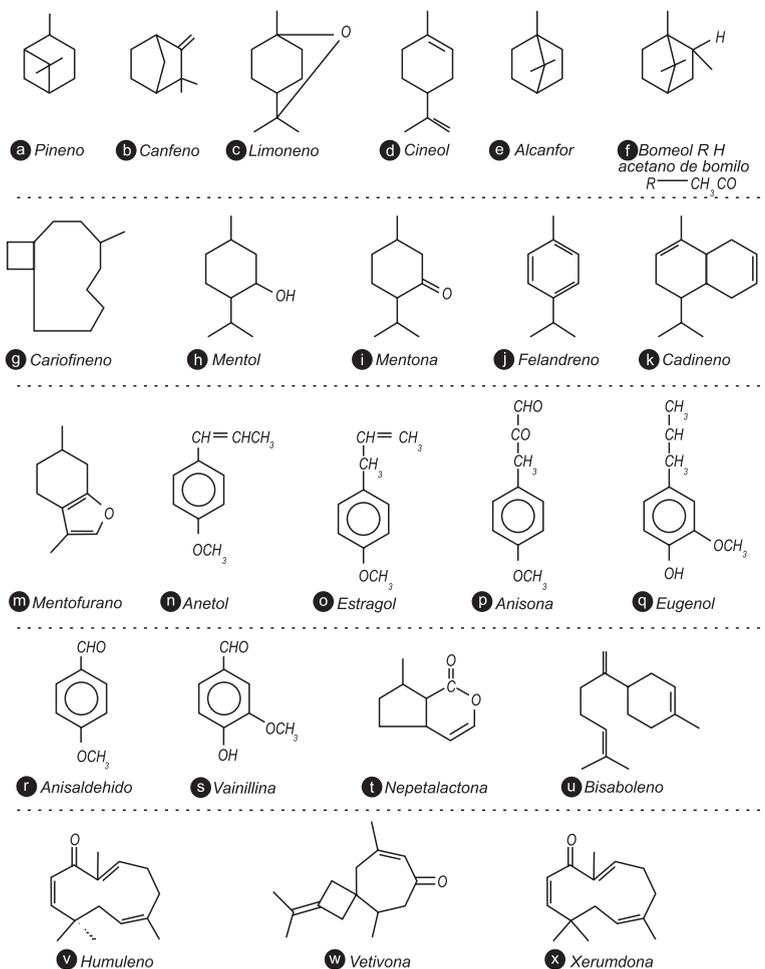


Figura 2: Muestra de algunos de los componentes de los aceites esenciales

Fuente: <http://www.quieroapuntes.com/aceites-esenciales.html>

Ensayos de reconocimiento de los aceites esenciales

Debido a la diversidad de grupos funcionales que pueden estar presentes en los componentes mono y sesquiterpénicos de un aceite esencial no existe una prueba específica para su reconocimiento. Sin embargo, existen técnicas que permiten reconocer algunos de ellos entre los que se pueden mencionar: índice de refracción, cromatografía, espectrofotometría e infrarrojo, entre otros. Entre las técnicas

y procedimientos usados para determinar los componentes asociados a los aceites esenciales se pueden mencionar: aroma, peso específico, índice de refracción, desviación óptica (poder rotatorio), cromatografía, espectrales, tales como infrarrojo y ultravioleta y espectrometría de masa.

La mayoría de monoterpenos y sesquiterpenos se encuentran en los aceites esenciales y a partir de ellos es posible realizar su aislamiento mediante la utilización de uno o varios métodos cromatográficos. Actualmente se utilizan técnicas de separación eficientes y rápidas como la cromatografía líquida de alta eficiencia la cromatografía de gases.

Adicionalmente, la técnica acoplada cromatografía de gases y espectrometría de masas, permite obtener el espectro de masas de cada componente con el cual se obtiene el peso molecular e información estructural. Así mismo existen bases de datos con los espectros de masas de muchos componentes y es un criterio para la asignación química de muchos componentes de aceites esenciales, no sólo monoterpenos sino también otros tipos de sustancias características de dichos aceites.

Usos y aplicaciones de los aceites esenciales

De los más de tres mil aceites esenciales analizados, se ha encontrado que más de 200 tienen un alto valor comercial y se utilizan ampliamente en diferentes ramas de la industria: alimentos, jabones, ambientadores, perfumes, cosméticos, licores, insecticidas, fármacos, etc. Son empleados como aromatizantes y/o saborizantes (vainilla, anís, eneldo, hinojo, limón, naranja, etc.), como ingredientes de algunos preparados farmacéuticos (caléndula, eucalipto, manzanilla, menta, salvia, etc.) o son base de perfumes y productos cosméticos finos, desodorantes, lociones, jabones líquidos, pastas dentífricas. Algunos de los aceites esenciales poseen propiedades insecticidas y funguicidas y se utilizan en los preparados especiales.

El mercado para aceites esenciales, muestra una tendencia creciente para los años venideros, debido a que son más fáciles de usar en los procesos industriales. Además dichos aceites son más concentrados, estables y tienen una mayor calidad microbiológica, lo que compensa sus mayores costos.

Mercado

El volumen comercial de productos aromáticos (exportaciones e importaciones) se ha incrementado durante la década del 90, estableciendo su expansión comercial. En los últimos tres años, el comercio exterior alcanzó un promedio de 97,6 millones de dólares (USD), de los cuales 49,9 millones de USD, corresponden a exportación y 47,7 millones USD a importación. Cuando se identifican grupos específicos, se puede observar un fuerte superávit comercial en el caso de los aceites esenciales (29,4 millones de USD) con una tendencia positiva.

En la actualidad hay alrededor de 300 aceites esenciales usados por profesionales de la industria farmacéutica. Las plantas y aceites continúan siendo temas de estudio científicos e investigaciones en todo el mundo, dada su importancia y utilidad.

La industria del aroma y la fragancia a nivel mundial, hoy posee un estimado de unos 2 billones USD, con una tasa de crecimiento estimada en 3.5 % anual.

Estos aceites se pueden extraer de diferentes partes de la planta, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Lugares de extracción de aceites esenciales en plantas

Hojas	Flores	Cáscaras	Semillas	Maderas
Albahaca	Manzanilla	Bergamota	Almendra	Alcanfor
Árbol Bahía	Salvia	Grifú	Anís	Cedro
P. Gorda	Clavo	Mejorana	Apio	Palo rosa
Canela	Geranio	Limón	Nuez moscada	Sándalo
Eucalipto	Hisopo	Lima		
Limón	Jazmín	Naranja		
Orégano	Lavanda		Mandarina	
Hierba buena	Pachulí			
Menta	Naranja			
Pino	Rosa			
Romero	Ylang-ylang			
Menta				
Té				
Tomillo				

A continuación, se muestran las aplicaciones de algunos aceites de diferentes plantas.

Ylang-ylang o flor de cananga: Es un árbol oriundo de la India, Java y Filipinas, de la familia de las anonáceas y que se ha extendido a muchos países de la zona intertropical, en especial a Centroamérica y el norte de Sudamérica siendo muy abundante en las regiones cálidas del norte de Venezuela. La flor es verdosa-amarillenta y raramente rosa; es crespada como una estrella de mar y brinda un aceite esencial.



Figura 3: Aceite del Ylang-ylang

Fuente: <https://www.masmusculo.com.es/health/descubriendo-aceite-esencial-ylang-ylang/>

El nombre Ylang-ylang deriva del idioma tagalo, tanto del término *ilang*, significa “asilvestrado”, aludiendo a su hábitat natural, o a la palabra *ilang-ilan* “raro”, sugestivo de su excepcionalmente delicada esencia. Es una planta nativa de Filipinas e Indonesia y comúnmente crece en Polinesia, Melanesia, Micronesia.

La fragancia de Ylang-ylang es rica y profunda con notas de goma y de crema, y dejos de jazmín y nerolí. Los componentes aromáticos del aceite de Ylang-ylang son benzilacetato, linalol y p-crelimetiléter y metilbenzoato, responsable de su característico olor.

El aceite esencial de Ylang-ylang se usa en aromaterapia. Se cree que mejora la hipertensión, normaliza la secreción de sebo en pieles problemáticas, y se considera un afrodisiaco. El aceite de Ylang-ylang es ampliamente usado en perfumería para toques orientales o florales (como Chanel N° 5). En Indonesia, las flores de Ylang-ylang se desparraman en la cama de los esponsales. En Filipinas, sus flores, con las de sampaguita, se arman para lazo de cuello y la

usan las mujeres para adornar imágenes religiosas. El Ylang-ylang es también antidepresivo, reduce ansiedad y actúa como sedante. Es muy útil en situaciones de hiperventilación, taquicardia y ataques de pánico y resulta insustituible en la elaboración de productos cosméticos de fama mundial, formando parte de las preparaciones más finas de estos productos.

Clasificación de los Aceites Esenciales

Los aceites esenciales se clasifican con base en diferentes criterios: consistencia, origen y naturaleza química de los componentes mayoritarios.

- **Según su consistencia:** los aceites esenciales se clasifican en esencias fluidas, bálsamos y oleorresinas. Las esencias fluidas son líquidos volátiles a temperatura ambiente. Los bálsamos son de consistencia más espesa, son poco volátiles y propensos a sufrir reacciones de polimerización, son ejemplos: el bálsamo de Copaiba, el bálsamo del Perú, Benjuí y bálsamo de Tolú. Las oleorresinas tienen el aroma de las plantas en forma concentrada y son típicamente líquidos muy viscosos o sustancias semisólidas como por ejemplo caucho, gutapercha, oleorresina de paprika, de pimienta negra, de clavel.
- **Según su origen:** se clasifican como naturales, artificiales y sintéticos. Los naturales se obtienen directamente de la planta y no sufren modificaciones físicas ni químicas posteriores, y debido a su rendimiento tan bajo son muy costosas. Los artificiales se obtienen a través de procesos de enriquecimiento de la misma esencia con uno o varios de sus componentes, por ejemplo, la mezcla de esencias de rosa, geranio y jazmín enriquecidas con linalol, o la esencia de anís enriquecida con anetol. Los aceites esenciales sintéticos como su nombre lo indica son los elaborados a partir de la combinación de sus componentes los cuales son la mayoría de las veces producidos por procesos de síntesis química. Estos son más económicos y por lo tanto son mucho más utilizados como aromatizantes y saborizantes como por ejemplo esencias de vainilla, limón, fresa.
- **Según su naturaleza química:** a pesar de su composición compleja los aceites esenciales se pueden clasificar de acuerdo con los componentes mayoritarios. Según esto los aceites esenciales

ricos en monoterpenos se denominan aceites esenciales monoterpénicos, por ejemplo: hierbabuena, albahaca, salvia. Los ricos en sesquiterpenos son los aceites esenciales sesquiterpenos, por ejemplo: la copaiba, pino, junípero. Los ricos en fenilpropanos son los aceites esenciales fenilpropanoides, por ejemplo: clavo, canela, anís. Aunque esta clasificación es muy general resulta útil para estudiar algunos aspectos fotoquímicos de los monoterpenos, los sesquiterpenos y los fenilpropanos, sin embargo existen clasificaciones más complejas que tienen en cuenta otros aspectos químicos. En el caso del aceite esencial de mandarina los grupos funcionales que se encuentran presentes son el limoneno, linalool, citronellol, citral, careno, pineno cardineno, entre otros.

Métodos de separación

Los métodos de separación de fases de mezclas son aquellos procesos físicos por los cuales se pueden separar los componentes de una mezcla. Por lo general, el método a utilizar se define de acuerdo al tipo de componentes de la mezcla y a sus propiedades particulares, así como las diferencias más importantes entre las fases. La separación es la operación en la que una mezcla se somete a algún tratamiento que la divide en, al menos, dos sustancias diferentes. En el proceso de separación, las sustancias conservan su identidad, sin cambio alguno en sus propiedades químicas. Entre las propiedades físicas de las fases que se aprovechan para su separación, se encuentra el punto de ebullición, la solubilidad, la densidad y otras más. Los métodos de separación de mezclas más comunes son los siguientes:

- **Filtración:** es el método que se usa para separar un sólido insoluble de un líquido. El estado de subdivisión del sólido es tal que lo obliga a quedar retenido en un medio poroso o filtro por el cual se hace pasar la mezcla. Este método es ampliamente usado en varias actividades humanas, teniendo como ejemplos de filtros los percoladores para hacer café, telas de algodón o sintéticas, coladores o cribas caseros y los filtros porosos industriales, de cerámica, vidrio, arena o carbón. No obstante, al obtenerse una mezcla líquida, que solo difieren en sus densidades, no es posible utilizar la filtración como método de separación.

• **Imantación o separación por magnetismo:** es un método que consiste en separar una mezcla en la que una de las sustancias tiene propiedades magnéticas, es decir, se utiliza un material que contenga un campo magnético para separar las sustancias metálicas en la mezcla, como la extracción de las limaduras de hierro en una mezcla con arena. En el momento en que se encuentra esta investigación, no existen criterios de que algún componente de la mezcla sea ferromagnético y que pueda separarse por este método, por lo que se desecha.

• **Extracción:** es un método que consiste en tratar una mezcla con un disolvente líquido para separar algunos de sus componentes, ya sea por el arrastre de una sustancia, como en la extracción del almidón, o porque una fase es soluble en el líquido y por ende se separa del resto de la mezcla, no soluble. Es una mezcla de dos elementos o más. Este método resulta caro, sobre todo si se tienen en cuenta el costo que puede tener el solvente, aun cuando exista la posibilidad de su regeneración. El mismo conlleva a otro proceso de separación del solvente y el aceite, aspecto este que continuaría encareciendo el proceso.

• **Lixiviación selectiva:** este método de separación consiste en extraer, por medio de disolventes orgánicos, aceites esenciales de plantas aromáticas o medicinales. La lixiviación es común en la confección de perfumes, productos de limpieza y medicamentos. De igual manera, se utiliza en la extracción de minerales en las minas como las esmeraldas, joyas, diamantes. Este método requiere un análisis similar al de extracción con solvente.

• **Flotación:** es en realidad una forma de decantación. Se utiliza para separar un sólido con menos densidad que el líquido en que está suspendido, por ejemplo, en una mezcla de agua y pedazos de corcho. Este método lleva un análisis similar al de la filtración.

• **Cromatografía:** comprende un conjunto de diversos métodos de separación de mezclas muy útiles en la industria como en la investigación. Se utiliza para separar e identificar mezclas complejas que no se pueden separar por otros medios. Existen varios métodos cromatográficos: de papel, de capa delgada o capa fina, de columna y de gas. Todos, sin embargo, utilizan como principio la propiedad de capilaridad por la cual una sustancia se desplaza a través de un medio determinado. El medio se conoce como fase estacionaria y la sustancia como fase móvil. Por ejemplo, si un refresco cae sobre una servilleta de papel, aquél

busca ocupar toda la superficie de ésta. En este caso, la servilleta es la fase estacionaria y el refresco, la fase móvil. La cromatografía aprovecha estas diferencias (de solubilidad) para separar una mezcla: el componente más soluble se desplaza más rápido por la fase estacionaria, y los otros quedan rezagados. Para identificar las sustancias se les puede agregar algún tipo de coloración antes de separarlas. Este es un método muy caro, que debe justificarse bien, técnica y económicamente, su aplicación en un sistema dado.

- **Decantación:** se utiliza para separar líquidos que no se disuelven entre sí (como agua y aceite) o un sólido insoluble en un líquido (como agua y arena). El aparato utilizado, que se muestra en la fotografía, se llama ampolla o embudo de decantación. La decantación es el método de separación más sencillo, y comúnmente es el preámbulo a utilizar otros más complejos con la finalidad de lograr la mayor pureza posible. Para separar dos fases por medio de decantación, se debe dejar la mezcla en reposo hasta que la sustancia más densa se sedimente en el fondo. Luego dejamos caer el líquido por la canilla, cayendo en otro recipiente, dejando arriba solamente uno de los dos fluidos. Este método es de todos el más barato y cumple con las necesidades del proceso, teniendo en cuenta, fundamentalmente, las diferencias de densidades entre el aceite y el agua. Por tales motivos, se decide utilizar este método para la separación de la mezcla.

CAPÍTULO II

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES

La extracción es un procedimiento de separación de una sustancia que puede disolverse en dos solventes no miscibles entre sí, con distinto grado de solubilidad y que están en contacto a través de una interface. Esta es una operación unitaria de transferencia de materia basada en la disolución de uno o varios de los componentes de una mezcla (líquida o que forme parte de un sólido) en un disolvente selectivo. Aprovecha, por tanto, la diferencia de solubilidades de los componentes de la mezcla en el disolvente añadido. Se hace la distinción entre la extracción líquido-líquido y la extracción sólido-líquido (llamada también lixiviación) según que la materia a extraer esté en un líquido o en un sólido respectivamente. Existen varias formas de lograr la extracción de los aceites esenciales de plantas, las cuales son descritas a continuación

- **Extracción con solventes**

La extracción sólido-líquido o lixiviación es un proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido. Esta tiene una gran importancia en el ámbito de la metalurgia ya que se utiliza, mayormente, en la extracción de algunos minerales como oro, plata y cobre, así como en la obtención de aceites esenciales a partir de plantas y semillas.

El método de extracción con solventes se usa en las plantas que resultan frágiles al someterse a procesos de extracción por destilación. Se usan los solventes químicos para disolver el aceite esencial,

así como las ceras y resinas, del material de la planta. El solvente se vaporiza y los aceites esenciales pasan a la fase vapor al ponerse en contacto con las hojas o pétalos. Dentro de los sistemas de obtención, se destacan los procesos de extracción sólido – líquido, usando diferentes solventes y relaciones de concentración. En la extracción sólido-líquido el soluto está inicialmente en la fase sólida, la cantidad de soluto que se disuelve estará limitada por la saturación de la disolución que será función de la temperatura y la presión, procesos estos controlados por etapas de difusión que inciden en el rendimiento y velocidad de extracción.

La elección del disolvente depende de parámetros técnicos y económicos selectividad, estabilidad, inercia química, temperatura de ebullición no demasiado elevada para permitir su eliminación total, no demasiado baja para evitar las pérdidas; seguridad de manipulación (si es posible no tóxico ni inflamable). Los disolventes más utilizados son los hidrocarburos alifáticos: éter de petróleo, hexano, y también propano o butano líquido (a presión). Aunque el benceno es un buen disolvente, su toxicidad limita cada vez más su utilización. Igualmente, se ha recurrido a disolventes halogenados y al etanol. También se utilizan otros solventes como soluciones ácidas o alcalinas para la extracción selectiva de algunos compuestos, sin embargo, se debe tener precaución con el pH de las mezclas para prevenir hidrólisis o reordenamiento de compuestos sensibles.

Los métodos convencionales aplicados para la obtención de extractos vegetales emplean solventes orgánicos en caso de bajas volatilidades de los aceites y de alta toxicidad, que representan un riesgo para la salud y para el ambiente. Entre estos se encuentran la extracción con solventes liposolubles (grasas). En este método, se ponen las flores en las capas de grasa que absorbe los aceites esenciales. Los aceites esenciales se extraen entonces de la grasa saturada en aceite con alcohol como solvente. Aunque es un método muy antiguo, no resulta viable económicamente en nuestros días.

Esta tecnología se utiliza a escala de laboratorio pues a escala industrial resulta muy costosa debido al valor comercial de los disolventes, porque se obtienen esencias impurificadas con otras sustancias y, además, por el riesgo de explosión e incendio característico de muchos disolventes volátiles.

Los aceites obtenidos a través de este proceso, se conocen como oleorresinas, concretos y absolutos, dependiendo del solvente usado para el proceso. Factores como el tipo de planta, composición del

aceite y parte de la planta de donde son extraídos, influyen considerablemente en los rendimientos del proceso. Las flores usadas comercialmente para obtener extractos de aceites son el jazmín, la rosa, la tuberosa, la champaka, magnolia y el Ylang-ylang. También se destacan la salvia (*Salvia officinalis*), la *Ptychotis verticillata*, la *Vitexagnuscastus L.* y el limón (*Citrusx limón*).

En relación a esto, las industrias desarrollan nuevas técnicas de separación, que garanticen una eficiencia superior en la extracción y calidad de los productos, entre los que se encuentran la extracción por ultrasonido, la Extracción por microonda, además de la Extracción con fluidos supercríticos que es una de las alternativas viables que coincide con las exigencias del mercado actual, ya que se pueden utilizar solventes atóxicos como el dióxido de carbono. La figura 4 muestra un esquema de la extracción con solventes.



Figura 4: Extracción con solventes

Fuente: <http://www.lineaysalud.com/que-es/macerar-maceracion>

Velocidad de extracción y factores influyentes

La velocidad de extracción está controlada por la difusión del soluto a través de los poros y desde la superficie hacia el seno de la solución. La difusión del soluto a través de poros del sólido residual (factor controlante 1) se soluciona a través de la reducción de tamaño del material a tratar (materia prima), con la ventaja de reducir la distancia que recorre el soluto hacia la superficie. Otro de los parámetros que aumentan esta difusión es el incremento de temperaturas hasta

niveles en los cuales no se produzcan alteraciones en la composición de los aceites. Por otra parte, el uso de solventes selectivos al aceite y de baja viscosidad, permiten que se logre una mejor transferencia de masas, aumentando la velocidad y eficiencia del proceso. En el caso del factor controlante 2, la difusión del soluto desde la superficie de la partícula hasta el seno de la solución, se soluciona a través del alto grado de agitación del fluido, lo que aumenta la velocidad de transferencia de masa.

De forma general, los principales factores que influyen en la velocidad de extracción son: el tamaño de partícula, el solvente de extracción, la agitación del fluido y la temperatura. La reducción de partículas tiene gran importancia, porque aumenta el área de contacto y disminuye el tiempo necesario para la extracción, sobre todo para sólidos de baja porosidad. La concentración del solvente es importante para soluciones acuosas, debido a la saturación y a la existencia de reacciones químicas. Sin embargo, es de poca importancia cuando la extracción es controlada por difusión.

En el caso de la agitación, un incremento de la misma brinda una mayor eficiencia en la extracción debido a que disminuye la película de fluido que cubre la superficie del sólido en reposo y que actúa como una resistencia a la difusión. En cuanto al efecto de la temperatura, un incremento de la misma aumenta la velocidad de extracción porque la solubilidad es mayor, aspecto este que lo hace muy favorable en procesos de reacción química. La temperatura máxima para cada sistema está limitada por el punto de ebullición del solvente, el punto de degradación del producto o del solvente, solubilidad de impurezas y por economía. Por otra parte, a temperaturas elevadas la viscosidad del líquido es menor y mayores los valores de difusividad, esto incrementa la velocidad. No obstante, en el caso de algunos productos naturales como el Noni, las temperaturas muy elevadas pueden producir la lixiviación o extracción de solutos indeseables o deterioro químico del fruto.

• **Extracción sólido-líquido (lixiviación)**

La extracción sólido-líquido o lixiviación es una operación para separar los constituyentes solubles de un sólido inerte con un solvente. El proceso completo de extracción suele comprender la recuperación por separado del solvente y del soluto. Tiene gran importancia en un gran número de procesos industriales. Muchos productos orgánicos naturales se separan de sus estructuras originales mediante

lixiviación. Por ejemplo, los aceites vegetales se recuperan a partir de semillas, como las de soya y algodón mediante lixiviación con disolventes orgánicos y el tanino de las plantas se disuelve a partir de raíces y hojas de plantas. Además, los precipitados químicos con frecuencia se lavan de sus aguas madres adheridas mediante técnicas de separación, mediante equipos muy similares a los utilizados en las verdaderas operaciones de lixiviación, como en el lavado de licor de sosa cáustica del carbonato de calcio precipitado después de la reacción entre óxido de calcio y carbonato de sodio.

Estas operaciones se realizan por lotes o semilotes (estado no estacionario) y también en condiciones totalmente continuas (estado estacionario). En cada categoría se encuentran equipos del tipo de etapas y de contacto continuo. Se utilizan dos técnicas principales de manejo: la aspersion o goteo del líquido sobre el sólido y la completa inmersión del sólido en el líquido. En cualquier caso, la elección del equipo que se va a utilizar depende bastante de la forma física de los sólidos y de las dificultades y costo de manejo. En muchos casos, esto ha llevado al uso de equipos muy especializados en ciertas industrias.

Las operaciones en estado no estacionario incluyen aquellas en que los sólidos y los líquidos se ponen en contacto únicamente en forma de lotes y también aquellas en que un lote del sólido se pone en contacto con una corriente que fluye continuamente del líquido (método por semilotes). Las partículas sólidas gruesas generalmente se tratan en lechos fijos mediante métodos de percolación, mientras que los sólidos finamente divididos, que pueden mantenerse más fácilmente en suspensión, pueden dispersarse en todo el líquido con la ayuda de algún tipo de agitador.

Los sólidos de tamaño intermedio pueden lixiviarse adecuadamente con métodos de percolación en tanques abiertos. La construcción de estos tanques varía bastante, según la naturaleza del sólido y del líquido que se van a manejar y el tamaño de la operación, pero son relativamente baratos. Los tanques pequeños frecuentemente se hacen de madera, siempre y cuando este material no sea atacado químicamente por el líquido de lixiviación.

Los equipos, generalmente tanques, se pueden construir completamente de metal, con fondos falsos perforados, sobre los cuales se coloca una tela filtro, como en la lixiviación de productos farmacéuticos a partir de plantas. Estos pueden tener puertas laterales cerca del fondo para extraer el sólido lixiviado. Estos deben llenarse con

hojas cuyo tamaño de partícula sea lo más uniforme posible. De esta manera, el porcentaje de huecos será mayor y menor la caída de presión requerida para el flujo del líquido de lixiviación. Esto también induce la uniformidad del grado de lixiviación de cada partícula sólida y una dificultad menor ocasionada por la formación de canales del líquido que podría pasar a través de un número limitado de pasajes a través del lecho de sólidos. En ocasiones estos tanques son cerrados para evitar las pérdidas por evaporación de solventes volátiles o cuando se desean temperaturas superiores al punto normal de ebullición del disolvente. Por ejemplo, algunos taninos se tratan por lixiviación con agua a 120°C y 50 psi de presión en tanques cerrados de percolación. Los diseños varían considerablemente, según su aplicación.

En la extracción sólido-líquido el soluto está inicialmente en la fase sólida, la cantidad de soluto que se disuelve estará limitada por la saturación de la disolución que será función de la temperatura y la presión. De forma general, esta se divide en 3 partes:

1. Cambio de fase del soluto (si es sólido). Si es líquido, no hay cambio de fase al disolverse en el disolvente.
2. Difusión del soluto, a través del solvente, por los poros del sólido y hacia la periferia de la partícula sólida.
3. Transferencia del soluto, desde la solución en contacto con las partículas, hacia el seno de la solución.

Si bien cualquiera de las tres partes incide sobre la velocidad de extracción, la primera parte tiene lugar rápidamente por lo que sus efectos son despreciables. Si el sólido presenta estructura celular (por ejemplo: semillas oleaginosas, granos de café, remolacha, entre otros), las paredes celulares suministran una resistencia adicional a la transferencia de masa. Por lo tanto, la velocidad de extracción es relativamente baja.

La mayoría de los procesos de separación involucran la transferencia de materia de una fase a otra y algunos procesos incluyen la transferencia entre fluido y sólido, como por ejemplo el secado, la lixiviación y la cristalización.

• Extracción con solvente liposoluble (grasas)

En este método, se ponen las flores en contacto con la grasa en forma de capas para aumentar la superficie de contacto. Esta grasa es

la encargada de absorber los aceites esenciales. Posteriormente, los aceites esenciales se extraen de la grasa saturada en aceite con el uso del alcohol como solvente. Este es un método de extracción muy antiguo, pero se utiliza normalmente a escala de laboratorio pues a escala industrial resulta muy costoso debido al valor comercial de los disolventes, además de obtenerse esencias impurificadas con otras sustancias, así como por el riesgo de explosión e incendio característico de muchos disolventes volátiles.

• Extracción Soxhlet

Es un caso particular de la extracción con solventes. Es un método en caliente que se desarrolla empleando solventes con puntos de ebullición bajo, para evitar la degradación de la muestra por lo que requiere altos tiempos de residencia para lograr mayores niveles de extracción. Es un método muy conveniente para obtener los extractos crudos de las plantas. Este es un método convencional de extracción que requiere grandes cantidades de disolventes muy tóxicos, los cuales dejan residuos en los productos con efectos nocivos para la salud de los consumidores y efectos contaminantes al ambiente.

La figura 5 muestra un equipo Soxhlet utilizado a escala de laboratorio para la extracción de aceites esenciales.

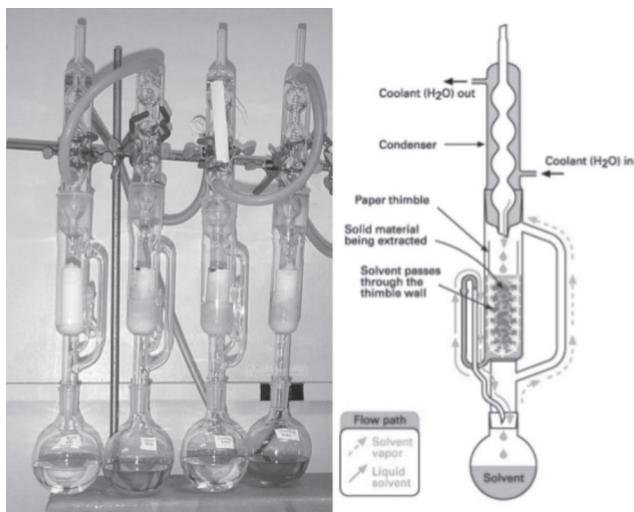


Figura 5: Equipo Soxhlet

Fuente: <https://es.slideshare.net/Rennie533/extraccin-de-principios-activos-de-planta>

• Extracción por infusión y decocción

Tanto la infusión como la decocción son procesos simples de extracción con agua. En el primer caso se agrega agua caliente o fría al material molido y luego se filtra; en el segundo el material se hierve por espacio de 15 minutos con el agua. En la infusión no se somete a ebullición, sino que se le puede agregar el agua a temperatura de ebullición en cuyo caso la exposición y el sometimiento de los compuestos de interés a esta temperatura sea mínimo. Es conveniente aclarar que en algunos casos se utiliza el proceso de reflujo para extraer con solventes acuosos. Esto obedece a que un calentamiento prolongado de la solución acuosa podría producir la evaporación total del solvente. El reflujo con soluciones acuosas se debe realizar sólo cuando se está seguro que el producto a extraer es termoestable.

• Extracción por destilación

Los procesos de extracción por destilación usan vapor directo con las hojas y los aceites son obtenidos y separados en diferentes grados de pureza. La figura 6 muestra una fotografía de una instalación experimental.



Figura 6: Instalación experimental para la extracción de aceites esenciales: destilación por arrastre de vapor.

Fuente: <http://quimicaorganica1alejandraaguilar.blogspot.com/2012/02/practica-3-destilacion-por-arrastre-de.html>.

El método de destilación a vapor es una de las técnicas más alentadoras pues el aceite esencial conserva las cualidades originales de la planta. La naturaleza fundamental de la destilación a vapor es extraer un compuesto o una mezcla de ellos, a una temperatura por debajo de su punto de ebullición. Se utiliza el vapor de agua para arrastrar los aceites volátiles en una torre de extracción rellena con las hojas de la planta a la cual se le quiera extraer el aceite. Luego se condensa la mezcla vaporizada de agua y aceite, para su posterior separación. Este método es el más utilizado debido a la disponibilidad del equipamiento y a su factibilidad económica. Es un proceso relativamente barato que funciona a un nivel básico, y que las propiedades de los aceites esenciales extraídos mediante el mismo no se alteran. Como el vapor reduce el punto de ebullición de un componente particular del aceite, nunca se descompone en este método. Este método además de tener la excepción de ser económico, es también relativamente más rápido que otros métodos.

La destilación por arrastre con vapor puede realizarse de tres formas distintas y son comúnmente conocidas como:

- *La hidrodestilación simple* o destilación con agua: consiste en sumergir directamente el material vegetal a tratar en agua, que a continuación se somete a ebullición. En éste método es máxima la acción del agua sobre el material, por ello se pueden presentar los procesos de hidrólisis y oxidaciones. Es muy útil para materiales que tienden a compactar la cama donde son ubicados (flores pequeñas) y es aconsejable cargar el agua ya caliente para disminuir la hidrólisis y el tiempo de operación. Los vapores heterogéneos se condensan y el aceite esencial se separa por diferencia de densidad. Ej.: Trementina.
- *Destilación con vapor saturado* o destilación con vapor de agua: el vegetal no está en contacto con el agua; el vapor de agua se inyecta a través de la masa vegetal dispuesta sobre placas perforadas o en un lecho fijo. El material debe tener tamaño uniforme para favorecer el paso del vapor. Se trabaja a temperaturas cercanas a los 100 °C cuando la presión es atmosférica y el rendimiento obtenido es bueno mientras no se forme la compactación del lecho. Por cargarse el material a una temperatura menor a la de trabajo, se producen condensaciones sobre él y ésta humedad origina cierta dificultad en la operación, especialmente en el paso y distribución del vapor por la muestra. Por su sencillez, bajo costo y rendimientos, esta técnica es la más usada en la in-

dustria de aceites esenciales. Varias empresas farmacéuticas lo recomiendan como el método óptimo de obtención de esencias.

- *La destilación con vapor seco* o sobrecalentado: consiste en impulsar el vapor a través de la masa vegetal, colocada sobre columnas o cestones. El vapor tiende a recalentarse por la resistencia opuesta a su paso por el material y esto debe evitarse en lo posible, debido a que seca las membranas celulares e impide la salida del aceite. Las instalaciones son más costosas, pero se pueden incrementar los rendimientos y volúmenes de producción.

■ Extracción con fluidos supercríticos

La extracción con fluidos supercríticos (EFS) se ha usado para el extracto de sabores y fragancias de los materiales naturales. La EFS es una tecnología de separación que usa un fluido en condiciones supercríticas como solvente. Cada fluido está caracterizado por un punto crítico que se define en las condiciones de temperatura crítica y presión crítica. Los fluidos no pueden licuarse por encima de la temperatura crítica independiente de la presión aplicada, pero puede que alcance una densidad cerca del estado líquido. Una sustancia se considera ser un fluido supercrítico cuando alcanza su temperatura crítica y presión crítica. Por tanto, se denomina fluido supercrítico (FSC) a cualquier sustancia que se encuentre en condiciones de presión y temperatura superiores a su punto crítico que se comporta como “un híbrido entre un líquido y un gas”, es decir, puede difundir como un gas (efusión), y disolver sustancias como un líquido (disolvente). Los FSC se caracterizan por el amplio rango de densidades que pueden adoptar.

Al presentar el fluido supercrítico propiedades intermedias entre el gas y el líquido, este tiene gran capacidad de disolver compuestos que normalmente no disolvería o disolvería muy poco en el estado gaseoso. En particular, la densidad y la viscosidad cambian drásticamente en condiciones cercanas al punto crítico. La tensión superficial despreciable sumada a coeficientes de difusión en orden de magnitudes superiores y viscosidades cien veces menores a la de los solventes líquidos, resultan en una gran penetración del fluido en matrices sólidas con altas velocidades de transferencia del soluto en el fluido supercrítico. Adicionalmente, en regiones donde un FSC es altamente compresible, su densidad, y por tanto, su poder disolven-

te, puede ser ajustada sobre un amplio rango, con modestas variaciones de temperatura y presión. Basado en esto, al lograr pequeños cambios en la presión, se consiguen grandes cambios en la densidad del fluido, y en consecuencia en el poder de solvatación; lo cual hace que la extracción sea efectiva.

Los FSC presentan ventajas en los procesos de extracción ya que, al comportarse como un líquido, facilita la disolución de los solutos, a la vez que su comportamiento como gas permite una fácil separación de la matriz. Esto conlleva a un proceso de extracción más rápido, eficiente y selectivo que en el caso de la extracción líquido-líquido. Además, se pueden usar “disolventes verdes” como el CO₂ evitando el uso de los habituales disolventes clorados de las extracciones líquido-líquido. Por otra parte, es un solvente ideal para el extracto de los productos naturales porque es no-tóxico, no-explosivo, de fácil disponibilidad y fácil de separar del producto extraído, pudiéndose recuperar. La Tabla 2 muestra las propiedades físicas de algunas de las sustancias utilizadas en este tipo de tecnología.

Tabla 2: Propiedades físicas de fluidos que se utilizan en la extracción supercrítica

Solvente	Peso molecular (g/mol)	Temperatura crítica (°K)	Presión crítica MPa (atm)	Densidad crítica (g/cm ³)
(CO ₂)	44,01	304,1	7,38 (72,8)	0,469
(H ₂ O)	18,02	647,3	22,12 (218,3)	0,348
(CH ₄)	16,04	190,4	4,60 (45,4)	0,162
(C ₂ H ₆)	30,07	305,3	4,87 (48,1)	0,203
(C ₃ H ₈)	44,09	369,8	4,25 (41,9)	0,217
(C ₂ H ₄)	28,05	282,4	5,04 (49,7)	0,215

En cuanto al equipamiento, está compuesto de uno o varios extractores que consisten en una autoclave que trabaja a alta presión donde se pone en contacto con el material a ser tratado, el cual se coloca en una cesta que permite el contacto entre las fases. Posteriormente, el flujo de salida que resulta de una mezcla entre el CO₂ y los aceites, se someten a un proceso de separación para obtener las dos fases. Esto permite recuperar el solvente. La figura 7 muestra una fotografía de una instalación a escala de laboratorio.

El proceso de extracción mediante fluidos supercríticos cuenta con cuatro etapas básicas indispensables que son:

- Etapa de presurización: es donde se alcanza la presión necesaria del solvente para la extracción que se requiere por medio de un compresor o de una bomba.
- Etapa de ajuste de temperatura: es donde se remueve o adiciona la energía térmica a través de un intercambiador de calor, baños térmicos o resistencias eléctricas, para llevar el fluido comprimido a la temperatura de extracción requerida.
- Etapa de extracción: Es llevada a cabo en un recipiente extractor a alta presión el cual contiene la matriz que será procesada. En esta etapa, el fluido entra en contacto con la matriz y arrastra el soluto deseado.
- Etapa de separación: Es mediante la cual se separa la sustancia extraída disolvente.

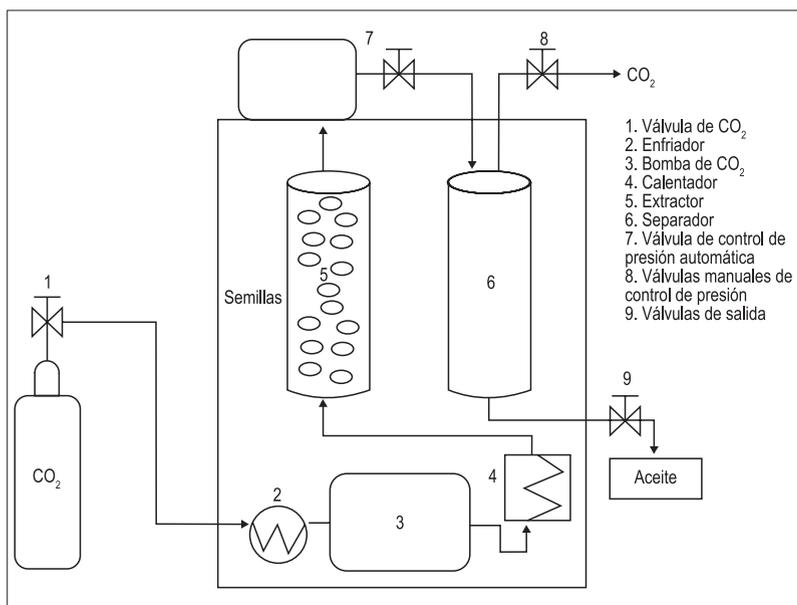


Figura 7: Instalación experimental de obtención de aceites esenciales por extracción con fluidos supercríticos.

Fuente: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642017000100005

• Extracción por ultrasonido

La extracción por ultra sonido se ha usado ampliamente para la obtención de materiales nutritivos, como los lípidos, proteínas, los

aceites esenciales y los compuestos bioactivos (como los polisacáridos). En comparación con los métodos tradicionales de extracción con solventes, este proceso mejora la eficiencia del proceso de extracción así como su relación respecto al extracto. Por otra parte, reduce la temperatura del extracto y permite el uso de una mayor cantidad de solventes.

De forma general, no afecta la composición del aceite extraído y reduce los tiempos de extracción. En vistas a sus ventajas y su creciente uso en la actualidad, se ha utilizado para separar compuestos orgánicos y su uso parece estar asegurado para la extracción de aceites esenciales.

• Extracción por microonda

El uso de microondas para extraer los aceites esenciales es una tecnología reciente. Esta ha permitido el desarrollo rápido de un método barato para la extracción del aceite y no requieren las muestras desprovistas de agua. Estos fluidos permiten que toda la energía suministrada por el ultrasonido sea absorbida solamente por la planta de la que se extrae el aceite. El aumento súbito de la temperatura causa que se rompan las glándulas donde están contenidos estos aceites, permitiendo el paso de estos al solvente, facilitándose el proceso de extracción.

En cuanto a la cinética de estos procesos, se plantea que, cuando las glándulas de aceites son sometidas a un estrés por temperatura, no solamente se rompen, sino que se desintegran en fragmentos “polvorientos”, aspecto este que depende del tipo de solvente. Las velocidades mayores de extracción se obtienen cuando la relación hojas / solvente (hexano) se optimiza y se somete a un proceso de microondas de altas potencias. Sin embargo, se plantea que estos altos niveles de microondas solo se deben utilizar para romper las glándulas donde están contenidos los aceites.

Los resultados de los varios tipos de muestras biológicas obtenidos por este método son cualitativamente y cuantitativamente comparados al método de la destilación de vapores mayores. Sin embargo, todavía por su uso de solvente orgánico, no es un método ambientalmente favorable.

Recientemente, se han desarrollado estos métodos en el que el equipo de extracción combina la energía de un microonda con vo-

lúmenes pequeños de solventes. Los resultados de los varios tipos de muestras biológicas obtenidos por este método son cualitativamente y cuantitativamente mejores comparados con los obtenidos por el método de la destilación de vapores. Sin embargo, todavía por su uso de solvente orgánico, no es un método ambientalmente favorable.

CAPÍTULO III

ESTRATEGIA PARA LA CREACIÓN DE NUEVAS CAPACIDADES INDUSTRIALES

Procedimiento para el diseño del proceso

A continuación, se exponen los pasos de la metodología para el diseño de procesos en la industria química (figura 8) propuesto por Pérez, et al, (2012).

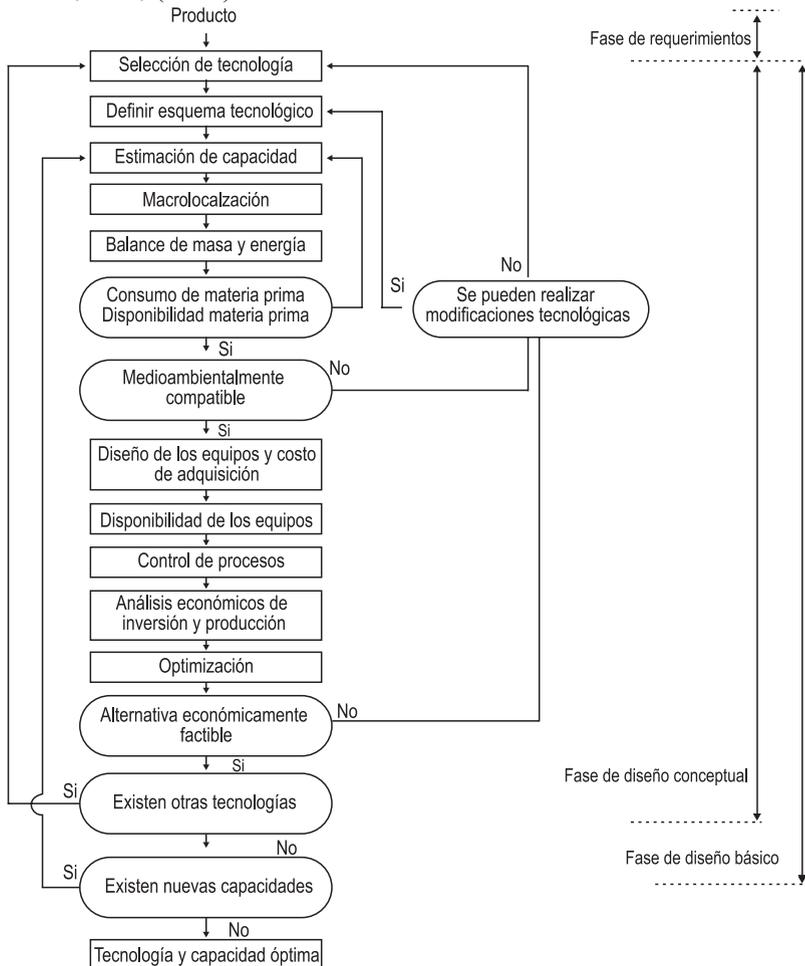


Figura 8: Representación de los procedimientos específicos y de las fases del diseño de procesos.

Fuente: Elaboración propia.

Pasos de la metodología

1 *Producto*: el objetivo de esta etapa es determinar el aceite esencial que se demanda, su cantidad y criterios de calidad, así como la tecnología y las materias primas (fuente de las plantas y calidad de sus hojas, frutos o flores). Esta información se obtiene a través de dos vías: métodos de recopilación de información (vigilancia tecnológica), donde las fuentes pueden ser estudios de mercado, información contenida en patentes, reportes científicos, solicitudes de aceites demandados por diferentes procesos como la industria farmacéutica, de cosméticos, de bactericidas, entre otros, o a través de la síntesis de proceso, donde se genera a partir de la creatividad del equipo de diseñadores, el diagrama(s) de flujo(s) del proceso de obtención, del método a utilizar, lo que se complementa con informaciones adicionales obtenidas por el método anterior.

2 *Selección de la tecnología*: el objetivo es seleccionar (de la literatura) o generar (a través de la síntesis de proceso) la primera tecnología asociada al producto demandado.

3 *Definición del esquema tecnológico*: tiene como objetivo definir el esquema tecnológico utilizando el diagrama de flujo como simbolismo esquemático para visualizar la topología (esquema estructural del proceso), realizar suposiciones que reduzcan la complejidad del problema y así facilitar, posteriormente, el diseño de los equipos. Se parte de esquemas previos reportados por la literatura y de las características del proceso extractivo, que tiene en cuenta la solubilidad del aceite en el solvente, su selectividad y posibilidades de recuperación del solvente, entre otros. Cuando se requiere de la síntesis de proceso para generar el esquema tecnológico, se puede utilizar cualquier método reportado en la literatura y se recomienda: a) fijar la complejidad de los diagramas en función del grado de rendimiento deseado y de la complejidad del proceso de extracción que se establezca, b) especificar las condiciones de operación (temperaturas, presiones, concentraciones de los solventes, reducción de tamaños de las muestras de la planta, etc.) y las propiedades asociadas a los flujos de trabajo. Estos últimos incluyen los de materias primas, aceites esenciales, solventes, residuales así como los flujos de consumo o liberación de energía.

4 *Estimación de la capacidad de la planta*: la finalidad de este paso es estimar la capacidad de la planta a partir de la demanda del mercado del aceite esencial y la disponibilidad de materias primas.

Se debe determinar la incertidumbre financiera, en la disponibilidad de las plantas utilizadas como materias primas y las adecuaciones a la agroindustria. Además, se deben calcular los indicadores sociales (nivel de satisfacción de la demanda y el número de trabajadores entre otros) mediante el método propuesto por Peters y Timmerhaus, (1991).

5 *Realización del estudio de macro localización*: El objetivo es determinar la cantidad de materia prima (indicador técnico) disponible a partir de la mejor ubicación del proceso donde se minimice el costo de transportación de la materia prima. En estos casos, las plantaciones pueden estar apartadas de los lugares donde se encuentra la tecnología, ya que estas dependen, entre otras cosas, de las condiciones climáticas, tipo de suelos, cultura en el cultivo de la planta. El método y la herramienta informática (Altern v3.0) propuesto por (Pérez, Oquendo y González, 2008), se sugiere para realizar esta tarea. Aunque esta etapa está condicionada por factores que pueden ser cuantificables en términos económicos, se propone tener en cuenta los factores que más influyen como son: a) la demanda del mercado de los aceites y sus cambios en el futuro, b) la incertidumbre en las disponibilidades de materias primas, c) las disponibilidades de tecnologías existentes para diferentes procesos de extracción, d) los costos de transportación de las materias primas y los productos terminados, que incluyen los aceites esenciales sumado a los residuos sólidos o líquidos que se generan durante el proceso extractivo. Estos factores pueden cuantificarse a través de la formulación de un problema lineal de optimización, donde la función objetivo es el costo de transportación y las variables a determinar son la cantidad de materia prima y el producto líder a distribuir.

6 *Realización de balances de masa y energía*: el objetivo de este paso es realizar los balances de masa y energía, considerando o no la incertidumbre, los cuales serán de utilidad para determinar la capacidad de los equipos en pasos posteriores. Por otra parte, en esta etapa se determinan los consumos de materias primas para la capacidad de la planta, los índices de consumo de solventes y los niveles de energía requeridos para llevar a cabo las etapas del proceso. Para el procedimiento, resulta imprescindible determinar el flujo y la composición de todas las corrientes que intervienen en el proceso (materia prima, intermedia, producto final o residual), con la finalidad de aprovechar la energía y los materiales que intervienen. En este paso se calculan los indicadores medioambientales, que deben incluir el inventario de los residuales sólidos que incluyen partes

de las hojas y flores con un bajo contenido de aceite, así como las posibles variantes para su reutilización o para su utilización en otros procesos como combustible o alimento animal. Estos resultados se utilizan en los dos pasos posteriores para comparar los indicadores ambientales con las normas vigentes sirviendo de datos para la toma de decisión asociada a la compatibilidad ambiental de la alternativa tecnológica que se está evaluando.

7 *Constatación de la disponibilidad y consumo de la materia prima:* este constituye el primer paso de evaluación, donde el objetivo de esta toma de decisión es comparar el indicador técnico (disponibilidad de las materias primas que incluyen las diferentes partes de las plantas como sus hojas, ramas, flores y frutos) con el ambiental (consumo de las materias primas). Si el consumo es mayor que la disponibilidad, debe retornarse al paso de estimación de capacidades y fijarse una capacidad menor.

8 *Constatación de la compatibilidad ambiental:* este constituye el segundo paso de toma de decisiones y el objetivo es comparar las cantidades de residuales gaseosos, líquidos y sólidos calculadas anteriormente con las regulaciones establecidas para el vertimiento de estos residuales para este tipo de industria y así continuar o no el análisis de la tecnología a través del procedimiento. Otros indicadores como el consumo de agua y energía renovable y no renovable, también pueden ser comparados con los estándares de consumo lo que depende del tipo de tecnología de extracción o el tipo de aceite que se produce. En este paso es posible determinar si la alternativa tecnológica cumple con los requisitos ambientales. En caso de que no cumpla estos requerimientos se pasa a analizar si se pueden realizar modificaciones tecnológicas o evaluar la posibilidad de tratamiento a los residuales o su utilización como materia prima en otros procesos. Si se cumple con las normas ambientales esta alternativa tecnológica se clasifica como viable (si sus materias primas y energía son renovables) o se clasifica como compatible con el ambiente (fuentes no renovables) y se continúa con el paso correspondiente al diseño de los equipos y determinación de los costos de adquisición.

9 *Realización de modificaciones tecnológicas:* es un momento de toma de decisiones que permite escoger entre la posibilidad de realizar modificaciones tecnológicas o seleccionar una nueva tecnología. La decisión forma parte de la experiencia del equipo de diseñadores y los objetivos planteados en el proyecto de diseño. Las nuevas modificaciones pueden ser la sustitución de equipamiento o

la adición de nuevos equipos utilizando cualquier método para llevar a cabo la síntesis de procesos, como se explicó con anterioridad. Por otra parte, se puede valorar el cambio del sistema de extracción que permita minimizar los costos de producción. El objetivo de estas modificaciones responderá fundamentalmente, a la disminución del impacto ambiental o el incremento de la cantidad de aceite esencial a obtener. En caso de que se puedan realizar las modificaciones se retorna a la definición del nuevo esquema tecnológico. En caso contrario se rechaza la alternativa y se retorna al paso de la selección de otra tecnología.

10 *Determinación de la capacidad de los equipos y el costo de adquisición:* en este paso se debe determinar los parámetros de diseño, la capacidad de los equipos y la cota mínima de cada uno de ellos a partir de los resultados obtenidos de los balances de masa y energía. Los parámetros de diseño (volumen, área de transferencia de calor, altura de la columna de extracción, entre otros) están en función del objetivo de trabajo de los equipos. El cálculo del costo de adquisición de cada uno de ellos se determina a partir de los parámetros de diseño que lo caracterizan y su capacidad a través de un ajuste de escala y actualización de su costo según lo propuesto por Peters y Timmerhaus, (1991).

11 *Determinación de la disponibilidad de los equipos:* el objetivo es calcular el número óptimo de equipos redundantes que se debe adquirir e instalar para que la disponibilidad del equipamiento sea máxima y aumentar el tiempo real de operación de la planta. El método que se propone es el planteado por Rosa (1996).

12 *Control automático de procesos:* este paso tiene como objetivo estimar el costo del control de proceso a partir de la selección de la estrategia de control, las variables a controlar, las variables manipuladas y el equipamiento que interviene en los lazos de control. Se propone seguir un conjunto de acciones propuestas por Pérez, Benítez, Oquendo, Julián, y Galindo, (2012). Estas son: a) definir el objetivo del sistema de control automático y la variable a controlar y las manipuladas, b) selección de la estrategia de control automático de procesos, c) diseño del lazo de control, d) determinación del costo de inversión, e) paso de toma de decisión en función de si existen otras estrategias y f) selección técnico-económica de la mejor estrategia de control automático.

13 *Realización del análisis económico:* el objetivo es estimar los costos de inversión utilizando la metodología propuesta por Peters

yTimmerhaus (1991), incluyendo toda su estructura de costo y los costos de producción de la planta. Además, se deben estimar los ingresos de la planta por concepto de venta del aceite y los residuales, para así poder calcular los indicadores dinámicos de valor actual neto (VAN), tasa interna de rentabilidad (TIR) y el periodo de recuperación descontado (PRD) y el valor agregado (VA).

14 Optimización: el objetivo de este paso es determinar los parámetros óptimos de la planta. Los cálculos pueden ser implementados en EXCEL y MATLAB, definiéndose como función objetivo maximizar el VAN; por lo que la optimización es mono-objetivo. Las restricciones bajo las cuales la búsqueda se lleva a cabo son las relaciones adicionales en forma de balances de materia y energía y de ecuaciones de diseño. El tipo de relaciones que define la función objetivo y las restricciones del sistema sirven para clasificar el problema. Si todas las relaciones son lineales (y todas las variables son continuas) se tiene un problema de programación lineal, en caso contrario sería no lineal. Una vez determinado la región del óptimo se sugiere realizar un análisis de sensibilidad de las variables optimizadas para ver su influencia en la función objetivo. Además es posible resolver este tipo de problemas de optimización, considerando simultáneamente la integración de los procesos bajo condiciones ambientales, o al considerar el problema como multi-objetivo (por ejemplo, minimizar impacto ambiental / maximizar beneficios sujeto a la integración de procesos).

15 Alternativa económicamente factible: en este paso de toma de decisión se valora si la alternativa tecnología es factible o no desde el punto de vista económico, pero sin perder de vista que ya es compatible con el ambiente. La toma de decisiones pudiese basarse solamente en considerar si el VAN es positivo; se selecciona la tecnología y se continúa hacia el siguiente paso. Sin embargo, se propone en este procedimiento considerar el análisis de los indicadores económicos dinámicos de forma sistémica. De esta manera quedaría seleccionada sólo aquella alternativa tecnológica que permita producir un producto competitivo en el mercado, y que ya ha sido analizada desde el punto de vista técnico y ambiental en pasos previos. De no ser seleccionada se debe retornar a la realización de modificaciones tecnológicas. Siempre que las materias primas y la energía sean renovables, las alternativas tecnológicas que lleguen a este paso, serán viables, equitativas y soportable; y por tanto sostenibles. Esto se debe a que han sido evaluadas en cada una de las tomas de decisiones para

cada una de las dimensiones de la sostenibilidad. Si las fuentes son no renovables, la alternativa tecnológica que se evalúa es compatible con el ambiente y factible económicamente. Generalmente, para este tipo de procesos estos indicadores son favorables debido a los altos precios de venta de los aceites esenciales, aun cuando se necesita de cantidades significativas de materias primas.

16 *Existencia de otras tecnologías:* en esta toma de decisión se comparan el conjunto de alternativas tecnológicas a través de los indicadores cuantitativos que pertenecen a la dimensión técnico-económica y ambiental. La toma de decisión estará en dependencia de los objetivos trazados previamente para la selección de la mejor alternativa tecnológica. Una vez que se hayan agotado todas las tecnologías se selecciona la mejor que dentro de su clasificación presente los mejores indicadores técnicos, económicos, ambientales y sociales.

17 *Existencia de nuevas capacidades:* el objetivo es analizar la existencia de nuevas capacidades para la alternativa tecnológica seleccionada en el paso anterior, siempre y cuando la capacidad seleccionada cumpla con la disponibilidad de materias primas. En este paso se puede mejorar el nivel de satisfacción de la demanda (indicador social), por lo que se incide en la dimensión social.

18 *Selección de la tecnología óptima (sostenible o no):* el objetivo es seleccionar la alternativa tecnológica óptima desde el punto de vista ambiental, técnico-económico y social, mediante la creación de una tabla donde se resumen los resultados de todos los indicadores que se cuantifican.

Los pasos anteriores permiten llevar a cabo, desde el punto de vista metodológico, los procedimientos específicos, generándose un flujo de información entre ellos. La dependencia de esta información entre las etapas demuestra que las etapas del diseño del proceso pueden coexistir de forma integrada en un procedimiento.

En la tabla 3 se muestran los pasos de tomas de decisiones que determinan la clasificación de la alternativa tecnológica bajo diseño, según criterios de sostenibilidad.

Tabla 3: Clasificación de las alternativas tecnológicas según el momento de las tomas de decisiones del procedimiento que se propone.

Paso de toma de decisión	Clasificación de la alternativa tecnológica con fuentes de materias primas y energía no renovables	Clasificación de la alternativa tecnológica con fuente de materias primas y energía renovables
Ambientalmente compatible	Compatible con el ambiente	Soportable
Económicamente factible	Factible económicamente y compatible con el ambiente	Soportable, viable y equitativa (sostenible)

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ACEITE ESENCIAL DE PIMENTA RACEMOSA

Pasos para la obtención

Paso 1. Producto

Aceite esencial de *Pimenta racemosa*: es un Aceite Esencial que viene del árbol de Bahía indio Oriental, de nombre científico *Pimenta racemosa*. También es conocida como malagueta, *bay-rum*, *Bois d'Inde*, *Bois senteur*, *Piment couronné*. Uno de los usos principales de su aceite es para la fabricación de colonias y cremas para después de afeitarse. Tiene 29 componentes químicos naturales individuales, cada uno de los cuales tienen un efecto terapéutico diferente lo que crea posibilidades curativas infinitas. Puede usarse como ingredientes y subproductos en la fabricación de perfumes, cosméticos, inciensos, productos de limpieza, en la aromaterapia, la medicina y para condimentar comidas y bebidas (da sabor delicado al café, té, vinos, y de licores).



Figura 9: Pimenta racemosa.

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/26567844@N06/2490619509>

Se destaca también en la fabricación de perfumes, la aromaterapia, los cosméticos, el incienso, la medicina, los productos de limpieza de hogares, y para condimentar comidas y bebidas, aporta un sabor delicado al café, té, vinos, y destilado de licores. Tradicionalmente se ha usado el aceite esencial por sus calidades de condimento o para su efecto relajante, en la depresión, dolores de cabeza y migrañas, entre otros

Tradicionalmente también se ha usado por su cualidad como relajante muscular, para la depresión, dolores de cabeza y migrañas, entre otros. Como insecticida en el combate de la mosca domestica *Linnaeus* en su forma adulta o larvicida.

La Tabla 4 muestra los componentes principales en el aceite esencial de la Pimienta racemosa (Biomoléculaire, 1999) mientras que la Tabla 5 muestra las propiedades de algunos de los grupos químicos orgánicos presentes.

Tabla 4: Composición % del aceite esencial de la *Pimienta racemosa*

Componente	%	Componente	%	Componente	%
Alfa-Pineno	0,3	Limoneno	0,3	Chavicol	11,3
Octan-3-uno	0,3	1,8-Cineole	0,8	Eugenol	46,2
Octen-3-ol	1,7	(E)-Octocimeno	0,9	Metileugenol	0,8
Mirceno	21,9	Gamma-Terpeno	0,1	Beta-Cariofileno	0,6
Octan-3-o	0,5	Terpinoleno	0,2	C15H24	0,2
Alfa-felandreno	0,5	Linalol	2,9	(Z,E)-alfa-Farneseno	0,7
1,8-Cineole	0,8	Terminen-4-ol	0,7	Gamma-Cadineno	0,2
Alfa-Terpeno	0,1	Alfa-Terpinol	0,3	Delta-Cadineno	0,5
P-Cimeno	0,5	Metilo Chavicol	0,3	Cis-calameneno	0,1

Fuente: Laboratorio de CHIMIE BIOMOLECULAIRE

Tabla 5: Propiedades de algunos de los grupos químicos orgánicos presentes

Serie homóloga	Calidades terapéuticas
Aldehídos	Anti infeccioso, analgésico, antiinflamatorio, ayudan en la regulación del sistema nervioso central
Esteres	Tienen efecto sedativo, ayudan en la regulación del sistema nervioso central, son antiespasmódicos
Ketonas	Curación de piel, antiinfecciosa, superficial, favorecen la degradación de las grasas y ayudan a combatir infecciones del tracto respiratorio.
Fenol Metil Éster	Antiinfeccioso, antiespasmódico, funcionan como estrógeno y por consiguiente ayudan a regular el sistema hormonal y el sistema nervioso central.
Óxidos	Expectorantes, algunos son anti-infecciosos
Alcoholes	Antipatogénico y inmunoestimulantes
Fenoles	Antipatogénico fuertes
Mono Terpinas	Antiséptico, fortificante y antiviral

El aceite esencial de la *Pimenta racemosa*, también es conocido como aceite volátil y aceite etéreo. Es un líquido volátil, principalmente insoluble en agua, y presenta un color amarillento oscuro. Sus componentes y porcentajes son representados en la Tabla 6.

Tabla 6: Los componentes y porcentajes en el aceite esencial de Pimenta Racemosa.

Componente	%	Componente	%	Componente	%
Alfa-Pineno	0,3	Limoneno	0,3	Chavicol	11,3
Octan-3-uno	0,3	1,8-Cineole	0,8	Euganol	46,2
Octen-3-ol	1,7	(E)-Octocimeno	0,9	Metileugenol	0,8
Mirceno	21,9	Gamma-Terpeno	0,1	Beta-Cariofileno	0,6
Octan-3-o	0,5	Terpinoleno	0,2	C ₁₅ H ₂₄	0,2
Alfa-felandreno	0,5	Linalol	2,9	Z,E)-alfa-Farneseno	0,7
1,8-Cineole	0,8	Terminen-4-ol	0,7	Gamma-Cadineno	0,2
Alfa-Terpeno	0,1	Alfa-Terpinol	0,3	Delta-Cadineno	0,5
P-Cimeno	0,5	Metilo Chavicol	0,3	Cis-calameneno	0,1

Fuente: Laboratorio de CHIMIE BIOMOLECULAIRE

En cuanto a los riesgos por consumo excesivo del aceite esencial de *Pimenta Racemosa*, aunque suelen indicarse aplicaciones peque-

ñas (no más de tres gotas del aceite de pimenta), nunca debe ingerirse en cantidades mayores, a menos que esté bajo supervisión de un médico. Incluso una cucharilla puede provocar envenenamiento por eugenol, causando náuseas, vómitos, convulsiones, y enlentecimiento del sistema nervioso central. Este aceite no debe aplicarse en la piel sin diluir ya que puede provocar irritación. Algunas personas son alérgicas a la *Pimenta Racemosa* y no deben tomarla.

Paso 2: Selección de la tecnología

Teniendo en cuenta los aspectos tratados en el epígrafe Métodos de extracción de aceites esenciales y las ventajas que presentan el método por destilación por arrastre de vapor, se escoge este usando el agua como solvente.

Paso 3: Definición del esquema tecnológico

El proceso comienza con la selección y limpieza de las hojas, sobre la base de separar las que se encuentren en mal estado, así como todas las impurezas que puedan estar presentes como tierra, lodos, materias secas entre otras.

Se calienta el agua dentro de un generador de vapor hasta lograr temperaturas entre los 300-350°C. El vapor sale del generador y se introduce dentro de la columna de extracción, donde se colocan previamente, las hojas seleccionadas en forma de cama de sólidos. Este procedimiento se puede sustituir con la colocación de una caldereta en el fondo de la columna para generar el vapor. Este proceso de destilación debe ocurrir a presiones entre 1-3 atm.

A medida que pasa el tiempo, comienzan a ascender los vapores de agua mezclados con los aceites extraídos, los cuales salen por la parte superior o tope de la columna y pasan a un condensador de doble tubo donde son enfriados con agua fresca a contracorriente. Como resultado, se obtiene una mezcla inmiscible de agua y aceite esencial, que es necesario separar.

La mezcla obtenida en la salida de los intercambiadores pasa por un proceso de sedimentación libre en un sedimentador, logrando la separación según la diferencia de densidad de los componentes de la mezcla (aceites pesados, aceites ligeros y agua). Posteriormente, el

agua se extrae y se recicla a la caldera, pasando por un tratamiento previo para eliminar trazas de aceite contenido en la misma. La figura 10 muestra un esquema de la tecnología propuesta.

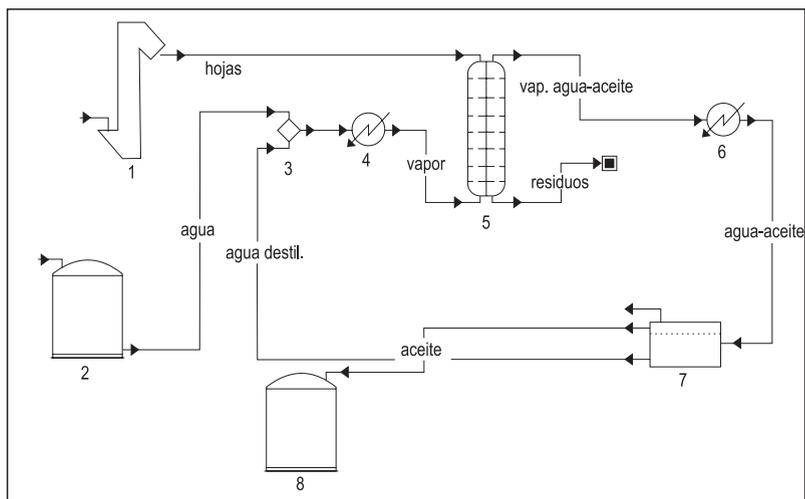


Figura 10: Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite esencial por arrastre de vapor: 1. elevador de cangilones para el transporte de las hojas, 2. tanque de almacenamiento de agua, 3. mezclador de agua, 4. generador de vapor, 5. columna de extracción, 6. condensador, 7. separador agua-aceite, 8. tanque de almacenamiento de aceite

Fuente: Elaboración propia

Paso 4: Estimación de la capacidad de la planta

La estimación de la capacidad se realiza en función de la demanda del producto, haciendo estudios previos que incluyen disponibilidad en el mercado, precios de ventas, principales suministradores entre otros aspectos. Por otra parte, se tiene en cuenta la disponibilidad de materias primas. En este caso, se realiza en función de la demanda del producto, debido a que existe disponibilidad de materia prima es mucho mayor que la demanda del producto. Según estudios previos, se propone una capacidad de 62,4 kg de aceite diario. En base a este dato, se realizan los balances de masa y energía correspondientes a la operación de la planta.

Paso 5. Realización del estudio de macro localización.

Para este paso se tiene en cuenta la disponibilidad de materias primas, acceso a mercados, mano de obra, facilidades auxiliares como transportación de materias primas y producto final, entre otros aspectos. En este ejemplo, se propone la ubicación de la planta en el sur de la isla de Dominica, donde están enclavados cinco municipios con una amplia disponibilidad de la planta de bahía, donde estudios previos han demostrado que la disponibilidad de este, supera la demanda del producto.

Paso 6. Realización de los balances de masa y energía.

Se realizan los correspondientes balances de masa y energía a cada uno de los equipos que conforman la tecnología de destilación con vapor de agua y se determinan los flujos y composición de cada una de las corrientes intermedias.

Para poder realizar estos balances se hace necesario estimar el efecto de diferentes variables de operación en los rendimientos de extracción. Para ellos se realiza un experimento a escala de laboratorio que permite obtener el valor de rendimiento óptimo.

Para realizar los experimentos se parte de hojas de la planta de Bahía (*Pimenta Racemosa*) recogidas del Sur de la isla de Dominica, donde la planta de Bahía crece cerca de la costa, próxima al pueblo de *Petite Savanne*. Las hojas se separaron en dos grupos según su tipo: hojas secas y hojas verdes. Los dos grupos de hojas se dividieron en dos tamaños: hojas cortadas y hojas enteras, con vistas a determinar la influencia de la maduración de las hojas y su tamaño en el rendimiento del proceso de extracción. Estas se cortaron con una cuchilla reduciendo su tamaño de un rango de 5 cm a 12.7 cm de largo por 1 cm de ancho. Se colocaron en un recipiente y se sometieron a un proceso de destilación, teniendo en cuenta dos flujos de vapor de agua: por un tiempo de 90 minutos para un promedio de flujo de 5.9 ml/min y 75 minutos para un promedio de flujo de 10,32 ml/min. La extracción del aceite se realizó por arrastre de vapor.

Se colocan 3 L de agua en un rehervidor donde se mide la diferencia de volumen en el tiempo para determinar los flujos de vapor. Este se encuentra localizado en la base de la cama. El vapor que sale, atraviesa una malla que sostiene la carga de hojas medidas previa-

mente y colocadas en una cama compactada de 5,8 cm de diámetro y 30,48 cm de altura. Los dos flujos de vapor fueron regulados por una resistencia eléctrica conectados a un controlador PID.

El vapor resultante con los aceites esenciales volátiles incorporados, se condensó en dos equipos conectados en serie, donde se obtiene una mezcla de agua y aceite totalmente inmiscibles. El aceite fue separado del agua mediante un separador líquido-líquido y cuantificado el volumen obtenido. El rendimiento del aceite se calculó por el peso inicial de las hojas, donde previamente se obtuvo el nivel de humedad, en un proceso de secado por 24 horas a 60 °C dentro un horno.

La tabla 6 muestra los niveles y parámetros utilizados durante la experimentación y la tabla 7 muestra los resultados principales de esta etapa, donde se expresa el rendimiento de extracción en diferentes condiciones de operación, teniendo en cuenta los principales parámetros estudiados que afectan el rendimiento. Dentro de estos se destacan el flujo de vapor, el tiempo de extracción, tipo de hojas y tamaño de hojas.

Tabla 6: Parámetros utilizados para la extracción

Parámetros	Valores y Unidades
Masa de hojas (verdes)	180 g
Humedad	0,505 g _{H2O} /g _{hojas}
Masa de hojas (secas)	153 g
Humedad	0,2795 g _{H2O} /g _{hojas}
Volumen de agua	3 L
Tiempo de destilación	90 min
^a Flujo menor	5.9 J/mL/min
^b Flujo medio	10.32 J/mL/min
Agua del condensado: nivel bajo	875.5 mL
Agua del condensado: nivel medio	976.7 mL
Niveles de energía utilizados: ^a 22, 23 J/mL/min; ^b 38, 89 J/mL/min	

Fuente: elaboración propia

Tabla 7: Rendimiento de aceite obtenido para las combinaciones estudiadas

Flujo de Vapor	Hojas Tamaño	Hojas tipo	Rendimiento ($\text{g}_{\text{aceite}} / \text{g}_{\text{hojas}}$)
medio	enteras	secas	0.0074
medio	enteras	verdes	0.0075
bajo	enteras	verdes	0.0224
bajo	picadas	secas	0.0205
bajo	picadas	verdes	0.0119
medio	picadas	secas	0.0060
bajo	enteras	secas	0.0240
medio	picadas	verdes	0.0127
medio	enteras	secas	0.0076
medio	enteras	verdes	0.0079
bajo	enteras	verdes	0.0223
bajo	picado	secas	0.0144
bajo	picado	verdes	0.0149
medio	picado	secas	0.0070
bajo	completo	secas	0.0250
medio	picado	verdes	0.0119

Fuente: elaboración propia

A los resultados anteriores se les aplicó el paquete estadístico Statgraphic para Windows versión 5.0 Statistical Graphics Corporation. Los estadígrafos de prueba aplicados fueron el diagrama de Pareto para ponderar los principales parámetros estudiados así como sus interacciones. La figura 11 muestra los resultados.

Según el diagrama de Pareto, los resultados que aparezcan a la izquierda de la línea son variables que no tienen una marcada influencia en el rendimiento. En este caso se encuentran el tipo de hojas y la interacción entre el tamaño de la hoja y tipo de hoja. Esto permite tomar la decisión de que, una vez diseñada la tecnología, la materia prima puede estar seca o verde. Una observación importante en este aspecto es que la utilización de hojas secas, que tienen una menor densidad, permite un mayor aprovechamiento de la capacidad de la torre de extracción aumentando consecuentemente la productividad del equipamiento.

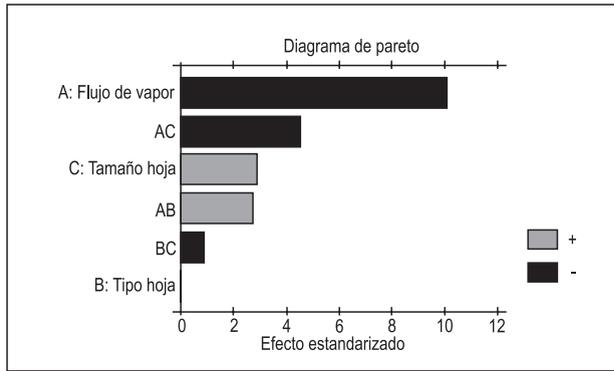


Figura 11: Diagrama de Pareto para las condiciones del trabajo
Fuente: elaboración propia

En el caso de los aspectos que están a la derecha, como tamaño de hojas y la interacción entre el flujo de vapor y el tamaño de hojas, y que su efecto sea negativo, significa que influyen directamente en el rendimiento, lo que implica que un aumento en el tamaño de hojas, provoca un incremento del rendimiento. Este aspecto es de suma importancia ya que indica que, desde el punto de vista tecnológico, las hojas no deben ser molidas. Esto trae consigo un ahorro por concepto de no utilizar un molino para la preparación previa de la materia prima. Este efecto se puede deber a que se encuentran en la superficie de las hojas los aceites más volátiles y en el interior los aceites más pesados. En el caso de la interacción de flujo de vapor con tipo de hojas, se aprecia un mejor rendimiento.

En el caso de los negativos, el flujo de vapor, se aprecia una relación inversa. Estos indican que, para menores flujos de vapor, se obtienen mejores rendimientos. En el diseño futuro de la planta, este aspecto también resulta de gran importancia ya que implica un menor gasto por concepto de consumo y producción de vapor. En el caso de la interacción entre la producción de vapor con tamaño de hojas, el efecto es contrario a lo expresado en el análisis precedente.

De forma general, los resultados muestran que las variables que más inciden en el rendimiento del proceso de extracción de aceite son el flujo de vapor, seguido por el tamaño de las hojas. En la tabla 8 aparecen estos resultados. En estas condiciones se obtiene un rendimiento de $0,02543 \text{ ml}_{\text{aceite}} / \text{g}_{\text{hojas secas}}$, resultando las mejores condiciones de operación.

Tabla 8: Resultados obtenidos del óptimo

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Flujo de vapor	bajo	alto	bajo
tipo hoja	seco	verde	seco
tamaño hoja	cortado	completo	completo

Fuente: elaboración propia.

Se utiliza los datos y cálculos reales de producción y el valor del rendimiento óptimo obtenido previamente como patrón y base de cálculo para estimar la productividad de la planta de extracción propuesta. Se toma como base de cálculo un día de trabajo de la planta. Los resultados de los balances de masa se presentan en cada uno de los pasos siguientes según corresponda.

Paso 7. Constatación de la disponibilidad y consumo de la materia prima

La materia prima fundamental es el Árbol de Bahía. Este es un árbol robusto cuya clasificación aparece en la tabla 9.

Tabla 9: Clasificación científica del árbol de Bahía

Reino
División: <i>Magnoliophyta</i>
Clase: <i>Magnoliopsida</i>
Subclase: <i>Rosidae</i>
Orden: <i>Myrtales</i>
Familia: <i>Myrtaceae</i>
Subfamilia: <i>Myrtoideae</i>
Tribu: <i>Myrteae</i>
Género: <i>Pimenta</i>
Especie: <i>Pimenta racemosa</i>

Naturalmente el árbol de Bahía crece hasta aproximadamente 24 metros, pero cuando se usa como materia prima para la producción de aceite esencial se prefiere realizar la cosecha alrededor de 3-4

metros para facilitar la misma. Tiene una larga historia de usos como especie y también para la producción de perfumes.

Pueden usarse tres variedades principales de hojas de planta de Bahía: común (clavo de olor), el anís de olor y la cidronela de olor. Estas variedades son fáciles de determinar por separado al oler las hojas previamente aplastadas. Es la variedad común que se prefiere por el mercado extranjero que tiene una demanda de 100 barriles de 55 galones/año y, por tanto, es la materia prima para obtener el aceite. La planta se siembra por la costa Sur de la isla Dominica donde existe gran disponibilidad de materia prima.

Sus hojas se usan como especie para condimentar carnes, papas, estofados, sopas, salsas, peces, encurtidos y vinagres, y varían en su tamaño. Pueden 0,05 – 0,127 metros de largo y pueden ser tan anchas como 0,635 metros. Las hojas son gruesas y de un verde brillante. Mientras más predomine el oscuro de las hojas, se obtiene un aceite de mejor calidad.

En la parte sur de Dominica existe gran disponibilidad de hojas de *Pimenta racemosa*, la materia prima para la producción de aceite esencial. El país responde casi al 90% de la demanda mundial de dicho aceite, donde más de 60 % (más de 18942 L/a) pertenecen a los miembros de la cooperativa de Aceites y Especies Esenciales de Dominica (mercado Estados Unidos) y el resto a *Sr Shillingford* (del mercado de Europa).

Paso 8. Constatación de la compatibilidad ambiental

La producción de aceites esenciales genera residuales líquidos, sólidos y gaseosos. Los residuales líquidos generados, fundamentalmente en el proceso de limpieza de las hojas, no contienen ningún compuesto que pueda afectar al medioambiente por lo que se puede utilizar como agua de riego o en otras aplicaciones. Los residuales sólidos generados son las hojas después de la etapa de destilación, que al realizarse con agua como solvente, es utilizada como fertilizante orgánico en las propias plantaciones de *Pimenta Racemosa*. Estos sólidos pueden utilizarse para la producción de abonos vegetales también en estas plantaciones, y se puede valorar la posibilidad de su uso como combustible para generar el vapor que consume el proceso. De esta forma, se estarían aplicando los principios de producciones más limpias. En cuanto a las emanaciones de gases, están

constituidos en mayor medida por el dióxido de carbono, entre otros. La tabla 1 muestra los resultados.

Tabla 10: Indicadores medioambientales para la tecnología de destilación con vapor H₂O

Indicadores medioambientales	Valores	Unidades
Consumo de materias primas	70,93	g _{hojas} / kg _{producto}
Consumo de agua	26,85	kg _{agua} / kg _{producto}
Consumo de energía	7,23	kg _{combustible} / kg _{producto}
Vertimientos líquidos	26,85	kg _{líquidos} / kg _{producto}
Vertimientos sólidos	67,13	kg _{sólidos} / kg _{producto}
Vertimiento de gases	11,5	kg _{gases} / kg _{producto}
Consumo de combustible	454,2	kg / d
Consumo de electricidad	43,37	kW / d

Fuente: Elaboración propia.

Paso 9. Realización de modificaciones tecnológicas

En el caso de la tecnología no se proponen modificaciones al esquema tecnológico. De ser necesario, deben tenerse en cuenta todas las implicaciones que tendrían en los resultados de los balances de masa y energía, así como las futuras afectaciones.

Paso 10. Determinación de la capacidad de los equipos y el costo de adquisición

Se determinan capacidad y costo a partir de los flujos obtenidos en el paso 5 a partir del esquema tecnológico propuesto. En el diseño de equipos se calcularon los tamaños y se identificaron las variables que caracteriza a cada equipo, a partir de los balances de masa y energía, lo cual permitió determinar el costo de adquisición de cada uno, utilizando la metodología de Peter y Timmerhauss (1991). Este método es ampliamente utilizado en la práctica internacional para la evaluación de los procesos inversionistas en la Ingeniería Química. Ellos reportan, de forma gráfica, el comportamiento de los costos del equipamiento de la industria química en el mercado internacional en función de sus capacidades, el tipo de equipos u otra variable

tecnológica que describa su funcionamiento. Con las expresiones matemáticas que caracterizan estos comportamientos, se obtienen los costos de adquisición para las capacidades obtenidas para cada equipo y se actualizan costos del año de publicación y los valores actuales. Para aplicar el método, es importante definir el indicador técnico “capacidad de los equipos” conformado por la variable de diseño y su valor. De esta manera se obtiene el costo de adquisición de cada uno de los equipos que la componen. La tabla 11 muestra los resultados de los costos de adquisición actualizados.

Tabla 11: Costo de adquisición en función de la capacidad de los equipos

Equipos	Parámetros de Diseño	Dimensiones calculadas	Costos (USD)
1 Torre extracción	Diámetro	1,236 m	110 500
	Altura	5 m	
1 Tanque de agua	Volumen	0,0379 m ³	5 900
1 Condensador	Diámetro interno	0,127 m	6 000
	Diámetro externo	0,279 m	
	Longitud	2,032 m	
2 Separadores	Diámetro	0,305 m	1 200
	Altura	0,889 m	
Total de equipos			124 800

Fuente: Elaboración propia

Paso 11. Determinación de la disponibilidad de los equipos

Para la determinación de la fiabilidad de la planta y el número óptimo de equipos redundantes se utiliza la metodología planteada por Rosa (1996). Es importante en esta etapa introducir el indicador técnico denominado “número óptimo de equipos”, que se obtiene a partir de definir como función objetivo la minimización del costo de operación más el costo de inversión sujeto a la restricción de fiabilidad del sistema. Se utilizó el diagrama de fiabilidad paralelo, donde se consideró el conjunto de equipos que definen una etapa como un módulo de equipo. En este caso de estudio, el número óptimo de equipos calculados coincide con el número de equipos definidos en el diseño. En la tabla 12 puede observarse el costo de adquisición en función del número óptimo de equipos calculado para cada una de las unidades.

Tabla 12: Número óptimo de equipos para el proceso.

Equipamiento	Costo (USD)
1 Torre de destilación	110 500
1 Tanque de agua	5 900
2 Separadores	1 200
1 Condensador	6 000

Fuente: Elaboración propia

Paso 12. Control automático del proceso

Debido a la poca complejidad del proceso, no se tiene en cuenta este paso.

Paso 13. Realización del análisis económico

Se parte de la determinación del costo de inversión de la propuesta tecnológica. La inversión se determina por el método “C” de Peter y Timmerhaus, (1991), o método aproximado, que es el método preliminar más utilizado en el diseño de plantas químicas y unidades tecnológicas de procesos químicos, para la estimación del capital de inversión, donde cada partida se puede considerar como un porcentaje del costo total de adquisición del equipamiento. En este caso se tiene en cuenta el tipo de planta química, si los fluidos a trasegar son líquidos, sólidos o gaseosos, los niveles de automatización a emplear y la peligrosidad de la planta química, entre otros.

La tabla 13 muestra los resultados del costo de inversión

Tabla 13: Costo total de la inversión.

Nº	Componentes	Costo (USD)
1	Equipamiento	124.800
2	Instalación	48.627
3	Instrumentación	0
4	Tuberías	38.688
5	Electricidad	12.480
6	Edificaciones	36.192
7	Facilidades de servicio	68.640
8	Ingeniería-Supervisión	39.936
9	Construcción	12.480
10	Gastos construcción	22.464
	Total	404.307

Fuente: Elaboración propia

Se determina el costo de producción asumiendo que el costo de materias primas es alrededor del 40 % del costo total de operación lo cual está en consonancia con este tipo de proceso tecnológico. El costo de operación asciende a los 553 354,26 USD, el cual está en el orden a resultados de plantas similares que existen en las Islas del Caribe. El consumo de combustible representa el 15 % de este costo. Los resultados son mostrados en la tabla 14.

Tabla 14: Costo de producción y sus componentes

Componentes	Costo (USD/año)
Materias primas	218.139,00
Fuerza de trabajo directa	3.635,65
Facilidades auxiliares	
- agua	0,00
- combustible	80.712,90
Costo variable total	302.487,55
Amortización	24.960,00
Mantenimiento	5.154,24
Suministros de operación	2.577,12
Laboratorios	36,35
Costos generales	181.782,50
Costos de administración	36.356,50
Costo fijo total	250.866,71
Costo total	553.354,26

Fuente: Elaboración propia

Paso 14. Optimización

En la metodología propuesta no se propone realizar un estudio de optimización de la tecnología. Esto conllevaría a buscar una función objetivo que minimice los costos de producción o maximice los rendimientos y la producción, aspectos estos que no se han tenido en cuenta en esta tecnología.

Paso 15. Alternativa económicamente factible

La efectividad económica de la inversión se determina a partir del cálculo para 10 años de los indicadores dinámicos de la inversión: Valor Actual neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI). Para estimar los ingresos se parte de un precio de venta del aceite de 44 USD/kg, la capacidad de producción de 62.4 kg/d y el tiempo de trabajo del proceso. Los resultados muestran que los ingresos ascienden a 833993.60 USD, obteniéndose un VAN de 806 932,56 USD, una TIR del 46 % y un PRI de 3 años. La figura 12 muestra los resultados del VAN en 10 años.

Debe destacarse que, para este estudio de caso, hay que tener en cuenta que es un producto de alto valor. Esto se debe a la gran demanda mundial que existe del mismo, a que sus residuales pueden ser utilizados en la agricultura, incrementando los ingresos por este concepto. Por otra parte, existe disponibilidad abundante de materias primas en el lugar donde se realizó la Macro localización, así como la existencia de equipamiento disponible, que permite asegurar que, el acometer la inversión, traería beneficios muy importantes. A esto se suma, además, la existencia de fuerza de trabajo calificada y disponibilidad de materias primas locales que estabilizarían el suministro.

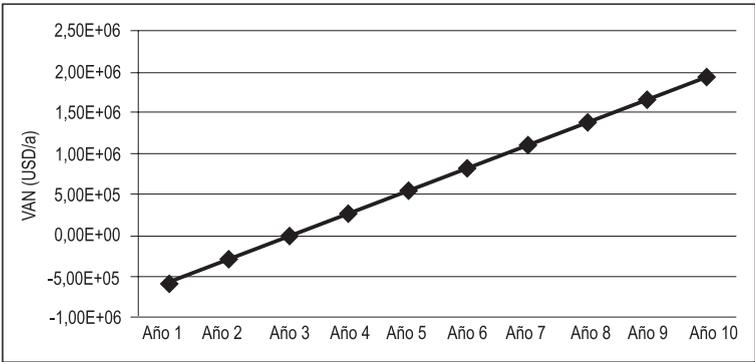


Figura 12: Valores de VAN para 10 años.
Fuente: elaboración propia

Paso 16. Existen otras tecnologías

Para este estudio de caso solamente se analizó una sola tecnología. De evaluarse otras alternativas de producción, debe aplicarse la metodo-

logía propuesta con todos sus pasos y comparar los resultados con los obtenidos para la extracción por destilación con arrastres de vapor.

Paso 17. Existen nuevas capacidades

Para este estudio de caso solamente se analizó una sola capacidad que es de 62.4 kg/d. De incrementarse la demanda, hay que evaluar los impactos que esto tuviera sobre los principales indicadores técnicos, económicos y medioambientales determinados previamente y evaluar si se mantiene la factibilidad de acometer la inversión.

Paso 18. La tecnología y capacidad

Si se sigue lo propuesto por este procedimiento secuencial, se puede tomar la decisión de invertir en el diseño de una planta de extracción de aceite esencial con una capacidad de producción de 62,4 kg/día siguiendo una tecnología en lotes. Esto se debe a que con esta capacidad se satisface la demanda del mercado de la cooperativa, obteniendo un mayor VAN, una TIR de 46 % y en período de recuperación adecuado de 3 años.

La tecnología y la capacidad seleccionada se consideran óptimas no solo desde el punto de vista económico, sino también desde los puntos de vista técnico, ambiental y social. Esto se debe a que la tecnología que llega a este paso, ha sido analizada según criterios ambientales (de consumo y de vertimiento) y optimizada según métodos experimentales y estadísticos, en varias etapas de la propuesta metodológica.

Como resultados fundamentales de la aplicación de la metodología, se plantea que se demuestra la factibilidad técnica y económica del proceso de producción del aceite a partir de la determinación de las condiciones de operación de la etapa de extracción y el diseño conceptual del proceso de obtención, lo cual valida la propuesta tecnológica así como la metodología propuesta para el diseño de procesos para la extracción de aceites esenciales. Por otra parte, aunque se reportan varias tecnologías para este fin, se demuestra que el proceso de extracción por destilación por arrastre de vapor es la que más ventajas posee con respecto a las analizadas.

Debe destacarse la importancia de los estudios experimentales a escala de laboratorio que permitieron determinar las principales condiciones de operación del proceso de extracción, así como los niveles para los cuales se obtienen los mayores rendimientos.

Que se realice un estudio para determinar la cantidad de vapor óptimo para la extracción de aceite esencial y el esquema de operación utilizando la tecnología de destilación con vapor de agua para la capacidad propuesta.

No obstante, a todos estos resultados, se hace necesario evaluar diferentes fuentes de energía que permitan reducir los costos de producción por este concepto, así como evaluar fuentes de energía renovables para reducir los impactos sobre el medio ambiente.

CAPÍTULO V

ACEITE ESENCIAL DE MORINDA CITRIFOLIA

Morinda citrifolia, llamada comúnmente noni, guanábana cimarrona, fruta del diablo o mora de la India, es una planta arbórea o arbustiva de la familia de las rubiáceas; originaria del sureste asiático, ha sido introducida a la India, la Polinesia y Panamá.

Pasos para la obtención

De forma análoga al procedimiento desarrollado para la Pimenta racemosa, se desarrolla la simulación del proceso de obtención de aceite de *Morinda citrifolia* utilizando el software SuperPro Designer®. Este se caracteriza por facilitar la modelación, diseño y optimización de procesos integrados en un amplio rango de industrias tales como farmacéuticas, biotecnológicas, agroquímicas, alimenticias, tratamiento de residuales y purificación de agua, entre otras. Por otra parte, contiene herramientas para la estimación de balances de masa y costos en una planta dada operando tanto de forma continua como por lotes, así como también por contener herramientas de cálculo diseñadas específicamente para procesos que incluyen componentes biológicos.

De forma general, y teniendo en cuenta el ejemplo anterior, algunos pasos se funden en dependencia de las características específicas del proceso en estudio, así como de simplificar los análisis.

Paso 1. Producto

La *Morinda* (*Morinda oleifera*) es un árbol de tamaño pequeño que crece en regiones tropicales y que presenta una gran plasticidad eco-

lógica. Es altamente valorado a nivel mundial por las propiedades que posee y que le permiten ser catalogado como un árbol que ofrece una gran versatilidad como materia prima en diferentes industrias.



Figura 13: *Morinda citrifolia*. Planta y frutos

Fuente: <https://food.ndtv.com/opinions/the-big-benefits-of-the-little-noni-juice-753159>

El aceite de semilla de *Morinda oleífera* puede tener varios usos a nivel industrial, entre estos se cuentan su potencialidad como biocombustible, aceite comestible de alta calidad y de uso cosmético. En materia de salud, el aceite de semilla de *Morinda* se ha utilizado históricamente para ayudar a enfermedades de la piel, gota, dolor en las articulaciones, el escorbuto, inflamación, dolor de estómago, reumatismo y muchas otras condiciones. Se caracteriza por una vida útil extraordinariamente larga y un sabor suave, pero agradable.

Dentro de su composición se destaca el ácido oleico (65,7%), el ácido palmítico (9,3%) y el ácido esteárico (7,4%) entre otros.

El ácido oleico se considera como una fuente saludable de grasa y se usa como un sustituto de altas grasas animales saturadas. También se emplea en la fabricación de cosméticos y jabones, en la limpieza de metales y en la industria textil.

Paso 2: Selección de la tecnología

En este caso se propone la extracción con dióxido de carbono en estado supercrítico, teniendo en cuenta las ventajas de este estado de comportamiento como líquido y gas, y por la disponibilidad del dióxido de carbono.

Pasos 3 y 4: Definición del esquema tecnológico y de la capacidad de la planta

Se parte de una capacidad de 450 kg/lote de frutos de *Morinda citrifolia* y se asume que la planta trabaja al 75% de capacidad los primeros 4 años, para luego aumentar hasta un 90% durante todo el tiempo de vida de la misma. La figura 14 muestra el esquema tecnológico.

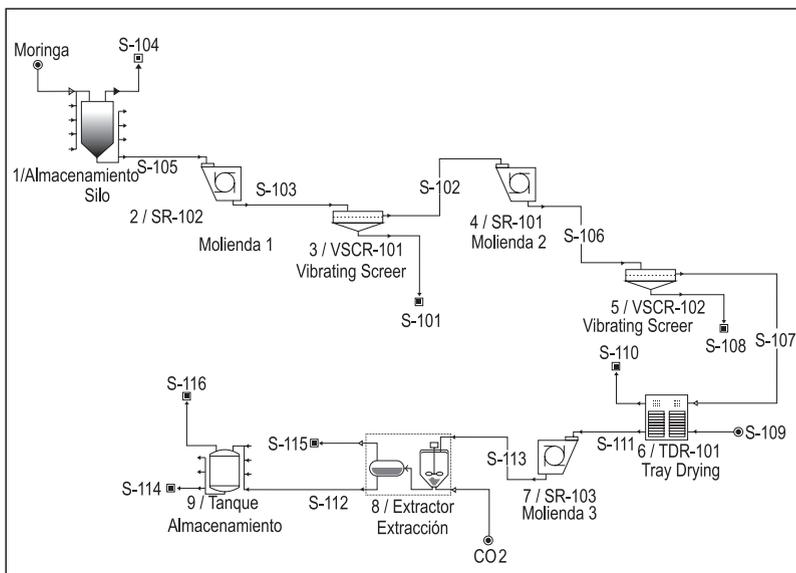


Figura 14: Diagrama de flujo del proceso de obtención de Morinda obtenido en el simulador SuperPro Designer®
Fuente: elaboración propia

El proceso de producción del aceite de Morinda comienza con la recepción de las vainas en un silo de almacenamiento de 600 kg de capacidad nominal, para luego alimentarlas a un primer molino de disco. La corriente de salida de este molino es vertida en un tamiz vibratorio para separar la vaina de los demás componentes. La mezcla sólida sin vainas es alimentada a un segundo molino con el fin de triturar los componentes sólidos que no fueron separados en el primer tamiz. La salida del segundo molino es enviada hacia un segundo tamiz vibratorio en el cual se separan la cáscara del resto de los componentes sólidos. La mezcla sólida sin cáscara es enviada hacia un secador de bandejas, con el fin de extraerle la mayor cantidad de

agua posible. La mezcla sólida deshidratada es enviada a continuación hacia un tercer molino para proceder a su trituración final, obteniéndose a la salida de este equipo una mezcla sólida con consistencia de harina. Esta harina es enviada hacia un extractor sólido-líquido, el cual emplea dióxido de carbono líquido (en estado supercrítico) como solvente para realizar la extracción del aceite de Morinda contenido en la harina. Una vez extraído, el aceite es finalmente almacenado en un tanque de almacenamiento de 1000 L de capacidad.

Paso 5. Realización del estudio de macro localización

De manera análoga al ejemplo anterior, se propone instalarla en la provincia de Camagüey, donde existe disponibilidad de esta planta.

Paso 6. Realización de los balances de masa y energía

Teniendo en cuenta la capacidad de la planta, los valores reportados por la literatura de índices de consumo de materias primas, materiales y el rendimiento de las operaciones de extracción con fluidos supercríticos, los balances de masa y energía se simulan en el software SuperPro Designer®.

Paso 7 y 8. Constatación de la disponibilidad y consumo de la materia prima y la compatibilidad ambiental

Según lo expresado en el paso 5, existe disponibilidad de frutos de Morinda citrifolia, lo que indica que el problema de disponibilidad de materias primas, transportación, preparación previa y otros aspectos que pueden influir en la durabilidad de fruto después de recolectado, nos serán los aspectos que limiten la sostenibilidad del proceso.

En el caso del dióxido de carbono, existe también disponibilidad en la provincia de Camagüey. Además, se concibe que este gas sea recuperado después del proceso de extracción, reduciendo considerablemente los costos.

Por otra parte, la generación de residuos sólidos, bagazo de la fruta después que es extraído el aceite, está previsto su utilización en la producción de alimento animal, aspecto este que reduce sus

deposiciones al medio ambiente, además de generar un ingreso adicional al proceso.

Paso 9. Realización de modificaciones tecnológicas

De forma análoga al ejemplo anterior, no se prevé modificaciones adicionales al proceso.

Paso 10 y 11. Determinación de la capacidad y disponibilidad de los equipos y el costo de adquisición

La tabla 15 muestra los costos de cada equipo presente en el diagrama de producción los cuales se obtienen a través del software SuperPro Designer®.

Tabla 15. Costos de adquisición de los equipos

Equipo	Capacidad	Costo (USD)
Silo de almacenamiento	2 000 L	5 000
Molino 1	1 500 kg/h	7 000
Molino 2	1 500 kg/h	7 000
Molino 3	1 200 kg/h	6 000
Tamiz vibratorio 1	720 kg/h	1 800
Tamiz vibratorio 2	720 kg/h	1 800
Secador de bandejas	200 pies ² /bandeja	38 000
Extractor	1 200 L/h	150 000
Tanque almacenam.de aceite	1 000 L	3 000
TOTAL		219 600

Fuente: Elaboración propia

Paso 12. Control automático del proceso

Debido a la complejidad en el manejo y operación de proceso que utilizan fluidos en condiciones supercríticas, específicamente el dióxido de carbono que puede alcanzar 71 atm de presión, el proceso debe estar altamente automatizado, sobre todo en el control de la

presión y temperatura del extractor. Para el análisis económico se tiene en cuenta el aporte de esta partida en el costo de inversión.

Paso 13. Realización del análisis económico

En el presente trabajo se lleva a cabo la simulación del proceso de producción del aceite de Morinda mediante la aplicación del simulador de procesos SuperPro Designer®. En el mismo también se llevan a cabo dos estudios de sensibilidad, el primero de ellos radica en la evaluación de la influencia del incremento del precio de venta del aceite de Morinda en el rango de 30-50 USD/kg, manteniendo constante la capacidad de procesamiento de la planta en 450 (kg_{morinda}/lote), sobre los principales indicadores económicos de la planta, esto es, Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Retorno de la Inversión (PRI), entre otros.

El segundo estudio de sensibilidad consiste en determinar la influencia del incremento de la tasa de producción de la planta desde 300 hasta 800 kg/lote, manteniendo constante el precio de venta del aceite de Morinda en 35 USD/kg, sobre los indicadores económicos VAN, TIR y PRI.

Se parte de una tasa de interés del 7% para determinar el valor del VAN, así como también un 35 % de impuestos por concepto de ingresos. Se asume que la planta trabaja 11 meses al año con un mes para realizar labores de mantenimiento de equipos, accesorios y demás, que la planta posee la infraestructura necesaria para llevar a cabo procedimientos de control de calidad y mantenimiento y que no existen sobrecostos debido al tratamiento de lotes de aceite defectuosos que no cumplan con los parámetros de calidad establecidos.

El precio de adquisición del CO₂ licuado se establece 0,6677 USD/kg, el precio de venta del aceite de Morinda se fija en 35 USD/kg, mientras que el precio de la *Morinda citrifolia* (materia prima) se fija en 0,50 USD/kg.

CAPÍTULO VI

ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

Una vez efectuada la simulación del Caso Base y obtener así resultados de los principales indicadores técnico-económicos del proceso en cuestión, características técnicas de los equipos empleados, así como también la composición de las principales corrientes, se procede a realizar dos análisis de sensibilidad con el fin de evaluar la influencia de determinados factores sobre los principales indicadores técnico-económicos de la planta.

- **Estudio de sensibilidad N° 1**

Se llevó a cabo un primer estudio de sensibilidad consistente en determinar la influencia de la variación del precio de venta de la Morinda desde USD 30/kg hasta 50/kg (manteniendo constante la capacidad de la planta en 450 kg/lote) sobre los indicadores VAN, TIR y PRI, entre otros indicadores tales como Ganancias Anuales, Retorno de la Inversión y Margen Grueso.

- **Estudio de sensibilidad N° 2**

El estudio de sensibilidad No. 2 consistió en evaluar la influencia de la variación de la capacidad de procesamiento de la planta desde 300 hasta 800 kg/lote (manteniendo constante el precio de venta del aceite de Morinda en USD \$ 35/kg), sobre los parámetros VAN, TIR y PRI, además de otros parámetros tales como Ganancias Anuales, Costo Neto de Operación, y Retorno de la Inversión.

Resultados obtenidos durante la simulación del Caso base en el SuperPro Designer

La tabla 16 muestra los principales resultados obtenidos durante la simulación del Caso Base en el simulador SuperPro Designer®.

Tabla 16: Resultados obtenidos del Caso Base en el simulador SuperPro Designer®

Parámetro	Valor	Unidades
Inversión Total de Capital	1 953 000	USD
Costo de Operación Anual	1 189 000	USD/año
Ganancias Anuales	1 709 000	USD /año
Capital Fijo Directo	1 722 000	USD
Capital de Trabajo	68 000	USD
Costo de Arrancada	90 000	USD
Costo Unitario de Producción	19,97	USD/kg _{aceite}
Número de Lotes por Año	165	Lotes/año
Ganancias Netas Anuales	534 000	USD/año
Margen Neto	30,42	%
Retorno de la Inversión	27,37	%
Valor Actual Neto (VAN)	1 132 000	USD
Tasa Interna de Retorno (TIR)	17,42	%
Período de Retorno de la Inversión (PRI)	3,65	años

Partidas del costo total directo de la planta (CTDP)	Valor (USD)
Costo de Adquisición del Equipamiento	219 600
Instalación	137 000
Tuberías	102 000
Instrumentación	116 000
Aislamiento	9 000
Instalaciones eléctricas	29 000
Edificaciones	131 000
Mejoras del Terreno	44 000
Servicios Auxiliares	116 000
Total	903 000
Costo Total Indirecto de la Planta (CTIP)	
Ingeniería	244 000
Construcción	341 000
Pago al contratista	78 000
Contingencias	156 000
Total	819 000
Costo Total Directo de la Planta = CTDP + CTIP	1 722 000

Fuente: elaboración propia.

Según se puede observar, para una planta de producción de aceite de Morinda con una inversión inicial de alrededor de USD 2 millones, el proyecto puede clasificarse de rentable y factible desde el punto de vista económico, ya que el valor de PRI obtenido no supera los 5 años (3,65 años), la TIR es superior al 15 % (17,42 %) y el VAN presenta valor positivo (USD 1 132 000), lo cual es sinónimo de rentabilidad y ganancias.

Resultados obtenidos para el estudio de sensibilidad Nº 1

En la figura 15 se observa que, a medida que aumenta el precio del aceite de Morinda, la Inversión Total y el Costo Neto de Operación se mantienen constantes, ya que no dependen del precio del aceite. Por tanto, un incremento del mismo no tendrá un efecto directo en el costo de inversión. Un comportamiento similar se observa para el caso del Costo de Operación. En el caso de las Ganancias Anuales se observa que existe un incremento con el aumento del precio, caracterizado por un modelo lineal del tipo $G = 31060 \cdot PM + 1000$, donde G es la ganancia (en \$/año) y PM es el precio de la Morinda (en \$/kg).

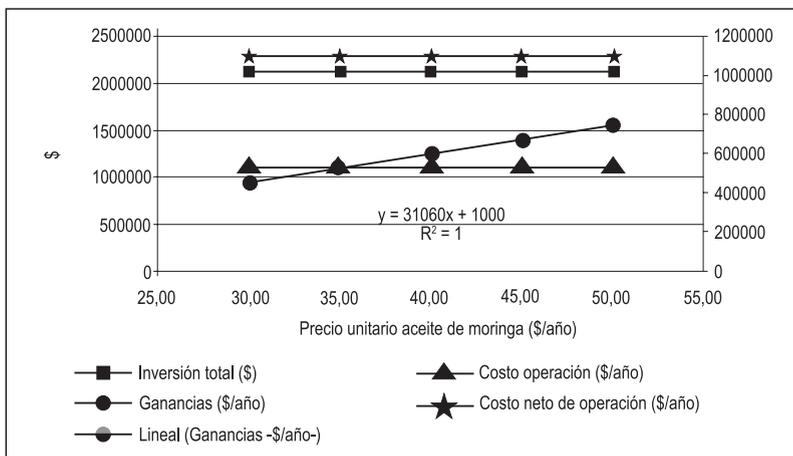


Figura 15: Costos de operación, ganancias e inversión en función de precio de venta de la Morinda (1\$=1USD). Fuente: elaboración propia

La figura 16 muestra el punto de equilibrio a partir de donde se comienza a obtener ganancia, el cual corresponde a un precio

unitario de 35 USD/kg. A partir de este valor, la ganancia unitaria comienza a ser superior al costo unitario, independientemente del costo unitario, el cual se mantiene constante. La utilidad bruta es la diferencia entre el ingreso monetario por ventas y el costo de ventas. El margen grueso o de utilidad bruta (GPM) se calcula como un porcentaje, esto es, se divide la utilidad bruta entre los ingresos por ventas.

$$GPM = (\text{Ingreso por ventas} - \text{costo de ventas}) / \text{Ingreso por ventas}.$$

El margen de utilidad es el resultado final de las estrategias de costo unitario y de volumen, así como de la estrategia de asignación de precios. Se aprecia que la ganancia unitaria es directamente proporcional al margen grueso.

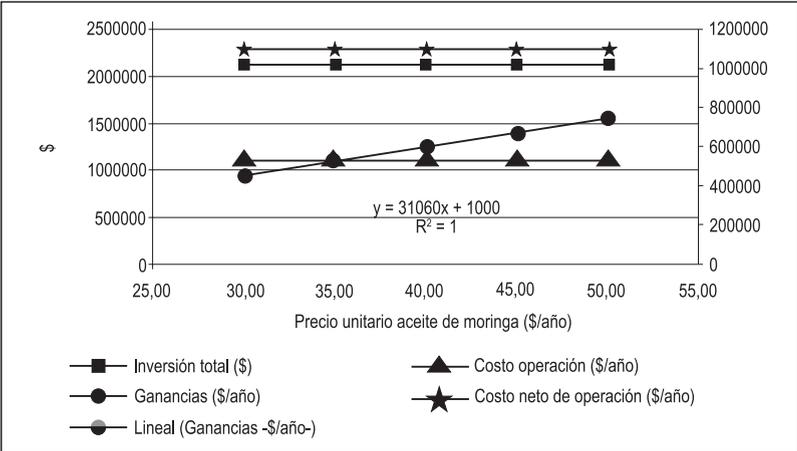


Figura 16: Costos unitarios, ganancia unitaria y margen grueso en función del precio de venta de la Morinda (1\$=1USD). Fuente: elaboración propia

La figura 17 muestra el comportamiento de los indicadores VAN, TIR Y PRI. En la misma se observa que el PRI disminuye a medida que aumenta el precio unitario de la Morinda, mostrando una reducción en la velocidad por encima de los 35 USD/kg. Esto se debe a que, para obtener una misma producción de aceite, se debe invertir más por concepto de materias primas, lo que hace que las ganancias sean menores, y menores sean también los pagos al banco. El VAN muestra valores positivos para un precio de venta superior a 44,65 USD/kg lo que indica que vender el aceite por debajo de este valor implicaría una pérdida de la planta.

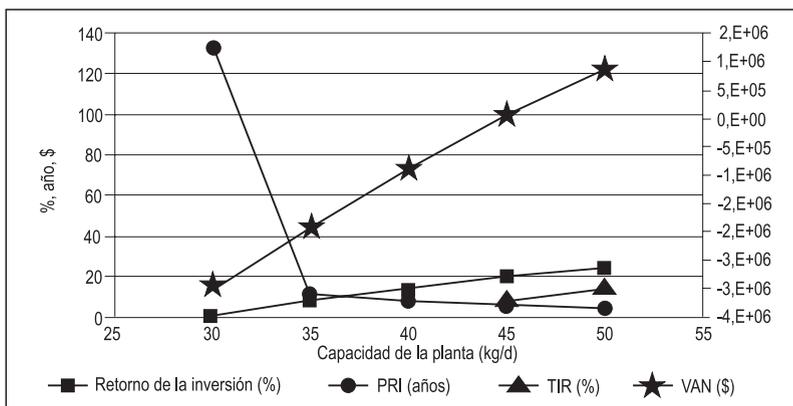


Figura 17: Indicadores dinámicos de la inversión en función de la capacidad de la planta.
Fuente: elaboración propia

Resultados obtenidos para el estudio de sensibilidad N° 2

La figura 18 muestra el efecto del cambio en la capacidad de la planta sobre los principales indicadores económicos.

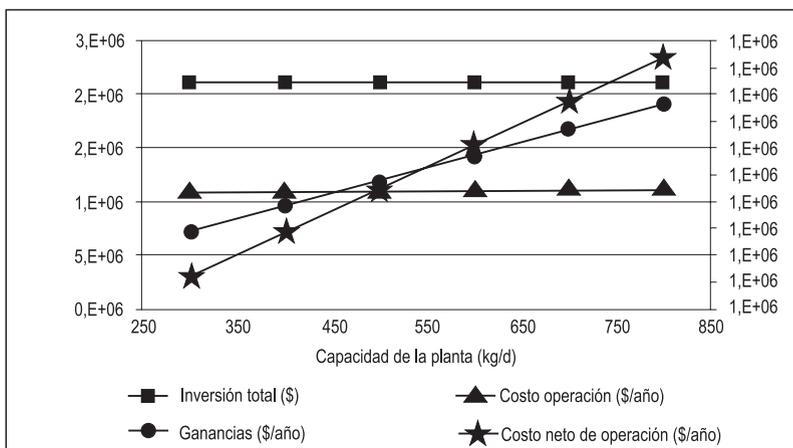


Figura 18: Efecto de la capacidad de la planta en los indicadores económicos
Fuente: elaboración propia

Los resultados muestran que a medida que se incrementa la capacidad de la planta se incrementan las ganancias brutas y el costo neto de operación. De igual forma se comportan la inversión y el costo de operación, solo que sus variaciones son tan pequeñas que su comportamiento tiende a ser constante en el rango de capacidades

evaluadas. Esto se debe al sobrediseño de los equipos que permiten asimilar los diferentes valores de capacidades sin cambiar el número de equipos.

En el caso de los indicadores dinámicos de la inversión (ver figura 19) se aprecia que todos aumentan con el incremento de la capacidad. Esto se debe a que la producción aumenta, incrementándose también los ingresos por concepto de venta del aceite.

Sin embargo, se observa que a partir de una capacidad superior a 581,98 kg/día el VAN toma valores positivos, lo que indica que, para el precio de 35 USD/kg la inversión no es rentable para capacidades menores de 581,98 kg/día.

Para el caso del PRI, se observa que es muy elevado para la capacidad de 300 kg/día lo que indica que no se debe trabajar a estos niveles. Posteriormente, disminuye considerablemente, hasta 2,87 años para una capacidad de 800 kg/día.

En el caso de la TIR se comporta aceptable para todas las capacidades evaluadas por encima de los 504,42 kg/día.

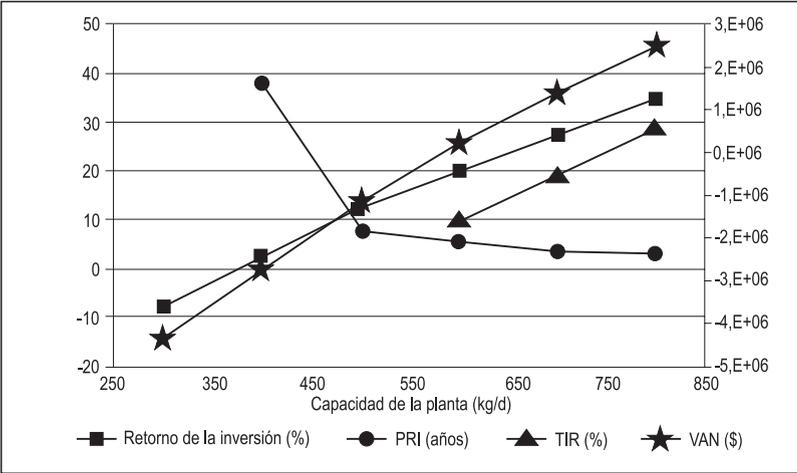


Figura 19: Indicadores dinámicos de la inversión en función de la variación de la capacidad. Fuente: elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

- Azar, P. (2011)
Microwave-Assisted Hydrodistillation of Essential Oil from *Thymus vulgaris* L., *Asian Journal of Chemistry*, 23(5): 2162-2164.
- Barroso, M. y col. (2012)
Supercritical fluid extraction of volatile and non-volatile compounds from *Schinus molle* L., *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 28(2): 305–312.
- Boumhara, K. (2014)
Use of *Artemisia Mesatlantica* Essential Oil as Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in 1 M Hydrochloric Acid Solution, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9: 1187–1206.
- Bruneton, J. (2003)
Elementos de Fitoquímica y Farmacognosia. 230-290.
- Cseke, L.; Setzer, J. W., B., V. S., Kirakosyan, A. & B., K. P. (2006)
Traditional, analytical and preparative separations of natural products. *Natural Products from Plants*. 210-212.
- Chidell, F. (Ed.) (1992)
Aromaterapia, una guía definitiva de los aceites esenciales (Primera edición ed.).

- Da-Jung, D.; Youl, J.; Eun, S.; Gyu, Il.; Seok, Y. (2013)
Effects of Ylang-ylang aroma on blood pressure and heart rate in healthy men. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 9(2): 250-255.
- Díaz, D.; Geraldo, V. (2009)
Extracción experimental y diseño de una planta piloto para el procesamiento de extractos naturales con dióxido de carbono supercrítico. Tesis de grado. Venezuela
- Dudareva, N.; Pichersky, E. y Gershenzon, J. (2004)
Biochemistry of plant volatiles. *Plant Physiol*, 135.
- García, A. (2005)
Obtención de aceite vegetal, mediante un método de extracción por solvente.
- Hamid A.A.; Aiyelaagbe, O.O.; Usman, L.A. (2011)
Essential oils: its medicinal and pharmacological uses. *Int J Curr Res*, 86-98.
- Kumar, S. (2010)
Extraction of essential oil using steam distillation.
- Obi, H. (2013)
Diseño del proceso de obtención de aceite esencial a partir de *Pimenta Racemosa*, Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad de Camagüey, Cuba.
- Pérez, A.; Benítez, I.; Oquendo, H. y Galindo, P. (2012)
Integración del diseño del sistema de control automático al diseño total de una planta para obtención de alimento animal a partir de residuos de la industria azucarera. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*, 47(2): 42 – 51.
- Pérez-Martínez, A.; Cervantes-Mendieta, E.; Julián-Ricardo, M. C.; González-Suárez, E.; Gómez-Atanay, A.; Oquendo-Ferrer, H.; Galindo Llanes, P. y Ramos-Sánchez, L. (2012)
Procedimiento para enfrentar tareas de diseño de procesos de la industria azucarera y sus derivados. *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(2), 333-349.

- Peter, M. S. y Timmerhaus, K. D. (1991)
Plant design and Economics for Chemical Engineering, McGraw
and Hill International Editions, EEUU, 150-253.
- Rogers, J. A. (1984)
Elementos de Tecnología de los Alimentos. 685-686.
- Sao Pedro, A. (2013)
The use of nanotechnology as an approach for essential oil-based
formulations with antimicrobial activity, them: science, techno-
logy and education (A. Méndez-Vilas, Ed.).
- Singh, B.; Sellam, P.; Majumder, J.; Rai, P. (2014)
Floral essential oils: importance and uses for mankind. Hort Flo-
ra Research Spectrum, 3(1): 7-13.
- Tongnuanchan, P.; Benjakul, S. (2014)
Essential Oils: Extraction, Bioactivities, and Their Uses for Food
Preservation. Journal of Food Science, 79(7): 1231-1243.

Considerando la potencialidad del uso y aplicaciones de los aceites esenciales como productos químicos y su impacto en las economías regionales, este libro pretende brindar información sobre métodos de extracción, estrategias y pasos para el diseño preliminar del proceso de obtención de aceites esenciales de *Pimenta racemosa* y *Morinda citrifolia*. Se concluye con dos análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de determinados factores sobre los principales indicadores técnico-económicos de la planta industrial obtenidos del caso base en el simulador SuperPro Designer®.