

19
24

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**OPTIMIZACION Y ESCALAMIENTO DE UN
PROCESO ENZIMATICO PARA LA OBTENCION
DE ACRITE DE COCO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

QUIMICO FARMACEUTICO

B I O L O G O

P R E S E N T A :

MARIA ANTONIA BARRIOS VAZQUEZ

MEXICO, D. F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

CAPITULO		Pag.
1	INTRODUCCION.....	1
2	GENERALIDADES.....	15
3	MATERIALES Y METODOS.....	45
4	RESULTADOS Y DISCUSION.....	54
4.1	Análisis proximal.....	54
4.2	Reacción enzimática.....	56
4.3	Recuperación de enzimas.....	60
4.4	Separación de fases.....	62
4.5	Efecto del tiempo y velocidad de agitación.....	63
4.6	Velocidad ascensional de la crema.....	64
4.7	Recuperación de la crema.....	66
4.8	Recirculación de agua y enzimas.....	68
4.9	Modificación en las condiciones de reacción.....	76
4.10	Agua residual.....	78
4.11	Elaboración de una bebida con sabor a coco.....	80
4.12	Deshidratación de la pulpa de coco residual.....	82
4.13	Resumen del proceso de separación.....	91
4.14	Diseño global del proceso.....	94
5	CONCLUSIONES.....	98
6	BIBLIOGRAFIA.....	100
	ANEXO A.....	102
	ANEXO B.....	107

INTRODUCCION

México es productor de una amplia variedad de semillas oleaginosas entre las cuales el coco ocupa un lugar importante. La región productora de coco se localiza a lo largo de las franjas costeras del Pacífico y el Golfo de México, donde la temperatura es superior a los 25°C, óptimo para este cultivo que requiere de un clima tropical.

Los principales estados productores de copra son: Guerrero, Colima y Tabasco. Guerrero ocupa el primer lugar como productor de copra. Dedicó una superficie de 68,000 hectáreas para el cultivo del cocotero, siendo el coco la principal semilla oleaginosa que se procesa e industrializa en este estado, de ahí que desde el punto de vista económico el coco sea uno de los cultivos más importantes para la región.

El estado de Colima se perfila como el segundo productor de copra a nivel nacional. El estado cuenta con 10 plantas industrializadoras las cuales procesan 14,367 toneladas de copra anualmente, destinada principalmente a los estados de México y Jalisco.

El estado de Tabasco ocupa el tercer lugar como productor de copra a nivel nacional. Aquí el coco es aprovechado como insumo, en la totalidad de su producción por una importante planta transformadora de grasas y aceites vegetales, propiedad de la Unión Regional de Productores de coco.

En Tabasco la copra ocupa también el tercer lugar en superficie cosechada dentro del grupo de perecedoros, con una extensión de 28,400 hectáreas dedicadas al cultivo del cocotero, superada tan solo por el cacao y la caña de azúcar. Los principales municipios que se dedican a la producción de coco son : Paraiso, Cardenas y Centro.

En menores volúmenes, el coco se cultiva también en los estados de Campeche, Michoacan, Quintana Roo, Veracruz, Yucatán, Jalisco, Oaxaca, Chiapas, Sinaloa, y Nayarit.

A pesar de que el cocotero tiene una gran variedad de usos (Fig. 1) y de que su posibilidad de aprovechamiento integral hace que se le considere como uno de los más importantes cultivos dentro de la economía de los países tropicales, en nuestro país no se ha llegado a una industrialización eficiente e integral como para obtener todos los productos y subproductos que de esta planta se pueden obtener.

El fruto del cocotero tiene también una gran variedad de usos (Fig 2), sin embargo, en nuestro país, solo se comercializa el albumen o pulpa fresca del fruto para consumo humano, lo cual no tiene una importancia económica. De la pulpa fresca se obtiene la copra y el coco rayado deshidratado, productos que tienen una mayor importancia económica, lo cual ha originado que la explotación del cocotero se destine principalmente a la producción de la copra y sus derivados.

De la copra se extrae el aceite de coco por prensado y se obtiene como subproducto una pasta de copra que es destinada para la

alimentación de ganado.

El aceite de coco tiene gran número de aplicaciones en diferentes tipos de industrias (Fig. 3). A continuación se describen algunas de las industrias en las que se emplea el aceite de coco o alguno de sus derivados:

- En la industria textil se emplea como ablandador de hilazas, en la fabricación de hilos, en especial en el algodón, también se usa como un acarreador de tintes o colorantes para telas.

- En la industria alimentaria, el aceite de coco se usa como sustituto de grasa en la leche, en la elaboración de margarinas, en repostería o se combina con otros aceites para la fabricación de otros productos.

Su alto punto de fusión (23-25°C) le da una apariencia sólida en lugares con una temperatura promedio diaria menor a 23°C, como la ciudad de México, mientras que en zonas tropicales, con temperaturas promedio diarias mayores, es líquido, por lo que se puede usar como aceite de cocina, dependiendo de su calidad.

- En la industria aeronáutica se usa en la fabricación de fluidos hidráulicos.

- En la industria de los tensoactivos y jabones, el aceite de coco, se usa para la elaboración de jabones, mediante la saponificación directa con sosa o potasa.

Su índice de saponificación lo hace el mejor aceite para la fabricación de jabón y el que contenga ácidos grasos saturados.

de bajo peso molecular lo hace inmejorable para la fabricación de detergentes biodegradables y como base para shampoos.

- En la industria química farmacéutica; los tres ácidos grasos más importantes por su concentración (Tabla I) y por sus usos son: el láurico, mirístico y cáprico. Dichos ácidos se pueden separar y purificar para utilizarse en la fabricación de los alcoholes correspondientes y una vez sulfatados tienen propiedades detergentes y tensoactivas con la ventaja de ser biodegradables.

Del ácido mirístico se obtiene el 1-tetradecanol y a partir de este se sintetiza el mercaptan-n-tetradecilico, que se emplea como regulador en la polimerización del caucho.

Como se puede apreciar la producción de aceite de coco tiene gran importancia en la industria, de ahí que la búsqueda de nuevos métodos que aumenten el rendimiento y eleven la calidad del aceite, así como que logren una integración de esta importante agroindustria, son imperativos.

El método tradicional de extracción de aceite de coco empleado en nuestro país, consiste en utilizar copra secada al sol, la cual es molida y pasada a través de una prensa para extraer el aceite de coco y posteriormente refinarlo. Este método tiene las siguientes desventajas:

- Pérdida de aceite por contaminación microbiana, ataque de insectos y roedores y eventual producción de aflatoxinas durante el secado al sol.

- Daños químicos: enranciamiento de aceite durante el secado.
- Costos elevados de adquisición de maquinaria y de mantenimiento.
- Pérdidas considerables en épocas de lluvia o baja radiación solar.
- Elevado costo de operación y gasto energético.
- Etapas de refinado necesarias.

Ante el creciente desarrollo de tecnologías biológicas, que sustituyen a procesos químicos, surgió la idea de encontrar un proceso más sencillo y económico para extraer el aceite de coco. De esta idea surgió un proceso enzimático desarrollado en el Departamento de Alimentos de la Facultad de Química de la UNAM, para la extracción de aceite de coco. Se trata de un proceso de extracción en húmedo que no requiere de refinado, pues la calidad del producto es elevada y cumple con la norma de calidad de SECOFI (Cintra y col. 1984).

En el desarrollo del proceso enzimático para la obtención del aceite de coco se utilizó pulpa de coco fresca, con la cual se preparó una emulsión de la manera siguiente: se molió la pulpa de coco en un molinex se le adicionó una cierta cantidad de agua y se molió en licuadora casera por un minuto, obteniéndose una emulsión. A esta solución se agregan las enzimas, midiéndose la estabilidad durante la reacción. Se encontró que la emulsión es muy inestable, independientemente de la concentración de enzimas utilizadas para la reacción.

Debido a que el proceso es húmedo y que el coco no cuenta con una humedad libre suficiente para que las enzimas desarrollen su

conformación estable con propiedades biológicamente activas y se pueda llevar a cabo la reacción enzimática, fue necesario adicionar agua a la carnaza o pulpa de coco y así formar la emulsión, para lo cual se buscó una dilución adecuada para que el medio de reacción no fuera ni muy líquido ni demasiado pastoso y se obtuviera el máximo rendimiento. La dilución con que mejores resultados se obtuvieron fue de 1:4, (partes de coco por partes de agua), la cual fue utilizada para todas las demás reacciones.

Una vez determinada la dilución óptima se llevo a cabo la selección de las enzimas que permitiesen el mejor rendimiento de extracción, ya que al inicio se utilizó una mezcla de enzimas.

Para la selección se tomó en cuenta la composición del coco. Se decidió usar poligalacturonasa, proteasa microbiana, alfa-amilasa y celulasa, las cuales en teoría, deberían romper los enlaces de las macromoléculas correspondientes liberando así el aceite.

En las pruebas realizadas se midió el rendimiento con cada una de las enzimas, posteriormente se hicieron mezclas entre ellas para explorar el posible efecto sinérgico. Se encontró un incremento en el rendimiento al mezclar la poligalacturonasa con la alfa-amilasa y la proteasa, eliminandose la celulasa debido a que el efecto que tenía en la liberación del aceite era mínimo.

Seleccionadas las enzimas a utilizar se procedió a la búsqueda de la concentración adecuada para obtener un máximo en el rendimiento, obteniendose que 0.1% P/V de cada una de las enzimas era la concentración mínima a la cual el rendimiento era adecuado.

También se determinó temperatura y tiempo de reacción, midiendo el rendimiento a diferentes tiempos de reacción a las temperaturas de 20, 30 y 40°C, resultando que a 60 minutos y 40°C, utilizando la dilución de 1:4 y una concentración de enzimas de 0.1% P/V de poligalacturonasa, proteasa microbiana y alfa amilasa, el rendimiento obtenido era del 80%.

La separación del aceite liberado, durante la reacción se hizo mediante la centrifugación de la emulsión, por lo que se determinó el tiempo y rpm necesarias para que la separación se llevara al máximo. Se definió de estos experimentos que a 10,000 rpm durante 15 minutos el rendimiento obtenido era del 80%.

Como conclusión se definió para el proceso enzimático de extracción de aceite de coco las siguientes condiciones de operación :

Dilución (coco-agua): 1:4

Concentración de enzimas:

0.1% poligalacturonasa

0.1% proteasa microbiana

0.1% alfa-amilasa

Tiempo de reacción : 60 minutos

Temperatura : 40°C

Velocidad de centrifugación : 10,000 rpm.

Tiempo de centrifugación : 15 minutos.

Todas las pruebas hechas para definir las condiciones mencionadas anteriormente se hicieron en matraces erlenmeyer de 250 ml. El rendimiento fue determinado, midiendo la altura ocupada por el

aceite en el tubo de la centrifuga, para después calcular el volumen de aceite obtenido. Como se puede apreciar el proceso fue hecho a nivel laboratorio.

Debido a que México es un país que cuenta con una buena producción de coco, de acuerdo con los datos presentados con anterioridad, se planteó la alternativa de llevar este proceso a nivel de planta piloto. La primera prueba se efectuó en la ciudad de Colima, en una planta que se dedica a la extracción del aceite de coco por el método tradicional de prensado de copra. (Aceites y Mantecas S.A. de C.V.).

Al escalar el proceso se presentaron dos problemas principalmente:

- a) La dificultad para la recuperación de la crema y
- b) El bajo rendimiento obtenido.

Una vez terminada la reacción el coco tiende a sedimentarse y la grasa a ascender, el problema era como separar la capa de grasa formada en la parte superior del tanque de reacción. En el laboratorio se dejaba solidificar y se recuperaba posteriormente, fundiendo antes de centrifugar, lo cual era imposible en la planta. Por esta razón se requería de diseñar algún método específico para recuperar esta crema con los mismos rendimientos que a nivel laboratorio.

También surge la necesidad de procesar el coco residual, el cual se obtiene con un alto grado de humedad y debe ser secado para evitar su descomposición y pueda seguir siendo usado como

alimento para animales.

Con base a las consideraciones anteriores se planteó la necesidad de optimizar las condiciones del proceso y definir las etapas faltantes con respecto al diseño originalmente planteado.

La optimización incluye la temperatura de reacción enzimática, concentración de enzimas y el tiempo de reacción. También se plantea la necesidad de encontrar la manera más eficiente y sencilla de recuperar la fase cremosa después de la reacción y explorar la alternativa de recircular las enzimas para abatir los costos del proceso. Finalmente encontrar las condiciones de secado para el coco residual, después de la extracción de grasa, para darle un uso como subproducto utilizandolo como alimento para animales por su alto contenido de fibra y proteína, o bien, si el proceso se efectúa en condiciones higiénicas (para aprovechar el agua residual), este coco puede ser utilizado para consumo humano en : confitería, como ingrediente secundario para dar sabor, olor y modificar la textura; en pastelería, como cobertura para pastel, en la elaboración de rellenos y como saborizante; en cubiertas para helados, paletas u otras golosinas y como alimento dietético.

Se decidió estudiar el secado de coco en forma mecánica y no proceder como en el proceso tradicional por secado al sol, ya que se ha demostrado que pueden producirse aflatoxinas por contaminación fúngal.

En resumen : el objetivo de este trabajo es el de optimizar y escalar el proceso desarrollado en el Departamento de Alimentos en 1984 y probado a nivel piloto en 1987. Las etapas que comprende el proyecto son :

- a) Selección de la temperatura de reacción.
- b) Selección de las enzimas y su concentración.
- c) Selección del tiempo de reacción.
- d) Adecuación de los costos de enzimas en el proceso (minimizar).
- e) Definición de un proceso para la separación de fases.
- f) Definición de las posibilidades de recirculación de enzimas y su efecto en los costos.
- g) Caracterización de subproductos.
- h) Secado de la pulpa de coco.

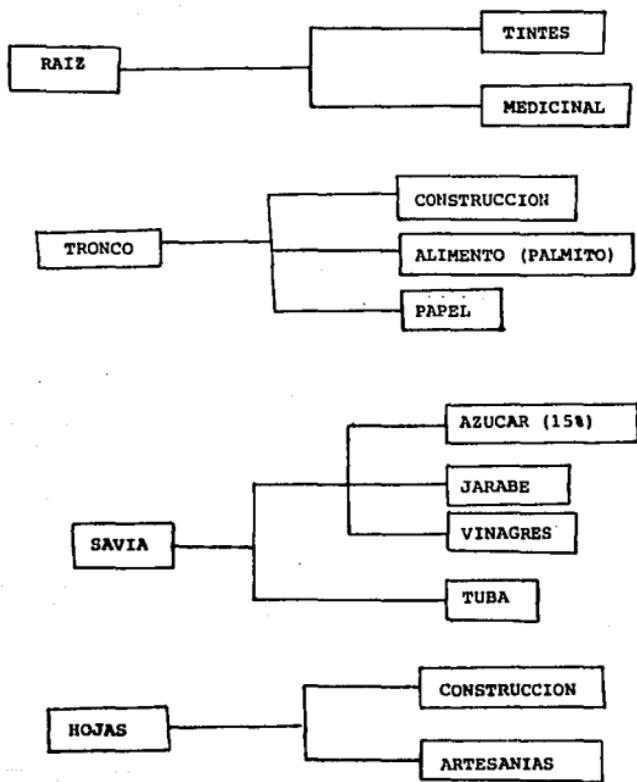


Fig. 1. DIVERSOS USOS DEL COCOTERO

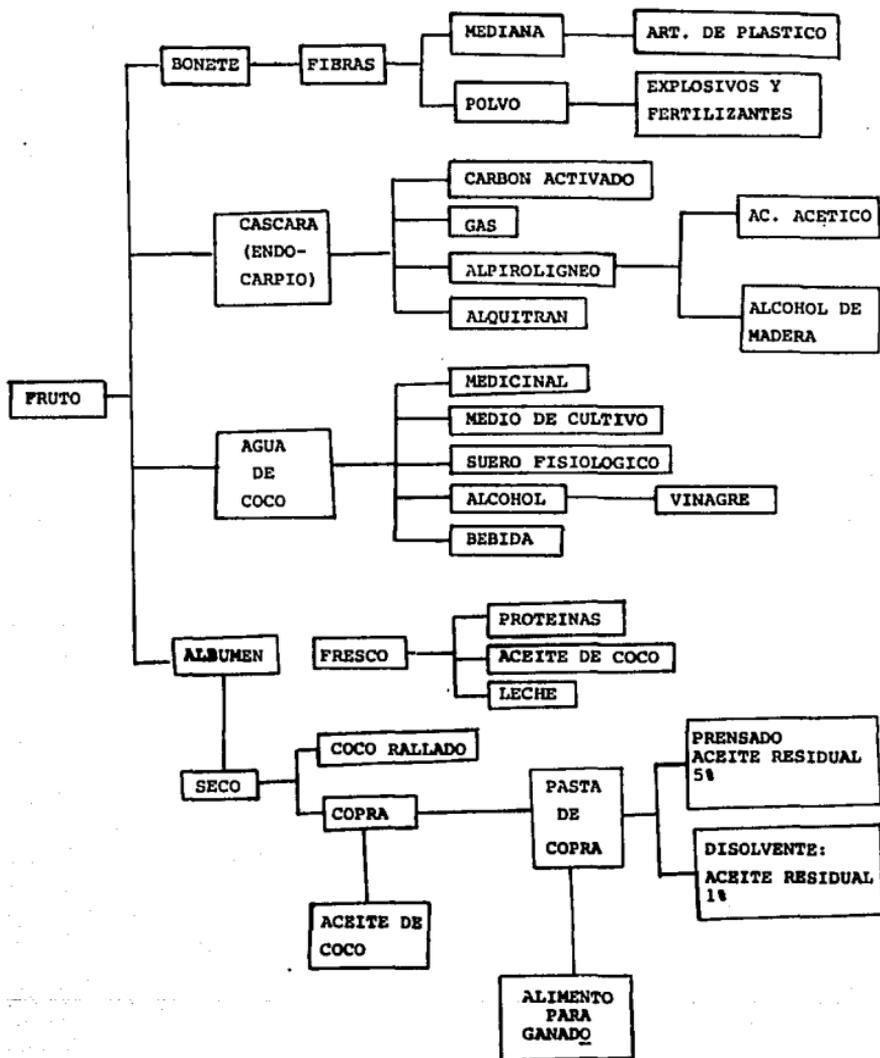


Fig. 2. USOS DEL FRUTO DEL COCOTERO

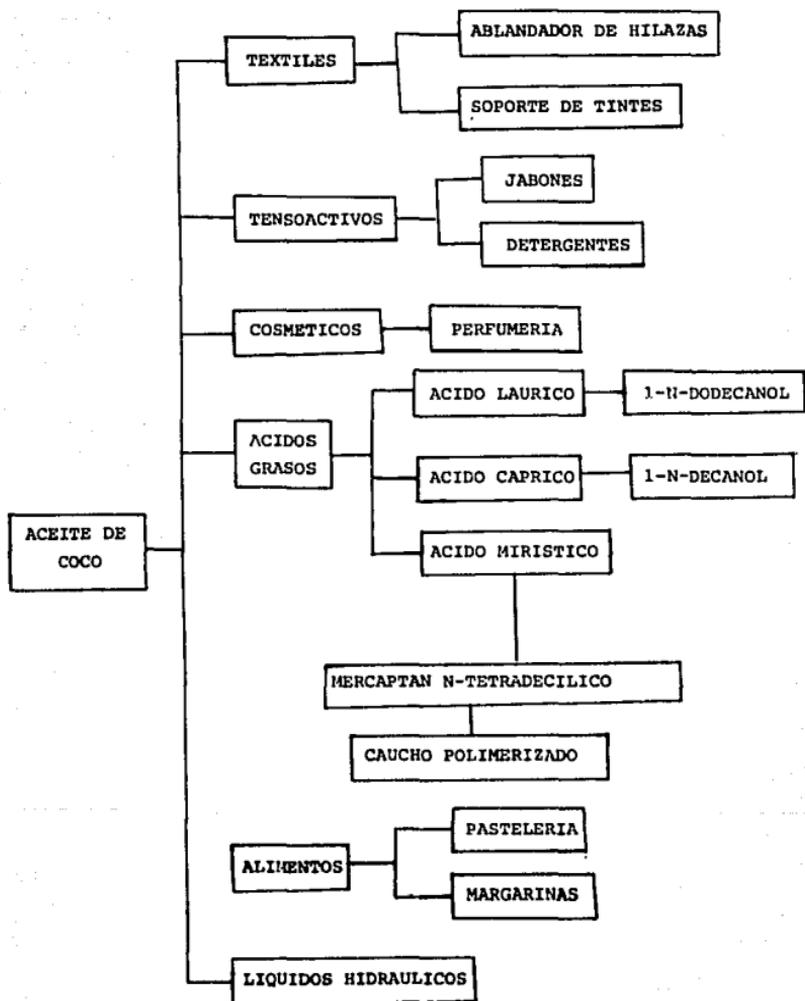


Fig. 3. USOS DEL ACEITE DE COCO

TABLA 1. COMPOSICION EN ACIDOS GRASOS DEL ACEITE DE COCO

ACIDO GRASO	%
Caproico	0.0 - 0.8
Caprilico	7.8 - 9.5
Caprico	4.5 - 9.7
Laurico	44.1 - 51.3
Miristico	13.1 - 18.5
Palmitico	7.5 - 10.5
Estearico	1.0 - 3.2
Oleico	5.0 - 8.2
Linoleico	1.0 - 2.6

2. GENERALIDADES.

2.1- ENZIMAS

2.1.1 INTRODUCCION

Las enzimas son proteínas que cuentan con un sitio activo que las hace funcionar como catalizadores biológicos. Tienen un alto grado de especificidad y son producidas por células vivas, ya que son las responsables de las reacciones biológicas del metabolismo.

Con la tecnología actual, las enzimas, pueden ser extraídas de su fuente de origen, ya sea vegetal, animal o microbiana y darles diferentes aplicaciones en los procesos de elaboración de alimentos.

A pesar de que desde la antigüedad, han estado relacionadas con la elaboración de ciertos alimentos como es el caso del vino, pan, yoghurt etc., es hasta principios del siglo XIX cuando se inicia el descubrimiento de los catalizadores biológicos, con los estudios realizados sobre la digestión de la carne por las secreciones del estómago y la conversión del almidón en azúcar por la saliva; en 1850 Pasteur concluye que la fermentación del azúcar para la obtención del alcohol es catalizada por fermentos que posteriormente fueron llamados enzimas y que estos solo eran producidos por organismos vivos.

En 1897 Büchner demostró que las enzimas tenían actividad después de ser extraídos de células vivas. Estos hechos impulsaron el estudio de las propiedades catalíticas de las enzimas, siendo en 1926 cuando James Summer aisló por primera vez una enzima en

forma cristalizada, la ureasa, encontrando además que se trataba de una proteína, de lo cual se indujo que todas las enzimas eran proteínas, corroborándose esta hipótesis después de que Nortron y sus colaboradores aislaron la pepsina y concluyeron que estas eran proteínas.

En la actualidad se conocen aproximadamente 2000 enzimas, de las cuales cerca de 50 tienen aplicación industrial, de estas la mayoría cataliza reacciones de hidrólisis y solo 6 representan el 90% del mercado de enzimas comerciales.

2.1.2 CARACTERISTICAS

La actividad catalítica de las enzimas depende de su estructura como proteínas, es decir, de su estructura primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria. Algunas enzimas están formadas solamente por polipéptidos mientras que otras necesitan para su actividad, un componente químico adicional llamado cofactor. Estas sustancias pueden ser inorgánicas como los iones Fe^{2+} , Mn^{2+} o Zn^{2+} u orgánicas como pirofosfato de tiamina, fosfato de piridoxal, biotina etc, es decir vitaminas. Cuando se trata de una molécula orgánica se le llama coenzima. Una enzima activa catalíticamente completa, con su coenzima o metal se llama holoenzima, mientras que la porción proteica de la enzima se llama apoenzima.

Las enzimas tienen la característica de catalizar reacciones específicas a diferencia de los catalizadores no biológicos. Esta especificidad puede ser:

- Especificidad estereoquímica. Se refiere a que las enzimas

utilizan D o L isómeros como sustrato.

- Especificidad baja. Las enzimas actúan sobre un determinado tipo de enlace químico sin importar la naturaleza del sustrato.
- Especificidad de grupo. Las enzimas actúan sobre un sustrato que contiene un determinado enlace y un grupo químico específico al lado de dicho enlace.
- Especificidad absoluta. La enzima utiliza solo una sustancia como sustrato.

La actividad de las enzimas depende de factores tales como:

- pH. Las enzimas tienen un pH característico en el cual su actividad catalítica es máxima y se ve disminuida con un incremento o decremento de este. La relación entre pH y la actividad de cualquier enzima depende del comportamiento ácido-base de la enzima y las posibles interacciones iónicas con el sustrato.
- Temperatura. La velocidad de las reacciones enzimáticas se ve afectada por la temperatura, dentro del intervalo en el cual la enzima es estable y totalmente activa. Conforme se incrementa la temperatura, la velocidad de las reacciones enzimáticas aumenta hasta el punto en que empieza a presentarse la desnaturalización, ya que las enzimas son desnaturalizadas a temperaturas elevadas, originando la pérdida de su capacidad catalítica.
- Actividad de agua. Las enzimas, por ser proteínas requieren de agua para desarrollar una conformación estable con propiedades

biológicamente activas y así actuar como catalizadores, sin embargo, algunas enzimas pueden activarse en presencia de una mínima cantidad de agua siempre que este en forma disponible por lo que la actividad de agua es más importante que el contenido de agua.

2.1.3 CLASIFICACION

En un principio las enzimas fueron nombradas con base a diferentes criterios. Por ejemplo, se añadía el sufijo "asa" al nombre de su sustrato como ureasa, lactasa, pectinasa etc. También se nombraron de acuerdo a la fuente de su procedencia, como la papaina. Igualmente se dieron nombres que no tenían relación con el sustrato o su procedencia como la tripsina, por lo que surgió la necesidad de crear una base sistemática para nombrar a las enzimas. Este sistema clasifica a todas las enzimas en 6 clases principales, de acuerdo a la reacción que catalizan, de la siguiente manera:

No.	CLASE	TIPO DE REACCION CATALIZADA
1	Oxidorreductasas	Transferencia de electrones.
2	Transferasas	Reacciones de transferencia de grupos.
3	Hidrolasas	Reacciones de hidrólisis.
4	Liasas	Reacciones de adición de grupos a los dobles enlaces o viceversa.
5	Isomerasas	Transferencia de grupos en el interior de las moléculas para dar formas isoméricas.
6	Ligasas	Formación de enlaces C-C, C-S, C-O, Y C-N mediante reacciones de condensación acopladas a la ruptura del ATP.

Cada una de estas clases tiene subclases y sub-subclases, por lo que a las enzimas se les asigna un número de clasificación de cuatro cifras y un nombre sistemático que identifique la reacción que cataliza. En el número de clasificación la primera cifra corresponde a la clase, la segunda a la subclase, la tercera a la sub-subclase y la cuarta al sustrato utilizado por la enzima.

Debido a que en el presente trabajo se utilizaron hidrolasas, específicamente pectinasas, proteasas y amilasas a continuación se describen las características de estas enzimas así como sus usos en el procesamiento de alimentos.

2.1.4 AMILASAS

Las amilasas son las enzimas responsables de la hidrólisis del almidón, encontrándose ampliamente distribuidos en la naturaleza; actúan sobre almidón, glucógeno y derivados polisacáridos hidrolizando los enlaces alfa-1,4 glucosídicos.

Las amilasas se dividen en tres grupos:

- 1) alfa-amilasas
- 2) beta-amilasas
- 3) glucoamilasas

2.1.4.a . alfa- amilasas

La alfa amilasa (alfa-1,4 glucon glucanohidrolasa, EC.3.2.1.1) es una enzima (endoamilasa) que hidroliza los enlaces alfa-1,4 glucosídicos del interior del sustrato y lo hace al azar, produciendo poder reductor. El modo de acción, propiedades y

producto de reacción difieren dependiendo de la fuente de obtención de la enzima. Existen alfa-amilasas tanto en plantas como en los tejidos de mamíferos y microorganismos.

Se han obtenido alfa-amilasas con un alto grado de purificación a partir de cebada malteada, de Aspergillus nryzae, de la saliva humana, del pancreas porcino y de Bacillus subtilis.

La acción de la alfa-amilasa de la fracción amilosa del almidón se lleva a cabo en dos pasos. Primero hay una degradación rápida y completa de amilosa formando maltosa y maltotriosa; en este paso la viscosidad disminuye al igual que la coloración al reaccionar con yodo. En el segundo paso se involucra una hidrólisis lenta de los oligosacáridos, con la formación de glucosa, maltotriosa, maltotetraosa, G5 y G6, este segundo paso no se lleva a cabo al azar como en el primero.

La alfa-amilólisis de la amilopectina origina glucosa, maltosa y una serie de dextrinas limitantes, oligosacáridos de cuatro o más residuos glucosídicos. Una hidrólisis adicional de los productos resultantes del primer paso de la hidrólisis procede lentamente, efectuando un rompimiento de ciertos enlaces en los puntos de ramificación de la molécula, mediante otra enzima.

Cada molécula de la alfa amilasa contiene un átomo de calcio el cual se encuentra unido a la molécula de enzima muy debilmente y puede ser removido a un pH bajo usando agentes quelantes. Si el calcio se remueve completamente, la enzima se vuelve esencialmente inactiva y pierde estabilidad por la desnaturalización por calor. El calcio no participa directamente

en la formación de complejo enzima- sustrato, pero mantiene la enzima en la configuración óptima para su máxima estabilidad y actividad. En la práctica siempre hay suficiente calcio para que la enzima sea completamente activa, de hecho, es suficiente con que exista trazas de calcio.

Las amilasas tienen curvas típicas cuando se grafica actividad contra pH. La máxima actividad de las amilasas se encuentra dentro de la región ácida desde pH 4.5 hasta 7, pero las formas de estas curvas y su localización del punto óptimo depende de la fuente de obtención de la enzima.

La actividad de las alfa-amilasas se puede determinar midiendo la degradación del sustrato usando una concentración que sea lo suficientemente alta para saturar la enzima de tal manera que la cinética sea de orden 0 con respecto al sustrato. La separación del sustrato se determina midiendo la pérdida de la capacidad de coloración del yodo o por medio de la medición de la pérdida de la viscosidad del sustrato.

2.1.3 b. Beta-amilasas.

La beta-amilasa (alfa-1,4 glucan maltohidrolasa EC. 3.2.1.2) hidroliza enlaces alfa-1,4 glucosídicos del almidón y glucógeno desde el extremo no reductor dando como producto maltosa, siendo por tanto una exoamilasa. La beta-amilasa causa una inversión de la configuración del C1 de la glucosa de alfa a beta por lo cual es llamada beta y no porque reconozca los enlaces beta-glucosídicos. Tampoco es capaz de romper los enlaces alfa-1,6-glucosídicos en la amilopectina, por lo que a partir de la amilopectina se produce solamente de 50 a 60 % de maltosa.

Este tipo de amilasas se encuentran en plantas superiores estando ausentes en los mamíferos.

El producto de esta enzima es maltosa cuando actúa en moléculas de cadena lineal con un número par de residuos glucosídicos.

La acción de la beta-amilasa en moléculas ramificadas es incompleta ya que no ataca a los enlaces alfa-1,6 glucosídicos. Los intervalos de pH más activos para esta enzima están entre 5 y 6, su estabilidad al calor depende de su fuente de obtención.

2.1.3.c. Glucoamilasas.

La glucoamilasa (alfa-1,4-glucon glucohidrolasa EC 3.2.1.3) es una exoenzima que remueve unidades de glucosa consecutivamente desde el extremo no reductor del almidón, siendo el producto final la glucosa, lo que la diferencia de la alfa y beta amilasa.

Se obtiene de algunas especies de hongos como Aspergillus y Rhizopus. Esta enzima tiene una baja especificidad ya que es

capaz de hidrolizar enlaces alfa-1,3; alfa-1,6 y alfa-1,4. Sin embargo no es capaz de llevar a cabo una degradación completa ya que contiene una actividad transglucosidasa.

Esta enzima presenta una actividad en un intervalo de pH entre 4 y 5, con un intervalo de temperatura óptimo entre 50 y 60°C.

2.1.4 PECTINASAS.

Las pectinasas son enzimas que degradan a las pectinas, polisacáridos formados por moléculas de ácido D-galacturónico unidos por enlaces glucosídicos alfa-D-(1,4) en donde algunos grupos carboxílicos están esterificados con grupos metilos (ácido pectínico); se obtienen de plantas superiores y microorganismos.

Las pectinasas se clasifican en tres grupos:

- 1) Pectinesterasa
- 2) Poligalacturonasa
- 3) Pectintranseleminasa.

2.1.4.a. Pectinesterasas

Las pectinesterasas (pectin pectil-hidrolasa, EC 3.1.1.11) hidrolizan los grupos metilos de los carboxilos del ácido D galacturónico con la producción de metanol, las cantidades producidas no llegan alcanzar niveles tóxicos. La actividad de esta enzima es determinada por medio de la relación de metanol producido o la precipitabilidad con calcio del ácido pectico formado (el grupo carboxílico del ácido D-galacturónico no se encuentra esterificado). La pectinesterasa no tiene una especificidad absoluta para el ester metil ya que puede realizar

una hidrólisis en enlaces éster etil en un 3 y 13 %.

2.1.4.b Poligalacturonasa

Las poligalacturonas (poli-alfa-1,4 galacturon glucano hidrolasa EC 2.3.1.15) hidrolizan los enlaces glucosídicos de las pectinas en presencia de agua. Estas se subdividen en base a la forma de ataque sobre el sustrato y de la naturaleza de este en: endo y exo polimetilgalacturonasas y en endo y exo poligalacturonasas.

Se pueden identificar unas de otras mediante la relación de su actividad con el sustrato. Por ejemplo, la endo polimetilgalacturonasa tiene una máxima actividad sobre el ácido pectínico y no sobre el ácido péctico; también se puede hacer midiendo el decremento en la viscosidad conforme se lleva a cabo la hidrólisis y por la identificación de los productos formados durante la reacción, empleando cromatografía en papel.

La presencia de NaCl juega un papel importante en la máxima actividad de las poligalacturonasas ya que parece evitar la inhibición de la enzima por producto; algunas de ellas requieren del ión calcio.

2.1.4.c. Pectintranseliminasa

La pectintranseliminasa (poli-alfa-1,4-D-galacturon liasa, EC 4.2.99.3) rompe el enlace glucosídico por una eliminación trans de hidrógeno de los carbonos 4 y 5 del ácido D-galacturónico con la consecuente formación de un doble enlace. La actividad de la enzima se puede medir por el incremento en la absorbancia a 235 nm causada por la formación del doble enlace.

Las pectintranseliminadas solo son producidas por microorganismos, su pH óptimo se encuentra entre 8.5 y 9.5 y requieren del ión calcio. Puede usar también iones de Sr^{2+} , Mn^{2+} y Mg^{2+} para incrementar su actividad pero siempre en presencia de Ca.

2.1.5. PROTEASAS

Las enzimas proteolíticas o proteasas hidrolizan los enlaces peptídicos de una manera ordenada debido a su especificidad para un determinado enlace peptídico.

Las proteasas pueden ser: endopeptidasas, las cuales hidrolizan enlaces peptídicos internos en las proteínas, exopeptidasas las que atacan a los aminoácidos terminales de las proteínas y estas a su vez se subdividen en aminopeptidasas y carboxipeptidasas. Las primeras actúan a partir del grupo amino terminal y las segundas sobre el carboxilo terminal de las proteínas.

Hartley en 1960, propuso un nuevo sistema de clasificar a las proteasas en base a la naturaleza química de su sitio activo. Las clasifica en cuatro grupos:

- 1) Serino proteasas
- 2) Sulfidril-proteasas
- 3) Metallo proteasas
- 4) Proteasas ácidas

2.1.5.a Serino proteasas.

Las serino proteasas tienen un residuo serilo específico en su sitio activo, siendo todas endopeptidasas. Ejemplo de ellas son

la tripsina, quimotripsina, elastasa y sustilisin.

2.1.5.b Sulfidril-proteasas.

Las sulfidril-proteasas dependen para su actividad de la presencia de un grupo sulfidrilo en su sitio activo y son inhibidas por agentes oxidantes y quelantes y por iones de metales pesados ya que estos se enlazan con el grupo tiol. Ejemplo de ellas son la papaina, bromelina y ficina.

2.1.5.c Metaloproteasas.

Las metaloproteasas o metaloenzimas dependen para su actividad de la presencia de un ión metálico que se encuentra en relación estequiométrica con la molécula de la proteína. Tales metales pueden ser Mg, Zn, Co, Fe, Hg, Cd, Cu, o Ni. Estas enzimas son inhibidas por cianuro y otros metales contaminantes. Las carboxipeptidasas y algunas aminopeptidasas pertenecen a este grupo.

2.1.5.d Proteasas Ácidas.

Las proteasas Ácidas poseen dos grupos carboxilos en el sitio activo y son inhibidas por bromuro de p-bromofenacilo o reactivos diazo. Su pH óptimo de actividad se sitúa del lado ácido. Ejemplo de ellas son pepsina y renina.

2.1.6 USO DE LAS ENZIMAS EN EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.

2.1.6.1 Usos de las pectinasas.

Los principales usos de las pectinasas en la industria son los siguientes:

- Producción de jugo de frutas y productos de jugos de frutas.
- Producción de vinos.
- En la fermentación de café y cacao.
- Rehidratación de alimentos deshidratados.
- Producción de ácido galacturónico y pectinas con bajo metoxilo
- Recuperación y estabilización de aceite de cítricos.
- Extracción de aceite de oliva.

Los jugos de frutas tienen sólidos suspendidos que casi siempre son pectinas o complejos de las mismas. En algunos casos como el de manzana se desea que el producto sea transparente y no viscoso. Para obtener estas características se añade una mezcla de pectinasas comerciales durante o después de la molienda, esto también incrementa el producto obtenido. En la extracción en jugos de tomate y de cítricos se requiere una viscosidad alta por lo que las pectinasas presentes son destruidas durante la pasteurización conservando así una viscosidad alta. Para la elaboración de jugos con bajo contenido de azúcar o jaleas para diabéticos las pectinas solo son hidrolizadas por las pectinesterasas.

En la elaboración del vino la adición de las pectinasas puede hacerse después de la molienda de uvas, incrementándose el volumen del jugo disponible para la fermentación, reduciendo el

tiempo de fermentación e incrementando la extracción de color de los hollejos cuando se trata de vino tinto. Durante la fermentación se obtiene un producto más claro antes de clarificarlo y por último puede añadirse después de la fermentación para obtener una buena clarificación. Las pectinasas no influyen negativamente en las características del bouquet de los vinos, sino por el contrario, ayudan al desarrollo de un sabor maduro en un menor tiempo.

La recuperación de aceites de cítricos especialmente del aceite esencial del limón se hace con pectinasas. El aceite es obtenido de la cascara del limón en una emulsión de aceite en agua y las sustancias pécticas que contiene favorece la estabilidad de la emulsión, por lo que al añadir pectinasas las pectinas son hidrolizadas liberando el aceite. En lugar de pectinasas se puede usar agentes químicos (polielectrolitos) para romper la emulsión.

En el mercado existe una gran variedad de nombres comerciales para las pectinasas, generalmente se trata de mezcla de enzimas pécticas, la mayoría extraídas de Aspergillus niger.

Las más comunes se muestran en la tabla 2.

TABLA 2. PECTINASAS INDUSTRIALES Y SUS APLICACIONES.

NOMBRE COMERCIAL	PRODUCTOR	APLICACIONES
Clearizyme	Societe Rapidase Francia.	Extracción y clarificación de jugos de frutas y mostos de uva.
Irgazyme M-10	Ciba-Geigy AG. Suiza.	Maceración de vegetales y frutas.
Klearzyme	GB Fermentation Ind. Inc. USA	Extracción y clarificación de jugos de fruta
MKC-Pectinasa	Miles Kali-Chemic Alemania Occ.	En jugos de frutas y tecnología de frutas.
Pectimex	Swiss Ferment Co. Suiza.	Para extracción y clarificación de jugos de frutas.
Pectolyase	Kikkoman Shoya Co. Japón.	Para extracción y clarificación de jugos de fruta.
Pektolase	Gridstøvaerker A/S Dinamarca.	Para extracción y clarificación de jugos de frutas y en la tecnología de frutas cítricas
Rohament p	Rohm GmbH Alemania Occ	Maceración de frutas y vegetales.
Ultrazyme 100	Ciba-Geigy AG. Suiza.	Para la extracción y clarificación de jugos de frutas y mostos de uva.
Ultrazyme SE 604	Ciba-Geigy AG. Suiza.	Extracción de aceite de oliva.

Fuente de información Forgy, W.N. and Guard, G.A. (1974)
In Progress in Industrial Microbiology. Vol. 13, p. 106.

2.1.6.2 Usos de las amilasas.

La principal aplicación de las amilasas es en la elaboración de jarabes de glucosa a partir de almidón, en donde la conversión del almidón a glucosa se mide por el poder reductor del jarabe expresandose como equivalentes de dextrosa (DE). En la industria cervecera se utilizan amilasas para hidrolizar el almidón proveniente de cebada, malz, sorgo, etc.; en la tecnología de cereales para la conversión de almidón a dextrinas y azúcares, en la modificación de almidón y en la industria de panificación. En esta última son utilizadas cuando el harina no tienen una cantidad suficiente de azúcares fermentables (valor maltosa), para obtener una fermentación adecuada y por ende un aumento en el volumen del pan. Además promueven la obtención de mejor textura al inducirse la hidrólisis parcial del almidón y se inducen más fácilmente las reacciones de Maillard.

2.1.6.3 Usos de las proteasas.

Las aplicaciones más comunes son las enzimas proteolíticas es en el ablandamiento de carnes, pero también se utilizan en la decoloración de la sangre para el aprovechamiento de la hemoglobina en rastros, en el diseño de proteínas con propiedades funcionales definidas, en la deodorización de la harina de pescado, en la elaboración de gelatina y en el aprovechamiento de residuos de granjas tales como plumas, uñas y víceras. No debe olvidarse que la proteasa más usada en la industria es la renina en la producción de quesos.

Actualmente se están probando mezclas enzimáticas para mejorar los procesos de extracción como es el caso de la extracción de aceite de aguacate y coco por el método enzimático.

2.2. PROCESO DE EXTRACCION DE ACEITE DE COCO

El coco es la parte más importante del cocotero por la serie de productos que se pueden extraer de él y por la importancia de la copra y del aceite de coco, a nivel de mercado mundial.

La tecnología para el aprovechamiento del coco requiere de dos tipos de coco: uno maduro que suele caer al suelo y otro inmaduro que debe ser cortado de la palma.

Los cocos destinados a la obtención del aceite de coco deben estar maduros, pues el contenido de aceite en los cocos maduros es el óptimo.

Los procesos de extracción de aceite de coco se clasifican en:

- 1) Extracción de aceite de coco en seco
- 2) Extracción de aceite de coco en húmedo

2.2.1. Extracción de aceite de coco en seco.

Una vez recogido el fruto se separan sus diferentes partes y se obtiene el alburmen o pulpa de coco que se seca, con el objeto de disminuir la humedad de 50 a 55% hasta un 7% o menos.

La pulpa de coco o alburmen seco recibe el nombre de copra.

Después del secado la copra se pasa a una trituradora de dientes para obtener trozos aproximadamente de 2 a 3 cm de largo. Antes de colocarse en la prensadora, pasa por calentadores que tienen una temperatura aproximada de 110°C para disminuir la humedad hasta el 1%. Posteriormente se pasa a una prensadora mecánica de tornillo o expeller. La pasta resultante se obtiene con un contenido de aceite del 12 al 18%, el cual es extraído posteriormente, por medio, de otro prensado o con solventes para obtener una pasta con el 1% de aceite aproximadamente. Por último se efectúa una filtración para separar el aceite de impurezas y residuos de pasta obteniéndose el aceite.

La presión mecánica continua, con ayuda de prensas de tornillo tienen modelos de diferentes patentes, algunas perfeccionadas que permiten procesar volúmenes grandes, entre 25 y 40 toneladas de copra en 24 horas en operación continua, (Woodroof J., 1979).

2.2.2. Extracción de aceite de coco en húmedo.

Los principios en los que se basan la mayoría de los procesos húmedos son el de producir una emulsión a partir del albúmen o pulpa de coco y después romperla para la separación del aceite.

La producción de la emulsión es sencilla, ya que todos los procesos se basan en el hecho de que el coco contiene un sistema que favorece su emulsificación. Este sistema es: el agua, el aceite y la proteína como agente surfactante. El rompimiento de la emulsión para obtener el aceite y la proteína puede realizarse por dos métodos: el primero consiste en hervir la emulsión, separando de esta forma el aceite. La desventaja que presenta

este método es que la calidad del aceite y proteína resulta dañada. El segundo método, consiste en el uso de la centrifugación para recuperar el aceite y la proteína, obteniéndose productos de mejor calidad.

Las diferencias esenciales que presentan los métodos son el pretratamiento de la emulsión. Los pretratamientos que se han empleado son: la coagulación, acción enzimática o acidificación, así como el uso de sales o salmueras, acción de electrólitos y ondas de choque.

La extracción enzimática del aceite de coco se hace a partir del albumen. El albumen o pulpa de coco se muele (en moulinex), hasta obtener el menor tamaño posible de partícula, se adiciona el agua necesaria para obtener una relación de 1:4 (coco-agua) y la mezcla de enzimas en una concentración del 0.1% P/V de pectinasa, proteasa, y alfa-amilasa. La reacción enzimática se lleva a cabo a 40 °C durante 60 minutos con agitación constante. Terminado el tiempo de reacción se deja sedimentar el coco y solidificar la crema formada en la parte superior, posteriormente se funde para ser centrifugada a 10,000 rpm durante 15 minutos, obteniéndose así el aceite de coco de buena calidad.

2.3. SECADO

El secado ha sido utilizado desde la antigüedad como un método de conservación de alimentos; en sus inicios la forma más sencilla fue el secado al sol. En la actualidad este método se sigue

utilizando, por ejemplo en el secado de pasas, ciruelas, chabacanos, dátiles, copra, granos antes de ser cosechados etc. A pesar de ser el método más económico tiene las siguientes desventajas:

- Depende de las condiciones climatológicas.
- Es lento y no apropiado para muchos productos de alta calidad.
- Generalmente no reduce el contenido de humedad a menos del 13%, lo cual en un gran número de productos es insuficiente para permitir la estabilidad en el almacenamiento.
- Requiere de un espacio grande.
- Los alimentos expuestos al sol son susceptibles a la contaminación y a pérdidas debidas a los insectos, roedores, microorganismos y a daños por radiación ultravioleta.

Por tales motivos surgió la necesidad de desarrollar nuevos métodos de sacado bajo condiciones controladas, principalmente para alimentos.

Se entiende como secado o deshidratación de un alimento a la eliminación casi por completo del agua que contiene, bajo condiciones controladas las cuales producirán sólo un mínimo de cambios o ninguno en las propiedades del alimento. La humedad final de los alimentos deshidratados generalmente es del 1 al 5%, según se desee..

2.3.1. Características del secado.

Cualquiera que sea el método de secado empleado, la deshidratación de un alimento consta de dos etapas:

- 1) Introducción de calor al producto y
- 2) Extracción de humedad del producto.

En un proceso de deshidratación se quiere obtener la velocidad máxima en el secado, de manera que se hacen todos los esfuerzos posibles a fin de acelerar las velocidades de transmisión de calor y de masa. A este respecto, es importante controlar factores físicos tales como :

- Temperatura. Entre mayor sea la temperatura del medio de calentamiento y el alimento, mayor será la velocidad de transmisión de calor al alimento, lo cual proporciona la fuerza impulsora para la eliminación de humedad, pero obviamente, mayor será también el daño al alimento.
- Área de contacto. Entre mayor sea el área de contacto, del alimento a secar, con el medio de calentamiento y más superficie desde la cual se pueda escapar la humedad, mayor será la velocidad de secado. Esto se logra dividiendo en piezas pequeñas o capas delgadas la muestra a secar. Además de reducir la distancia que el calor tiene que recorrer hasta el centro del alimento se reduce también la distancia que la humedad en el centro del alimento tiene que recorrer a fin de llegar a la superficie y escaparse. En casi todos los secadores se aumenta al máximo la superficie del alimento que se esta secando.

- Velocidad del aire. El aire en movimiento absorbe más humedad que el aire estático e impide la formación de una atmósfera saturada, la cual disminuiría la velocidad de la eliminación subsecuente de humedad.

- Humedad del aire. Cuando el aire es el medio de secado, entre más seco este, mayor es la velocidad de secado, ya que puede absorber y retener la humedad. Por esta razón el aire para secado en zonas húmedas requiere de un pretratamiento (deshumidificado) para poder ser usado en el proceso.

La humedad del aire también determina hasta que punto se puede bajar el contenido de humedad del alimento a secar, debido a que cada alimento tiene su propia humedad relativa de equilibrio, es decir, la que tiene a una temperatura determinada en la que no toma ni cede humedad a la atmósfera. Abajo de la humedad relativa, el alimento, puede secarse más todavía y por arriba no puede secarse más, por el contrario, absorbe humedad de la atmósfera.

Estos parámetros son fáciles de controlar, lo que permite resolver en forma óptima, el diseño de secadores.

2.3.2. Curva de secado.

Cuando se secan los alimentos se observan diferentes etapas en el comportamiento de la velocidad de secado. El alimento no pierde el agua a una velocidad constante. Por el contrario, conforme avanza el proceso de secado, la velocidad con que se elimina el agua va disminuyendo.

Al empezar el proceso de secado, el agua se evapora del alimento a una velocidad constante, como si estuviera secándose una superficie libre, después hay una disminución en la velocidad de secado. A estos periodos se les llama periodo de velocidad de secado constante y periodo de velocidad de secado decreciente, respectivamente.

La unión de estos forma la curva de secado, la cual es característica para cada alimento.

La formación de estos dos periodos se debe a que en el inicio del secado el alimento pierde humedad de su superficie y va adquiriendo paulatinamente una espesa capa seca, con la mayor parte de la humedad restante en el centro. Esto establece un desnivel de humedad desde el centro hasta la superficie, formándose en la capa exterior una barrera aislante contra la transmisión rápida de calor hacia el centro del alimento, dado que el agua que se evapora deja huecos de aire. Además de que la transmisión de calor tiene menos fuerza impulsora, el agua que queda en el centro tiene que recorrer, para salir del alimento, una distancia mayor que la que recorrió la humedad de la superficie al principio del proceso de secado. Esta situación repercute en una caída paulatina de la velocidad de secado.

2.3.3. Cambios en el alimento durante el secado.

Es importante considerar los cambios químicos que pueden sufrir los alimentos, durante el secado, como: cambio de color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento. Algunos de estos cambios lo

sufren la mayoría de los alimentos secados, pero el grado en que ocurre depende de la composición del alimento y del método de secado.

2.3.4. Métodos y equipo de secado.

El método de secado usado depende del tipo de alimento a secar, de la calidad que se desea obtener y del costo que se pueda justificar.

Los métodos de secado se clasifican de acuerdo con las condiciones físicas usadas para proporcionar calor y extraer el vapor de agua en:

- 1) Secado por convección del aire. El calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
- 2) Secado al vacío. La evaporación del agua se lleva a cabo con más rapidez a presiones bajas y el calor se proporciona indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación.
- 3) Secado por liofilización. El agua se sublima directamente del alimento congelado.

En la actualidad existe una gran variedad de secadores, para satisfacer una diversidad de necesidades. Los más comunes son:

- Secador de bandejas, anaqueles o de charolas. El alimento o muestra a secar se coloca uniformemente sobre una bandeja de metal con una profundidad de 10 a 100 mm., las cuales cargan

y descargan de un gabinete.

Un ventilador recircula aire calentado con vapor sobre la superficie de las bandejas, también se obtiene calor con electricidad, cuando se requiere de una baja temperatura. Aproximadamente del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es aire nuevo y el resto es recirculado.

Después del secado se abre el gabinete y las bandejas se remplazan con otras ya llenas. Una de las modificaciones en este tipo de secadores es el de bandejas con carretillas.

- Secadores de vacío con anaqueles. Consiste en un gabinete de hierro colado con puertas herméticas, para que pueda operar con vacío, se calienta indirectamente. Los anaqueles huecos de acero se montan dentro de la cámara y se conectan en paralelo con los colectores de vapor de entrada y salida. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles; si se requiere de temperaturas más bajas, se usa una circulación de agua caliente en lugar de vapor, para suministrar el calor que vaporiza la humedad, colectando los vapores en un condensador.
- Secadores continuos de túnel. El alimento o muestra a secar se coloca sobre bandejas o en carretillas que se mueven continuamente por un túnel con gases calientes pasando sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, cocorriente o una combinación de ambos.
- Secadores rotativos. Consiste en un cilindro hueco que gira sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida, la

muestra se alimenta por la parte superior y se mueve por el cilindro a medida que éste gira.

El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes con flujo a contracorriente, también puede ser por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro.

- Secadores de tambor. Consisten de un tambor de metal calentado, en cuyo exterior se evapora la capa delgada de un líquido o una suspensión hasta lograr secarla. El sólido seco final se raspa del tambor, que gira lentamente. Este tipo de secadores son usados para suspensiones o pastas de sólidos finos. El tambor funciona en parte como evaporador y en parte como secador, ya que se usa también para soluciones verdaderas.

- Secadores por espumas. Con un secador de este tipo un líquido o una suspensión se pulveriza o se rocía con una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas, el agua se vaporiza con rapidez, obteniéndose partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de gas y de líquido de la cámara de pulverización puede ser a contracorriente, a cocorriente o una combinación de los dos. Las gotas finas se forman al introducir el líquido en toberas de pulverización o discos giratorios de rociado de alta velocidad, en el interior de una cámara cilíndrica, se debe asegurar de que las gotas no choquen ni se adhieran a las superficies sólidas antes de que se hayan secado, por lo que se recomienda usar cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo y los gases de escape fluyen hacia un separador de

ciclón para filtrar las partículas muy finas, ya que las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas.

2.4. SEDIMENTACION

La sedimentación es un método de separación sólido-líquido en el cual las partículas sólidas se separan del líquido, en el que se encuentran suspendidas, por acción de la fuerza de gravedad.

La sedimentación tiene aplicaciones en:

- La eliminación de sólidos de aguas negras.
- En la separación de los cristales del licor madre.
- En la separación de partículas alimenticias sólidas de un líquido.
- En la sedimentación de una suspensión en el proceso de lixiviación de soya.

El objetivo de la sedimentación en algunos procesos es el de eliminar las partículas del fluido para que este quede libre de contaminantes, o bien de recuperar las partículas como productos y en otros el de separar las partículas en fluidos de acuerdo a su tamaño o densidad.

Coe y Clevenger en 1916 propusieron una clasificación de los tipos de sedimentación que pueden ocurrir, lo cual fue complementado por Camp en 1946 y Fitch en 1956. Esta clasificación divide a la sedimentación en cuatro tipos generales, la cual se basa en la concentración de las partículas

y de su capacidad para reaccionar entre sí.

La sedimentación se clasifica en:

- 1) Sedimentación libre. Se presenta cuando una partícula está a una distancia suficiente de las paredes del recipiente y de otras partículas de tal forma que no afecten a su caída. La interferencia es inferior al 1% cuando la relación del diámetro de la partícula al diámetro del recipiente no sobrepasa de 1:200, o cuando la concentración de las partículas en la solución no llega a 0.2% en volumen.
- 2) Sedimentación de partículas floculantes. En este tipo de sedimentación las partículas floculan durante la sedimentación incrementándose su tamaño y aumentando la velocidad de sedimentación.
- 3) Sedimentación frenada. Las partículas están más juntas, es decir, hay una mayor concentración de partículas, las que se encuentran en medio impiden la sedimentación libre de las partículas que se encuentran junto a ellas.
El resto de las partículas tienen una posición constante. En este tipo de sedimentación no hay una buena clarificación del líquido.
- 4) Sedimentación por compresión. Se tiene una alta concentración de partículas en el líquido y la sedimentación solo puede ocurrir por compresión.

2.4.1. Equipos de sedimentación.

Actualmente los sedimentadores pueden ser tanques rectangulares, cuadrados o circulares, dependiendo de las necesidades que se tengan y del costo. Los más comunes son los siguientes:

- Sedimentadores intermitentes. El tanque para sedimentación intermitente es de cualquier forma o tamaño conveniente, sin embargo los tanques rectangulares son más comunes que los cilíndricos. En su fondo se coloca una válvula de descarga para sacar los sólidos sedimentados y el líquido clarificado se saca por medio de un sifón basculante o por medio de conexiones para decantación, colocados a lo largo de un costado del tanque.

- Sedimentadores continuos no mecánicos. Se usa un tanque de forma cónica, el cual puede funcionar continuamente debido a que esta equipado con medios para que el líquido clarificado rebose continuamente y la descarga del sólido salga también de igual manera.

El tanque cuenta con un ángulo en vértice de 45 a 60 grados, montado con el eje vertical y su vértice hacia abajo, que lleva en su fondo una válvula normal o automática por la descarga, en la parte central un conducto de carga y en la periferia de la parte superior una artesa de rebosamiento.

- Sedimentadores mecánicos continuos. El más común es el Dorr, cuenta con varios modelos, pero básicamente es un tanque cilíndrico de sedimentación, poco profundo, con un tubo o pozo central de alimentación, llamado también fuente de carga, una artesa periférica para rebosa, una salida en el fondo para la

descarga de los sólidos regulada por una bomba y un eje situado en el centro que gira lentamente provisto de brazos radiales y de paleta para remover los sólidos y empujarlos hacia la salida central. Son características distintivas el empleo de tanques cilíndricos poco profundos de medios mecánicos para recoger los sólidos pesados y la regulación volumétrica de la densidad de la descarga por medio de una bomba de diafragma con desplazamiento variable.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 MATERIA PRIMA

La mayor parte de coco utilizado, fué adquirido en Intes pequeños de acuerdo a los experimentos realizados. Tratando siempre de que tuvieran el mismo grado de madurez, generalmente se trabajó con cocos maduros, comprados en la misma tienda de autoservicio de Aurrera, donde los tenían almacenados en condiciones de refrigeración, provenientes de la zona del Golfo de México. Solo un lote de cocos provenia del Estado de Colima.

Las enzimas utilizadas son comerciales: CLAREX (pectinasa), HT-PROTEOLITIC (proteasa), y TENASE (alfa-amilasa), proporcionadas por ENMEX S.A. de C.V. Se probaron igualmente otros productos cuyo origen se cita posteriormente.

3.2 ANALISIS PROXIMAL

Se realizó un análisis proximal a los cocos adquiridos en los dos diferentes lugares. Después de obtener la carnaza, se molió en una moulinex y se homogeneizó perfectamente.

Los análisis hechos fueron: Humedad, Cenizas, Grasa Cruda (método de Soxhlet), Proteína Cruda (método de Kjeldahl), Fibra Cruda y Carbohidratos asimilables, siguiendo las técnicas del AOAC, 1980.

3.3 REACCION ENZIMATICA

Con base a las condiciones reportadas por CINTRA (1984), se hicieron reacciones a diferentes condiciones de temperatura,

tiempo de reacción, enzimas de diversos orígenes y a diversas concentraciones.

3.4 SEPARACION DE FASES

Durante la separación de fases de la mezcla de reacción, se observó que parte de la crema, era atrapada por el coco durante su sedimentación. Se hicieron pruebas para recuperar esta crema y aumentar el rendimiento obtenido.

Una vez formada la fase cremosa, esta es separada y la mezcla se agita nuevamente, para que la crema que quedó atrapada pueda ser liberada. También se realizaron pruebas para determinar el efecto del tipo de agitación, por medio mecánico o con aire comprimido. Para recuperar la fase cremosa, formada después de la reacción, se determinó la velocidad ascensional de la crema para fijar el tiempo necesario de sedimentación.

La velocidad se determinó en recipientes de diferentes alturas y diámetros. Se usaron probetas de 1000 y 2000 ml; un vaso de precipitado de 4000 ml; una columna de vidrio de 100 cm de altura y 2 cm de diámetro; una columna de acrílico de 1.5 m de altura y 10 cm de diámetro y un sedimentador de geometría rectangular de 30 cm de largo, 23 cm de ancho y 18 cm de alto.

Una vez formada la fase cremosa, se buscó la mejor forma de recuperarla, haciendo las siguientes pruebas:

3.4.1. Bombeo

Utilizando una bomba peristáltica, se retiró la fase cremosa por la parte superior.

3.4.2 Centrifugación directa del agua

Después de la sedimentación de la carnaza, se recupera el agua y la crema conjuntamente y se centrifugan directamente.

3.4.3. Vertido

Después de la reacción, se pasa la mezcla a un sedimentador de forma rectangular perfectamente nivelado, introduciendo agua para provocar un vertido por los cuatro lados, empleando una bomba peristáltica.

3.5. RECUPERACION DE ENZIMAS

Con el objeto de reducir el costo de proceso, se hicieron pruebas para recuperar el agua y las enzimas, para su reutilización.

Después de separar la fase cremosa y la carnaza, se mide la cantidad de agua recuperada, llevando el volumen necesario a su valor inicial con agua fresca. Se efectúa entonces otra reacción enzimática con un nuevo lote de coco, adicionando las enzimas requeridas para conservar la concentración inicial constante. Este paso se repite para tres extracciones.

3.6. DESHIDRATACION DE LA PULPA DE COCO RESIDUAL

3.6.1. Preparación de la muestra

Terminada la reacción enzimática, la mezcla de reacción es vertida en un tanque de decantación, en donde por derramamiento es extraída la fase oleosa. Posteriormente, la mezcla enzimática es separada de los sólidos, haciéndolos pasar a través de un colador para ser prensados manualmente y recuperar la mayor cantidad posible de enzimas y grasa superficial impregnada.

3.6.2. Equipo

Se empleó un secador de charolas, marca APEX, modelo SSE70, con controles de temperatura dentro de la cámara y de velocidad del aire de entrada, así como balanza integrada para registrar la pérdida de humedad con respecto al tiempo durante la operación. Se utilizaron charolas de 195 mm X 195 mm y 10 mm de profundidad, con fondo de malla 18 de la serie Taylor, de manera que se obtuvo una mayor área superficial de transferencia de masa y de calor.

3.6.3. Condiciones de operación

Una vez que el secador alcanza las condiciones de temperatura y velocidad del aire de proceso preestablecidas, se introduce la pulpa de coco residual distribuida previamente en las charolas. Las muestras son retiradas cuando llegan a peso constante, es decir cuando tienen un contenido de humedad correspondiente al equilibrio.

Las variables manejadas son: la temperatura: 60, 75 y 90°C y el espesor de lecho: 5 y 10 mm. La velocidad del aire se mantiene

constante (4.5 m/seg), así como la humedad inicial del producto (75 + 3 %). Las pruebas se efectuaron por duplicado, haciendo un total de 12 corridas experimentales.

El flujo de aire se mide a la salida por medio de un anemómetro de filamento.

3.6.4. Tratamiento de los datos experimentales

3.6.4.1. Obtención de la curva de secado

Para cada punto experimental, se determina el contenido de humedad libre utilizando la siguiente expresión:

$$X = \frac{W - W_s}{W_s}$$

donde:

X = Humedad libre (Kg totales de H₂O/Kg sólido seco)

W = Peso del sólido húmedo (Kg tot. de H₂O + sólido seco)

W_s = Peso del sólido seco (Kg)

Con los datos obtenidos, se establece la relación entre el contenido de humedad libre (X) y el tiempo (t) en horas, para obtener así la curva de secado. Dicha curva se ajusta mediante una regresión polinomial de orden 2.

3.6.4.2. Obtención de la curva de velocidad de secado

Para obtener la curva de velocidad de secado, se miden las pendientes de las tangentes de la curva de secado, la cual proporciona valores de dX/dt a lo largo del tiempo de secado. Se calcula entonces la velocidad (R) para cada punto experimental

con la ecuación:

$$R = - \frac{L_s}{A} \int \frac{dX}{dt}$$

donde:

R = Velocidad de secado (Kg H₂O/m² h)

A = Area superficial expuesta al secado (m²)

L_s = Peso del sólido seco utilizado (Kg)

Con los datos obtenidos, se grafica la velocidad de secado (R) en función del contenido de humedad libre promedio (X), a fin de obtener la curva de velocidad de secado. Esta curva se ajusta mediante una regresión polinomial de orden 4.

3.6.5. Métodos de calculo para determinar el tiempo de secado

Para determinar el tiempo necesario para deshidratar un material hasta una humedad final deseada, se utilizan 2 métodos:

- a) Método que emplea una curva de secado.
- b) Método que emplea una integración gráfica.

Para aplicar estos métodos, es importante conocer si la deshidratación se efectúa durante el periodo de velocidad constante o dentro del periodo de velocidad decreciente, así como conocer el contenido crítico de humedad libre (X_c) y la velocidad (R).

El periodo de velocidad constante, ocurre cuando la superficie del material a secar esta muy mojada, existiendo sobre ella una película de agua continua y sin combinar, que actua como si el

sólido no estuviera presente, es decir, como si se estuviera secando una superficie libre. Esta condición se mantiene durante algún tiempo después del cual, hay una inflexión en la curva, que corresponde al contenido crítico de humedad (X_c) y que conduce inmediatamente al periodo de velocidad decreciente. En este periodo, en la superficie del sólido no hay suficiente agua para mantener una película continua y la porción mojada, comienza a disminuir hasta que la superficie queda seca en su totalidad.

En ocasiones se presenta un segundo punto de inflexión, el cual conduce a un segundo periodo de velocidad decreciente, en donde el plano de vaporización comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie.

Para determinar el tiempo de secado, se necesita conocer: el contenido crítico de humedad (X_c) y la velocidad de secado (R). Estos se calculan a partir de las curvas de secado y de velocidad de secado de la siguiente manera:

De la curva de secado se toman los puntos (del polinomio de orden 2), que más se ajustan a una recta. El primer punto que sale de esa condición, se toma como X_c y con este valor se obtiene de la curva de velocidad de secado, el valor de R_c .

A partir de la curva de velocidad de secado, para el periodo de velocidad constante, se toman en cuenta los puntos experimentales que más se ajustan a una recta. Se procede igualmente para el periodo de velocidad decreciente. El punto de intersección de estos periodos (punto crítico), tiene las coordenadas X_c y R_c .

Se tomó como valores de X_c y R_c el promedio de los resultados

obtenidos por ambas gráficas.

3.6.5.1. Método que emplea una curva de secado

Si el secado se verifica dentro del periodo de velocidad constante, el tiempo de secado puede determinarse directamente con la curva de secado por diferencia de tiempos. Otra forma de hacerlo es utilizando la curva de velocidad de secado, para el periodo de velocidad constante, siempre y cuando el contenido inicial (X_1) y final (X_2) de humedad libre, sea mayor que el contenido de humedad crítica (X_C). De esta forma la velocidad es constante (R_C) y el tiempo resulta ser igual a:

$$t = \frac{L_s}{A R_C} (X_1 - X_2) \quad (1)$$

3.6.5.2. Método que emplea una integración gráfica

Si el secado se verifica dentro de los periodos de velocidad constante y decreciente, se calcula el tiempo de secado para el primer periodo mediante la ecuación 1. Para el periodo de velocidad decreciente, la velocidad de secado (R), no es constante, ya que disminuye con el tiempo (t).

Para determinar el tiempo de secado, en la zona de velocidad decreciente entre diferentes contenidos de humedad libre, se utiliza la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R}$$

Esta ecuación puede integrarse gráficamente para cualquier forma de la curva de secado de velocidad decreciente, trazando $1/R$ en función de X y determinar el área bajo la curva, o bien resolverse numéricamente.

El tiempo total, se obtiene sumando los tiempos de secado para cada periodo.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 ANALISIS PROXIMAL

Se realizó un análisis proximal a los cocos utilizados en este trabajo. Los resultados promedio, se presentan en la tabla 3.

TABLA 3. ANALISIS PROXIMAL DE COCO PROVENIENTE DE DOS DIFERENTES REGIONES

	COCO DEL GOLFO DE MEXICO		COCO EDO. DE COLIMA	
	B. HUMEDA	B. SECA	B. HUMEDA	B. SECA
HUMEDAD	45.8 %		52.8 %	
GRASA	27.6 %	50.9 %	30.5 %	64.6 %
FIBRA	18.2 %	33.6 %	10.4 %	22.1 %
PROTEINA	4.8 %	8.8 %	3.5 %	7.5 %
CENIZAS	0.8 %	1.5 %	0.8 %	1.7 %
C6H12O6	2.8 %	5.2 %	2.0 %	4.1 %

Se observa en los resultados obtenidos que existe una diferencia significativa en los cocos de las dos diferentes regiones, en la proporción en que se encuentran cada uno de sus componentes.

Debido a que la grasa, es el componente de interés en este proceso, sería más conveniente trabajar con cocos provenientes del Estado de Colima, ya que el contenido de grasa es mayor. Esto no fue posible porque no era factible traer los cocos de Colima, por esta razón la mayor parte del trabajo se realizó con cocos provenientes del Golfo de México.

Analizando las causas de los bajos valores de rendimiento obtenidos en el proceso enzimático (80%), contra los procesos mecánicos, se observó que durante la centrifugación, se formaba una emulsión de aceite en agua entre la fase acuosa y aceitosa. Esta emulsión se pudo correlacionar con la madurez del coco, es decir, a mayor madurez de coco menor cantidad de emulsión formada y viceversa. Esta emulsión reduce significativamente el rendimiento obtenido. Si la emulsión era centrifugada por segunda vez, se obtenía un incremento en el rendimiento del 5.4%.

Se determinó el contenido de grasa y humedad a esta emulsión, encontrándose que contiene aproximadamente un 43.3% de agua y un 40.2% de grasa, sin que se haya intentado encontrar la naturaleza del 20% restante.

También se encontró que entre el coco maduro y el coco tierno existe una diferencia significativa en el contenido de grasa, lo que afecta el rendimiento obtenido. Los cocos tiernos tienen del 20% al 25% de grasa y los cocos maduros del 27% al 32%. Esto es independiente del origen del coco.

Se hicieron pruebas, en condiciones idénticas de extracción, con cocos tiernos y maduros encontrándose una diferencia notable en ambos. El rendimiento en el coco maduro fue del 80%, mientras que en el coco tierno es del 62%. Esta situación es, sin duda, debida a los cambios estructurales que se dan durante la maduración, que facilitan la reacción enzimática. Es por lo tanto una importante conclusión el que deba usarse un control de madurez de la materia prima.

4.2 REACCION ENZIMATICA

Para la optimización del proceso se manejaron las siguientes variables: Tiempo de reacción, temperatura, concentración de enzimas y diferentes enzimas comerciales.

En la tabla 4 se presenta la evolución de la reacción en las condiciones definidas por Cintra (1984). Puede observarse que una hora de reacción es apenas suficiente para la liberación del 54% de grasa.

TABLA 4. EFECTO DEL TIEMPO DE REACCION EN EL RENDIMIENTO DE EXTRACCION DE ACEITE DECOCO.

TIEMPO (min.)	% DE RENDIMIENTO	% DE RENDIMIENTO RELATIVO
30	37.3	68.6
45	50.3	92.5
60	54.2	100.0

Temperatura 40°C, agitación 700 rpm, concentración de enzimas 0.1% P/V de proteasa, pectinasa y alfa-amilasa.

En la tabla 5 se presenta el resultado de la influencia de la temperatura en el proceso. Se aumentó la temperatura definida por Cintra (1984), para disminuir el riesgo de contaminación, ya que a temperaturas mayores, la probabilidad de que durante la reacción enzimática haya una contaminación por microorganismos mesófilos, es menor y para estudiar el efecto que tiene la temperatura sobre el rendimiento del proceso.

TABLA 5. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL RENDIMIENTO DE EXTRACCION DE ACEITE DE COCO.

TEMPERATURA (°C)	% DE RENDIMIENTO	% DE RENDIMIENTO RELATIVO
40	54.3	82.0
50	66.3	100.0
55	59.4	89.6
60	56.1	84.7

Tiempo de reacción 60 min., agitación 200 rpm, concentración de enzimas 0.1% P/V de proteasa, pectinasa y alfa-amilasa.

De esta tabla se desprende que 50°C es la temperatura óptima para el proceso.

En la tabla 6 se presenta un estudio para reproducir los resultados reportados por Cintra (1984). No se pretende optimizar la concentración de las enzimas, simplemente verificar que se encuentran en las cantidades suficientes, incrementando la dosis por encima de lo definido con anterioridad.

TABLA 6. EFECTO DE LA CONCENTRACION DE ENZIMA EN EL RENDIMIENTO DE EXTRACCION DE ACEITE DE COCO.

CONCENTRACION DE ENZIMA (% P/V)			RENDIMIENTO (%)	RENDIMIENTO RELATIVO (%)
CLAREX	TENASE	HT-P		
0.1	0.1	0.1	63.7	100
0.15	0.1	0.1	69.5	109.0
0.15	0.05	0.05	48.5	76.1
0.2	0.1	0.1	73.9	115.9

Temperatura 40°C, tiempo de reacción 60 minutos.

De la tabla 6 se desprende la importancia relativa de las pectinasas, en el rendimiento de extracción.

En base a los resultados obtenidos se definió como nueva concentración de enzimas : 0.15% CLAREX (pectinasa), 0.1% TENASE (alfa-amilasa) y 0.1% HT-PROTEOLITIC (proteasa), para el proceso. Estas concentraciones son usadas en pruebas posteriores. No se usó la concentración de 0.2% de CLAREX, debido a que el incremento en el rendimiento no lo justifica, por el incremento en el costo de enzima que esto implica.

En la tabla 7 se presentan los resultados del estudio del efecto de diversas pectinasas en el rendimiento de extracción. Es sabido que el término "pectinasa" involucra un complejo grupo de enzimas que pueden incluir Endo y Exo PMG, Endo y Exo PG, Endo y Exo PL, Endo y Exo PAL, además de pectiesterasas y otras enzimas que produce Aspergillus niger. Cada producto comercial puede ser diferente por el número y proporción de enzimas que contenga, además de otras actividades asociadas (la actividad mananasa, es importante, considerando que se trata de un polisacárido presente en la carne de coco).

TABLA 7. EFECTO DE LA ADICION Y/O SUSTITUCION DE DIVERSAS ENZIMAS COMERCIALES AL PROCESO ENZIMATICO

ENZIMA	ENZIMA SUSTITUIDA	RENDIMIENTO (%)	% DE RENDIMIENTO RELATIVO
0.1 % CLAREX, TENASE Y HT-P	CONTROL	60.24	100.0
PECTINASAS			
0.1% Irgazyme	Clarex	67.0	111.6
0.1% Pectimex	Clarex	56.52	93.8
0.1% Pectimex	--	52.17	109.5
0.1% Klearzyme	--	67.39	111.8
0.1% Rohapect	Clarex	62.92	104.4
PROTEASAS			
0.1% Papaina	HT-P	50.72	84.2
0.1% Amano 2A	HT-P	51.1	84.8
CELULASAS			
0.1% Cytolasa	Clarex	54.1	89.8
1.0% Cytolasa	--	65.21	108.2
BETA GLUCANASAS			
0.3% Brew-n-zyne	Todas	10.86	18.0
0.1% Brew-n-zyne	--	70.65	117.3

Temperatura 50°C, tiempo de reacción 30 minutos.

De la tabla 7 se desprende que en las condiciones del experimento, la enzima Klearzyme (Novo), es ligeramente más eficiente. El orden de eficiencia es : Klearzyme = Irgazyme (Novo) > Pectimex > Rohapact > Carex .

Debido a que Klearzyme (Novo) e Irgazyme (Novo), son de importación y no se dispone de su costo actual, no se usaron en las pruebas posteriores, a pesar de obtenerse un incremento en el rendimiento del proceso.

En la misma tabla 7 se observa el efecto de otras enzimas: la Cytolasa, una enzima recientemente comercializada por Genencor, y propuesta para incrementar la extracción de aceite de oliva y la Brew-n-zyme, empleada en la maceración de mostos cerveceros por su actividad beta (1 - 3) glucanasa, no presentan ninguna ventaja para el proceso.

Tampoco la sustitución de HT-Proteolitic por Amano 2A o papaina, la cual resulta sin duda de una adecuada afinidad de la primera con respecto a las otras dos .

4.3 RECUPERACION DE ENZIMAS

Las pruebas de esta etapa consistieron en recuperar el agua y enzimas para su reuso con un lote nuevo de coco y así abatir el costo de enzimas y el consumo de agua durante el proceso.

Separada la fase cremosa se recupera el agua por decantación, se mide el volumen obtenido y se completa al necesario para una nueva reacción, adicionando la cantidad de enzima requerida para conservar la concentración de 0.1% de HT-Proteolitic. 0.1 de

Tenase y 0.15% de Clarex. Al terminar la reacción se repite la operación anterior. Se encontraron resultados similares en las tres reacciones, observándose que en la tercera reacción el rendimiento es mayor debido a que parte de la grasa de las reacciones anteriores queda en el agua y esta se acumula, recuperándose hasta la última reacción, como se puede observar en la tabla B

TABLA B. ESTUDIO DE RECIRCULACION DEL AGUA DE EXTRACCION EN EL PROCESO DE EXTRACCION DE ACEITE DE COCO

No. DE REACCION	% DE RENDIMIENTO DE RECIRCULACION	AGUA RECUPERADA (%)
1	63.04	70
2	64.40	70
3	64.90	70

Estas pruebas se hicieron con el coco de Colima a una temperatura de 50°C, tiempo de reacción 30 min., concentración de enzima 0.15% Clarex, 0.1% Tenase y 0.1% HT-Proteolitic.

4.4 SEPARACION DE FASES

Una vez terminada la reacción, al suspender la agitación se forman tres fases bien definidas: una fase cremosa (agua-crema), en la parte superior, una fase acuosa en la parte intermedia y en el fondo queda sedimentada la pulpa de coco. Se observó que durante la sedimentación de la pulpa de coco parte de la crema era atrapada o quedaba adherida a las partículas de coco.

Experimentos preliminares mostraron que después de remover la crema de la superficie del recipiente, un periodo corto de agitación liberaba una parte significativa de crema. Al retirar esta segunda capa, otro periodo de agitación permitía recuperar sólo una cantidad comparativamente limitada de crema. Si el coco era prensado se recuperaba la crema adherida a éste y se obtenía un mayor rendimiento.

Paralelamente a las pruebas de separación de crema en dos etapas se determinó el efecto que tenía el tipo de agitación: por medio de aire comprimido caliente o con un agitador mecánico. La temperatura de reacción se mantuvo a 50°C para evitar que las partículas de grasa se solidifiquen. Se encontró que la agitación mecánica es ligeramente más eficiente que la agitación con aire. Según se muestra en la tabla 9.

TABLA 9. EFECTO DEL TIPO DE AGITACION PREVIA A LA REACCION, EN LA RECUPERACION DE ACEITE

	SEPARACION	RENDIMIENTO
TERMINO DE LA REACCION	1	57.0 %
1a. AGITACION MECANICA	2	12.5 %
2a. AGITACION MECANICA	3	2.6 %
		Tot. 72.1 %
TERMINO DE LA REACCION	1	59.6 %
1a. AGITACION CON AERACION	2	5.1 %
2a. AGITACION CON AERACION	3	5.3 %
		Tot. 70.0 %

Condiciones de reacción : temperatura 50°C , tiempo 30 minutos, concentración de enzimas (P/V): 0.1% proteasa, 0.1% alfa-amilasa y 0.15% pectinasa.

Rendimiento de la prueba testigo (solo la primera separación), 53.8%. El rendimiento es el promedio obtenido en pruebas por duplicado.

4.5 EFECTO DEL TIEMPO Y VELOCIDAD DE AGITACION

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas sobre el tipo de agitación, se optó por usar la agitación mecánica debido a que se podía emplear el mismo agitador, usado durante la reacción, así como el mismo baño.

Definido el tipo de agitación, se hizo variar el tiempo necesario para la segunda agitación, así como las rpm del agitador. Los resultados se presentan en la tabla 10.

TABLA 10. EFECTO DEL TIEMPO Y LA VELOCIDAD DE AGITACION EN LA RECUPERACION DE ACEITE

RPM	TIEMPO * (MIN)	RENDIMIENTO (%)
710	3	73.1
1680	3	82.7
710	10	79.7
1680	10	86.9

* Tiempo durante el cual se lleva a cabo la segunda agitacion.

De lo anterior se desprende que las mejores condiciones para obtener un buen rendimiento es una alta velocidad por un tiempo corto, ya que al incrementar el tiempo a diez minutos no se traduce en un aumento importante en el rendimiento. El mantener un periodo corto de agitacion permite acelerar el proceso y reducir el consumo de energia.

4.6 VELOCIDAD ASCENCIONAL DE LA CREMA

A nivel laboratorio la formacion de las tres fases bien definidas se llevaba a cabo en 5 minutos, es decir, se deja reposar el vaso de precipitado (pp) donde se efectuaba la reaccion y a los 5 minutos se puede recuperar la crema que corresponde a la primera extraccion. Al llevar la reaccion a un nivel mas grande, es evidente que el tiempo de formacion de las fases es mayor. Por este motivo se hicieron pruebas para determinar la velocidad ascencional de la crema para poder fijar el tiempo requerido de reposo a volúmenes mayores de reaccion que aquellos usados en el laboratorio (500 y 1000 ml).

En esta prueba se midió la distancia recorrida por la interfase agua-crema cada determinado tiempo; se graficó tiempo contra distancia recorrida. La pendiente de la recta representa la velocidad ascensional.

Se observó que la velocidad disminuye con la pérdida de calor (por solidificación de la grasa), así que en las últimas pruebas se aislaron los recipientes para evitar este fenómeno. Los resultados se muestran en la tabla II.

TABLA II. DETERMINACION DE LA VELOCIDAD ASCENCIONAL DE LA CREMA DESPUES DE LA REACCION ENZIMATICA

RECIPIENTE	T.I (°C)	T.F (°C)	ALTURA (cm)	TIEMPO (min)	VELOCIDAD (cm/min)
Columna de vidrio	50	29	52	109	0.47
Probeta 2 l.	50	32	30	45	0.66
Probeta 2 l.	50	32	46	67	0.68
Probeta 2 l.	50	48	46	37	1.35
Probeta 2 l.	50	47	24	18	1.33
Probeta 1 l.	50	47	12.5	9	1.38
Probeta 1 l.	50	45	40	32	1.25
Vaso pp 4 l.	50	47	21	18.5	1.135
Vaso pp 4 l.	50	46	6.8	5	1.13
Columna acrílico	50	47	50.8	45	1.12
Columna acrílico	50	46	100	85	1.17
Columna acrílico	50	47	130	100	1.29
Sedimentador 9 l.	50	49	4.1	3	1.36
Sedimentador 9 l.	50	48	3.9	3	1.30

T.I = Temperatura inicial
T.F = Temperatura final

De estos experimentos es posible concluir que la velocidad ascensional es baja (aproximadamente 1.2 cm/min) e independiente de la geometría del recipiente.

Por los resultados obtenidos se optó por cambiar la geometría del tanque separador ya que el tiempo necesario para el reposo de la mezcla disminuía considerablemente si el tirante en el tanque era pequeño. Como consecuencia, todas las pruebas de separación posteriores se hicieron con el sedimentador de forma rectangular. Un análisis de la conveniencia de utilizar un mismo tanque para la reacción y la separación o bien llevarlos en tanques separados, condujo a esta última opción. El principal criterio de decisión fue simplificar la evacuación de la capa de crema al eliminar en lo posible equipo y maniobras complicadas. El diseño del tanque separador cumple con este requerimiento. Además con esto se libera el tanque de reacción mientras se lleva a cabo la separación, lo que favorece la productividad de la planta.

Se intentó acelerar la velocidad ascensional de la crema introduciendo aire caliente, pero este rompía la fase cremosa impidiendo su formación estable.

4.7 RECUPERACION DE LA CREMA

La recuperación de la crema representó un problema durante las pruebas iniciales en vasos de pp, ya que ésta se obtenía dejándola solidificar a bajas temperaturas. Cuando se hicieron las pruebas con tres recuperaciones, una vez formada la fase cremosa se retiraba manualmente por la parte superior. Esto a

nivel laboratorio resulta fácil y manejable, pero a niveles más grandes estos procedimientos no son factibles ni recomendables, así que se buscaron otras formas de recuperar la crema. Para esto se hicieron las pruebas siguientes :

a) Bombeo

La crema formada fue retirada por la parte superior, utilizando una bomba peristáltica. Este procedimiento no fue eficaz porque al succionar la capa de crema formada, ésta se rompía dispersándose en el agua, lo que impedía su recuperación.

Por otro lado, las partículas de coco flotantes eran succionadas y al cabo de un tiempo la bomba se obstruía.

b) Centrifugación directa del agua

La centrifugación directa de la fase cremosa y acuosa sin ser separadas no fue factible, debido al elevado costo que representaría centrifugar volúmenes a nivel industrial. A nivel laboratorio, los tubos de centrifuga tenían más agua que aceite lo que representaba problemas en su recuperación.

c) Separación por vertido

Terminada la reacción se pasa la mezcla a un sedimentador de forma rectangular bien nivelado; una vez formadas las tres fases se introduce por el fondo, mediante una bomba, agua a 50°C para evitar la solidificación de la crema. De esta manera, el nivel del líquido subía, acción que se realizaba hasta que la crema empezaba a vertir por los cuatro lados, teniendo en la parte inferior un recipiente para recuperarla. Este procedimiento

resultó ser el más adecuado debido a que no requiere de un equipo costoso ni sofisticado, y además el agua que se utiliza para vertir se puede emplear para la siguiente reacción (recirculación).

4.8 RECIRCULACION DE AGUA Y ENZIMAS

Definido el método para recuperar la crema y la conveniencia de hacer dos extracciones y un prensado para obtener la mayor cantidad de aceite posible, se procedió a integrar una recirculación del agua hacia el reactor después de haber retirado la crema. El objetivo era recuperar enzimas y reducir el volumen de agua necesario. Sobre este aspecto, se habían realizado pruebas preliminares con buenos resultados. Adicionalmente, se aumentó el volumen de reacción de 0.5 litros a 12 litros, para un primer escalamiento (foto 1).

El proceso completo se lleva a cabo de la siguiente manera: Terminada la primera reacción, se vierte la mezcla al sedimentador dejando reposar 5 minutos con objeto de permitir la formación de las fases (foto 2). Pasado este tiempo se introduce agua a 50°C por medio de una bomba, a manera de elevar el nivel del líquido en el tanque y permitir la evacuación de la crema por derrame en sus cuatro lados (foto 3). Cuando el agua comienza a salir, la operación se interrumpe y la cantidad de agua introducida se cuantifica. Con la misma bomba se procede a evacuar hacia el reactor un volumen de agua similar al introducido previamente. A continuación se agita una segunda vez con aire comprimido durante tres minutos dejando reposar la

mezcla otros 5 minutos (foto 4). Una segunda capa de crema se forma nuevamente y se procede a efectuar su derramamiento utilizando el procedimiento ya descrito. Después de recircular el agua hacia el reactor, se retira manualmente la pulpa de coco sedimentada y se procede a su prensado. El líquido obtenido es también dirigido hacia el tanque de reacción. Para iniciar el segundo lote, se mide el volumen de agua recirculada y la cantidad faltante se introduce como agua fresca, conservando la relación 1:4 (coco-agua).

La cantidad de enzima necesaria se agraga de acuerdo a la cantidad de coco empleado en la nueva reacción y al volumen de agua fresca introducida, con objeto de conservar la concentración de enzimas. La nueva mezcla se somete a las mismas condiciones de reacción (50°C, 30 minutos.) y una vez terminada se repite por segunda vez la operación de separación. La crema recuperada se centrifuga, obteniéndose el aceite de coco (foto 5). En esta fotografía se pudo apreciar la calidad (color) del producto.

En nuestra primera prueba, el rendimiento global de la reacción fue considerado bajo (62.3%), así que se optó por aumentar el tiempo de reacción a 60 minutos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 12.

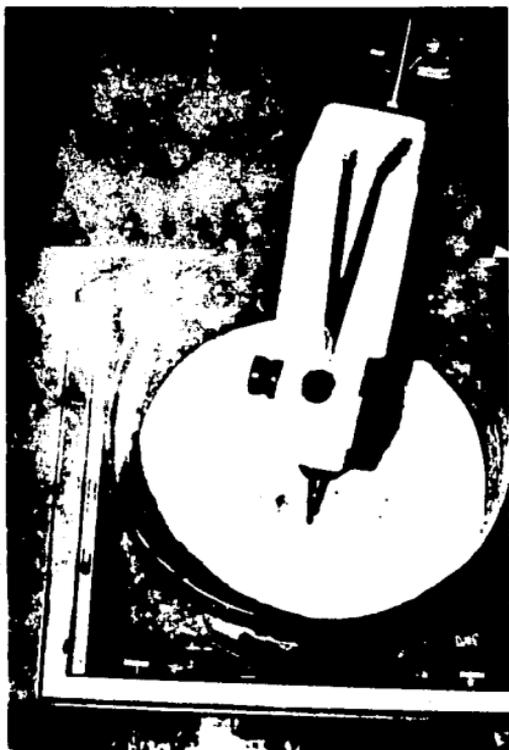


FOTO 1. ESCALAMIENTO A 12 LITROS: SISTEMA DE REACCION
EN VISTA AEREA

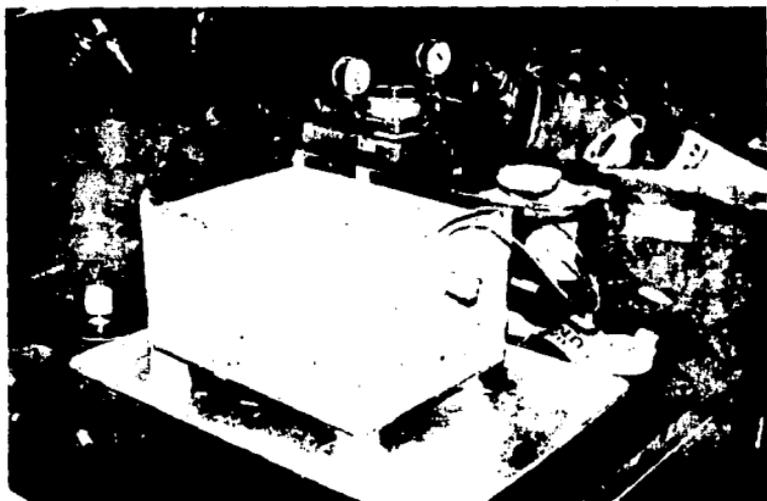


FOTO 2. SEDIMENTACION Y SEPARACION DE FASES



FOTO 3. RECUPERACION DE LA CREMA POR DERRAME



FOTO 4. SEGUNDA AGITACION CON AIRE COMPRIMIDO



**FOTO 5. ACEITE DE COCO OBTENIDO POR EXTRACCION ENZIMATICA
DESPUES DE LA CENTRIFUGACION DE LA CREMA**

TABLA 12. RESULTADOS OBTENIDOS EN PRUEBAS DE RECIRCULACION, EFECTUADA LA SEDIMENTACION EN TANQUE

No. DE REACCION (LOTE)	RENDIMIENTO (%)
1	62.65
2	80.27
3	99.81
RENDIMIENTO GLOBAL	79.37

Como se puede observar, en la tabla 12, el rendimiento aumenta en cada una de las reacciones; esto se debe a que el agua de recirculación contiene cierta cantidad de crema, lo que provoca su acumulación en las siguientes reacciones. El rendimiento global considerando las tres reacciones es del 80 %.

De la pruebas anteriores se definieron las condiciones siguientes para el proceso:

Temperatura: 50°C.

Tiempo: 60 minutos.

Concentración de enzimas:

0.1 % proteasa (HT-PROTEOLITIC).

0.1 % alfa-amilasa (TENASE).

0.15 % pectinasa (CLAREX).

Agitación durante la reacción: 1130 rpm.

Lotes: 3 (2 con agua de recirculación).

Separación por lote: 2 separaciones y prensado del coco sedimentado.

Agitación en el tanque separador: 3 min.
con aire comprimido.

4.9. MODIFICACION EN LAS CONDICIONES DE REACCION

Al hacer una evaluación de costos, se encontró que el proceso no era rentable por el alto costo que representaba la cantidad de enzima utilizada, aún considerando la recirculación de agua y enzimas .

Por esta razón se decidió modificar las condiciones de reacción, principalmente concentraciones de enzima y tiempos de reacción. Las condiciones experimentadas y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 13. Siendo el objetivo, disminuir al máximo la concentración de enzimas.

TABLA 13. EFECTO DE LA CONCENTRACION DE ENZIMA Y TIEMPO DE REACCION EN EL RENDIMIENTO

ENZIMAS (% P/V)	TIEMPO (min)	RENDIMIENTO (%)
0.1 Clarex, 0.1 HT-P 0.1 Tenase	30	79.3
0.075 Clarex, 0.05 HT-P 0.05 Tenase	60	69.9
0.05 Clarex, 0.05 HT-P 0.05 Tenase	60	49.6
0.05 Clarex, 0.05 HT-P 0.05 Tenase	90	74.2
0.075 Clarex, 0.05 HT-P 0.05 Tenase	90	76.4
0.0375 Clarex, 0.025 HT-P 0.025 Tenase	90	62.4

Temperatura 50°C, dos recuperaciones de agua y un prensado, en un solo lote de coco.

De acuerdo con estos resultados, se definieron como las nuevas condiciones de reacción:

Temperatura: 50°C.

Tiempo de reacción: 90 minutos.

Concentración de enzimas:

0.075 % P/V Pectinasa (CLAREX).

0.05 % P/V Proteasa (HT-PROTEOLITIC).

0.05 % p/v Alfa-amilasa (TENASE).

Estas nuevas condiciones representan un aumento del 50% en el tiempo de reacción y una disminución del 50% en la concentración de las tres enzimas. Se hizo una prueba de recirculación bajo estas condiciones, obteniéndose los resultados de la tabla 14.

TABLA 14. NUEVAS CONDICIONES DE REACCION Y RENDIMIENTO OBTENIDO

No. DE REACCION (LOTE)	RENDIMIENTO (%)
1	68.8
2	70.2
3	70.9
RENDIMIENTO GLOBAL	70.1

Mediante una evaluación de costos se encontró que con estas concentraciones de enzimas y obtenido este rendimiento, el proceso es rentable. Esta evaluación se presenta en la tabla 13.

TABLA 15. EVALUACION DE COSTOS CON RESPECTO A LA ENZIMA UTILIZADA (EN DOLARES)

No. DE REACCION	ENZIMA KG	COSTO DE ENZIMA \$	CANTIDAD DE COPRA TON.	CANTIDAD DE ACEITE EXT. l
1	2.5 HT-P	21.725	1	344 l
	2.5 T	9.550		
	3.75 C1	28.762		
		60.037		
2	1.1 HT-P	9.559	1	351 l
	1.1 T	4.202		
	1.655 C1	12.093		
		26.454		
3	1.1 HT-P	9.559	1	355 l
	1.1 T	4.202		
	1.655 C1	12.693		
		26.454		
TOTAL	16.455	112.946	3	1050 l

Costo de enzima/tonelada de copra = \$ 37.648 US

Costo de enzima/tonelada de aceite = \$ 107.5 US

Para procesar tres toneladas de coco húmedo, con 30% de grasa, obteniendo un rendimiento del 70% y adicionando un 30% de agua fresca en la recirculación.

4.10 AGUA RESIDUAL

Considerando que el volumen de agua utilizada es una limitante en cualquier proceso biológico en medio líquido, se considera importante realizar su tratamiento para recircularla.

El agua residual fue analizada y Los resultados del análisis se presentan en la tabla 16.

TABLA 16. ANALISIS DEL AGUA RESIDUAL DEL PROCESO DE EXTRACCION DE ACEITE DE COCO

PARAMETRO	MUESTRA 1	MUESTRA 2
pH	4.64	--
Alcalinidad	402 mg/l CaCO ₃	--
DGOs	30,962 mg/l	32,250 mg/l
DGOT	67,733 mg/l	35,750 mg/l
DBOs	--	14,500 mg O ₂ /l
DBOT	--	20,500 mg O ₂ /l
SST	40,315 mg/l	--
STF	4,055 mg/l	--
STV	36,260 mg/l	--
SST	15,115 mg/l	--
SSF	275 mg/l	--
SSV	14,840 mg/l	--

DGOs = Demanda Quimica de Oxigeno soluble.
 DGOT = Demanda Quimica de Oxigeno total.
 DBOs = Demanda Bioquimica de Oxigeno soluble.
 DBOT = Demanda Bioquimica de Oxigeno total.
 SST = Sólidos Totales Totales.
 STV = Sólidos Totales Volátiles.
 STF = Sólidos Totales Fijos.
 SST = Sólidos Suspendidos Totales.
 SSV = Sólidos Suspendidos Volátiles.
 SSF = Sólidos Suspendidos Fijos.

Como puede observarse, esta agua representa una fuente de contaminación, por su alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, el tipo de residuo permite suponer una buena biodegradabilidad, ya que contiene azúcares, grasa, proteína, enzimas y partículas de coco. Su tratamiento por vía anaerobia parece ser factible tanto técnica como económicamente, ya que su

consumo energético es muy reducido y adicionalmente, la producción de metano permite su aprovechamiento energético en la planta productora.

4.11 ELABORACION DE UNA BEBIDA CON SABOR A COCO

Dada la composición del agua residual, su aprovechamiento como bebida para consumo humano, es una posible opción que amerita ser investigada. Esta bebida puede ayudar a la digestión debido a las enzimas que contiene y su composición es interesante desde un punto de vista nutricional.

Con este fin se hizo una reacción en condiciones higiénicas, encontrándose que con una pequeña cantidad de azúcar, esta agua tiene un agradable sabor. Para confirmar el posible uso del agua se le hizo un análisis microbiológico; se buscó un estabilizante, ya que las partículas sólidas que tiene, tienden a sedimentarse; se determinó el contenido de azúcares solubles por el método de DNS y de proteínas solubles por el método de Lowry. Los resultados obtenidos se dan a continuación:

a) Pruebas microbiológicas.

Se determinaron: cuenta en placa, NMP para coliformes, hongos y levaduras, y se obtuvieron los siguientes resultados.

Cuenta en placa: 3×10^8 UFC/ml.

Levaduras: 30 UFC/ml.

Hongos: Negativo.

Coliformes: Negativo.

La cuenta tan elevada de microorganismos presentes en el agua puede deberse a que parte provengan del coco, ya que éste no es lavado antes de procesarlo, o por su propio manejo. También pueden provenir del medio ambiente (aire), ya que durante la reacción enzimática, la mezcla no es tapada; sin embargo no hay presencia de patógenos ni hongos y la cuenta de levaduras es baja, posiblemente también provienen del coco.

Se recomendaría utilizar simplemente un conservador como el ácido cítrico o ácido benzoico para disminuir el pH del agua, ya que éste es de 6, para evitar el desarrollo de bacterias, o una pasteurización para prevenir la posible presencia de microorganismos patógenos.

b) Concentración de azúcares y proteínas solubles.

Azúcares: 2.32 g/l

Proteínas: 1.9 g/l

Se hicieron pruebas con diferentes estabilizantes, encontrándose como el más adecuado a la mezcla de lecitina-monoesterato de glicerilo y algarrobo, en las siguientes proporciones:

Lecitina: 0.25 %

Monoesterato de glicerilo: 0.25 %

Algarrobo: 0.1 %

De lo anteriormente expuesto se desprende una posibilidad de utilizar el agua residual como bebida para consumo humano, siempre que el proceso se lleve a cabo en condiciones higiénicas. Se recomienda hacer un estudio más profundo, tanto de

acondicionamiento de la bebida como de mercadotecnia, para determinar la factibilidad de ser lanzada al mercado.

4.12 DESHIDRATACION DE LA PULPA DE COCO RESIDUAL

Las curvas de secado obtenidas a las diferentes condiciones de temperatura y espesor de lecho, fig., 4, 5 y 6, muestran un comportamiento típico, presentandose durante la deshidratación las dos zonas clásicas de velocidad constante y velocidad decreciente.

La presencia de estos dos periodos en la deshidratación, pueden explicarse en buena medida, en términos de los fenómenos de la transmisión de calor y de masa. En el curso de la deshidratación, la pulpa de coco va perdiendo humedad de la superficie y paulatinamente adquiere una espesa capa seca, estando la mayor parte de la humedad restante en el centro. Esta situación produce un gradiente de humedad desde el centro hasta la superficie. Como resultado, la capa seca exterior forma una barrera aislante contra la transmisión rápida de calor y el agua que queda en el centro, tiene que recorrer una distancia mayor que la recorrida por la humedad al principio del secado.

En estas curvas de secado, se observa la influencia determinante de la temperatura sobre el tiempo de secado. Esto probablemente es debido, a que la principal resistencia en el secado de la pulpa de coco, se encuentra en el interior de las partículas, posiblemente por una fuerte retención del agua celular.

Fig. 4. Curva de secado de coco a 60°C y
 espesor de lecho 0,5 cm (+++) y 1,0 cm (--)

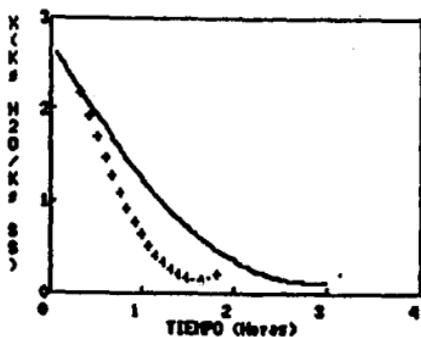


Fig. 5. Curva de secado de coco a 75°C y
 espesor de lecho 0,5 cm (+++) y 1,0 cm (--)

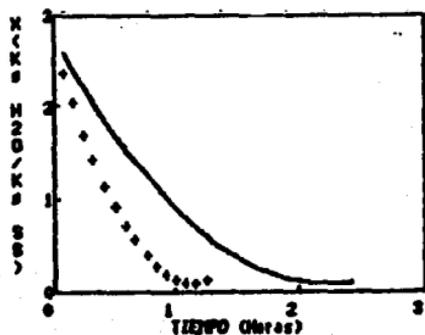
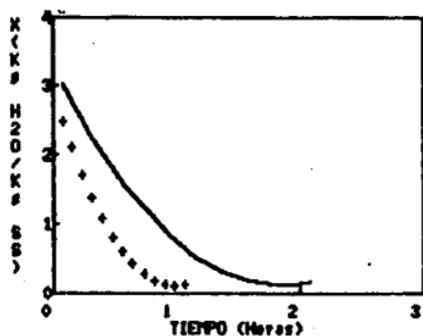


Fig. 6. Curva de secado de coco a 90°C y
espesor de lecho 0.5 cm (+++) y 1.0 cm (--)



En la tabla 17, se muestran algunas características de los procesos de secado efectuados.

TABLA 17. SECADO DE PULPA DE COCO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y EL ESPESOR DE LECHO

Temperatura (°C)	60		75		90	
Tamaño de lecho (mm)	5	10	5	10	5	10
Peso muestra (Kg SS)	0.0509	0.093	0.0614	0.0948	0.0621	0.0853
Zona de secado a vel. constante (horas)	0.83	1.0	0.5	0.83	0.416	0.75
Zona de secado a vel. decreciente (horas)	1.0	2.0	0.75	1.586	0.667	1.333
Tiempo de secado (h)	1.83	3.0	1.25	2.416	1.083	2.083
Humedad inicial (%)	75.4	72.7	71.7	72.5	73.0	76.2
Humedad crítica Xc (kg H2O/kg SS)	0.92	1.23	0.86	1.13	0.94	1.26
Humedad Final (%)	2.4	1.9	1.2	1.5	1.6	1.4

(Vel. aire = 4.5 m/s) Area de transferencia de masa y calor = 0.038m

Los modelos matemáticos de regresión polinomial de orden 2 y 4, obtenidos a partir de las curvas de secado y de velocidad de secado a las diferentes temperaturas y espesores de lecho manejados, se obtuvieron de la siguiente manera:

Para una temperatura T de secado y un espesor de lecho dado se obtuvo la curva de secado de la forma:

$$f(X) = a + bt + ct^2$$

donde:

X = Contenido de humedad libre (Kg H2O/Kg SS)

t = Tiempo (horas)

y la curva de velocidad de secado de la forma:

$$f(R) = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4$$

donde:

R = Velocidad de secado (Kg H2O/m h)

X = Humedad libre promedio (Kg H2O/Kg SS)

En la tabla 18 se presentan los resultados obtenidos del secado de la pulpa de coco a las diferentes temperaturas y espesores de lecho que se manejaron.

Las curvas de secado, velocidad de secado y la integración gráfica para el periodo de velocidad decreciente se incluyen en el anexo B.

Con respecto a las características físicas de la pulpa de coco deshidratada, estas no se ven modificadas en lo que se refiere a olor, sabor y textura. El único cambio apreciable, es en cuanto a color, ya que a 90 y 75°C, se presentó un "encafecimiento" del producto, siendo menor este a 75°C, mientras que a 60°C no es apreciable. Esta situación se muestra en la foto 6 .

Este "encafecimiento", posiblemente se deba a la caramelización de los azúcares presentes, o bien, a que se lleva a cabo la reacción de Maillard.

Por lo anterior, se considera que la temperatura de operación más conveniente para el proceso de secado de coco sea de 60°C, ya que dadas las características físicas que se obtienen a esta temperatura y aunado a las condiciones en que se efectúa el proceso de extracción de aceite, esta pulpa de coco residual,

TABLA 18. RESULTADOS DE LA REGRESION POLINOMIAL EFECTUADA PARA LA OBTENCION DE LAS CURVAS DE SECADO Y DE VELOCIDAD DE SECADO A DIFERENTES CONDICIONES DEL PROCESO

TEMP. DE SECADO (°C)	ESPEZOR DE LECHE (cm)	CURVA DE SECADO				CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO					
		a	b	c	r ¹	a	b	c	d	e	r ¹
60	0.5	3.342	-3.915	1.200	0.999	-1.144	8.776	-5.828	1.360	-0.116	0.975
60	1.0	2.767	-1.860	0.325	0.999	-0.610	8.798	-9.687	-5.150	-0.960	0.980
75	0.5	2.733	-4.650	2.052	0.999	-0.712	11.701	-7.033	0.815	0.327	0.995
75	1.0	2.786	-2.451	0.554	0.999	-0.924	14.275	-17.781	9.911	-1.890	0.977
90	0.5	2.244	-5.783	2.891	0.999	1.904	21.232	-18.260	5.908	-0.208	0.996
90	1.0	3.322	-3.539	0.973	0.999	0.735	10.412	-8.360	3.763	-0.619	0.979

r¹ = Coeficiente de correlación.

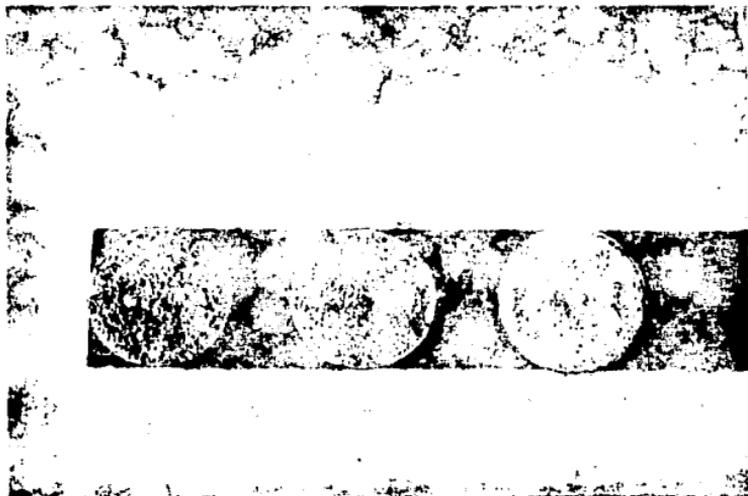


FOTO 6. COCO DESHIDRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS

puede ser utilizada para el consumo humano.

Al producto seco obtenido, se le determinó el contenido de proteína (método de Kjeldhal), grasa cruda (método de Soxhlet) y fibra cruda, los resultados se presentan en la tabla 19.

TABLA 19. CARACTERIZACION DEL COCO RESIDUAL DESHIDRATADO

:-----: :-----:	
:	BASE SECA
:-----: :-----:	
: FIBRA CRUDA (%) :	33.24
: GRASA CRUDA (%) :	28.65
: PROTEINA (%) :	8.76
:-----: :-----:	

Finalmente, por integración gráfica se calcula el tiempo de secado necesario para deshidratar una tonelada de pulpa residual, con un contenido de humedad inicial del 72% hasta una humedad final del 6%, siendo la temperatura de operación de 60°C y un espesor de lecho de 1 cm. Con una relación $Ls/A = 2.44 \text{ Kg/m}^2$. Es importante señalar, que al hacer un escalamiento la relación de superficie de secado a superficie de no secado, así como el espesor de lecho, la temperatura y la velocidad del aire sean similares a los realizados a nivel laboratorio.

En las curvas de secado de pulpa de coco a 60°C y espesor de lecho de 1 cm, figuras 11 y 12 (Anexo B), se localizan las condiciones de humedad inicial y final de la muestra, (72%) $X1 = 2.57 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg SS}$ y (6%) $X2 = 0.212 \text{ Kg H}_2\text{O/kg SS}$ respectivamente. Bajo estas condiciones se tiene una $Rc = 2.9917 \text{ Kg H}_2\text{O/m}^2 \text{ h}$ y $Xc = 1.23 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg SS}$.

Como $L_s/A = 2.44 \text{ Kg/m}^2$ y se desea secar 1000 Kg de coco húmedo (280 Kg SS), al área a utilizar es:

$$A = \frac{L_s}{2.44 \text{ Kg/m}^2} = \frac{280 \text{ Kg}}{2.44 \text{ Kg/m}^2} = 114.75 \text{ m}^2$$

a) Para el periodo de velocidad constante, el tiempo de secado se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L_s}{A R_c} (X_1 - X_c)$$

Sustituyendo

$$t = \frac{280 \text{ Kg SS}}{(114.75 \text{ m}^2) (2.9917 \text{ Kg H}_2\text{O/m}^2 \text{ h})} (2.57 - 1.23) \text{ Kg H}_2\text{O/Kg SS}$$

$$t = 1.9 \text{ Horas}$$

b) Para el periodo de velocidad decreciente, se calcula $1/R$, desde $X_1 = 1.23 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg SS}$ a $X_2 = 0.212 \text{ Kg H}_2\text{O/Kg SS}$, el resultado obtenido, se grafica en función del tiempo (fig. 15, Anexo B) y se determina el área bajo la curva, siendo esta igual a 0.4447.

Este valor, se sustituye en la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} = \frac{280 \text{ Kg}}{114.75 \text{ m}^2} (0.4447 \frac{\text{m}^2 \text{ h}}{\text{Kg}})$$

$$t = 1.08 \text{ Horas}$$

El tiempo total de secado es:

$$t_{\text{total}} = (1.09 + 1.08) \text{ h} = 2.17 \text{ horas}$$

Es recomendable utilizar a nivel industrial, un secador de túnel, en donde, se colocan las charolas en carros, cada carro cargado debe tener un tiempo de residencia dentro del túnel de 2.17 horas. Cuando un carro cargado de producto secado sale del túnel, deja lugar para que entre otro carro cargado de producto húmedo por el extremo opuesto. De esta manera la operación se hace semi-continua. O bien, utilizar una banda sin fin, que pase a través de un túnel u horno, teniendo como ventajas:

- Alimentación automática y uniforme del producto sobre la banda en forma de capa delgada regulada.
- Control de flujo de aire y de calor en diferentes secciones.
- Vaciado del producto a una segunda banda.
- Recolección automática del producto secado.
- Es una operación continua.

4.13. RESUMEN DEL PROCESO DE SEPARACION

La separación de la crema de coco del medio de reacción se lleva a cabo en un tanque diseñado especialmente para tal efecto. En el proceso intervienen diversas operaciones unitarias: separación de la crema por flotación, separación del coco por sedimentación, agitación del contenido del tanque y prensado del coco una vez evacuado y drenado.

La filosofía operacional fue la de limitar en lo posible maniobras complicadas y equipo en general. El objetivo era llegar a un proceso de separación tecnológicamente simple pero eficiente.

El proceso de separación propuesto se lleva a cabo en un tanque perfectamente rectangular, y cuya profundidad es la cota más importante en el diseño. En la parte inferior tiene una tolva con objeto de permitir un drenado adecuado del coco. Su salida se hace a través de una tubería controlada por una válvula.

La parte superior del tanque cuenta con canaletas de recolección de crema, cuyos bordes están perfectamente nivelados en el plano horizontal. Las canaletas tienen un fondo con pendiente hacia un canal general que recibe los aportes individuales de crema y la dirige hacia la centrifuga, en donde se realiza la separación final del aceite.

La agitación necesaria al proceso de separación se puede llevar a cabo por medio de aire comprimido, introducido con difusores situados en la base del tanque. Otro medio de lograr la turbulencia requerida es por agitación mecánica. La selección del dispositivo se basará fundamentalmente en criterios económicos como costos de inversión, operación y mantenimiento.

El transporte de agua requerido por el proceso se lleva a cabo por una bomba centrífuga, instalada de tal manera que pueda introducir y retirar agua del tanque, según el paso del proceso que se realice.

El drenado de coco se efectúa al evacuarlo del tanque separador por la parte inferior de la tolva, hacia una banda transportadora. La banda lo dirige hacia una prensa. El agua obtenida es recuperada y recirculada hacia el reactor. El coco prensado puede ser secado para después comercializarlo como

alimento para ganado o consumo humano.

El proceso general y de separación de fases se presentan en la figura 7 y 8 respectivamente. En la separación de fases, cuatro pasos intervienen:

1er. PASO. El medio de reacción se introduce en el tanque separador y se deja cierto tiempo en reposo para que las fases se formen. El tiempo necesario es función de la altura del líquido en el tanque, sin considerar la altura ocupada por el coco, el cual sedimenta en forma inmediata. En general, el tanque se diseñará de manera que el tiempo no sea mayor a los 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se introduce en el tanque, agua a temperatura cercana a la de reacción (50°C), subirá hasta alcanzar las canales e iniciar el derrame y evacuación.

La bomba que introduce el agua se parará al momento en que el agua comience a ser evacuada. En este momento, se accionan las válvulas necesarias y con la misma bomba se evacúa hacia el reactor aproximadamente la misma cantidad de agua previamente introducida.

2o. PASO. Se inicia la operación del dispositivo agitador y la mezcla se mantiene por 5 minutos. Después, se deja reposar el mismo tiempo establecido para el primer paso. Cuando las fases están formadas se sigue el procedimiento ya descrito en el paso anterior: elevación del nivel de crema, derrame y evacuación de ésta hacia el reactor del agua introducida.

3er. PASO. Este paso se lleva a cabo fuera del tanque. El coco y el agua remanente son evacuados por la parte inferior de la tolva, mediante la apertura de la válvula. La mezcla cae sobre una banda transportadora que, al mismo tiempo que dirige el coco hacia la prensa, va drenando el agua libre. Esta agua, junto con la obtenida en el prensado, es captada y recirculada hacia el reactor. El coco prensado es un subproducto que puede secarse para ser fácilmente transportado y aprovechado en alimentación animal.

4o. PASO. El paso final del proceso de separación se realiza en una centrifuga que recibe la crema recolectada en el tanque separador por medio de las canaletas. En este paso se obtiene aceite como producto final y agua residual, que puede ser recirculado hacia el reactor o evacuada del proceso.

4.14. DISEÑO GLOBAL DEL PROCESO

A partir de los resultados obtenidos a nivel laboratorio y tomando como base de diseño una tonelada de coco fresco, se hace un balance de masa para procesar tres toneladas de coco fresco, el balance se presenta en la figura 9. El diagrama de flujo, así como el diseño del tanque separador se presentan en el anexo A.

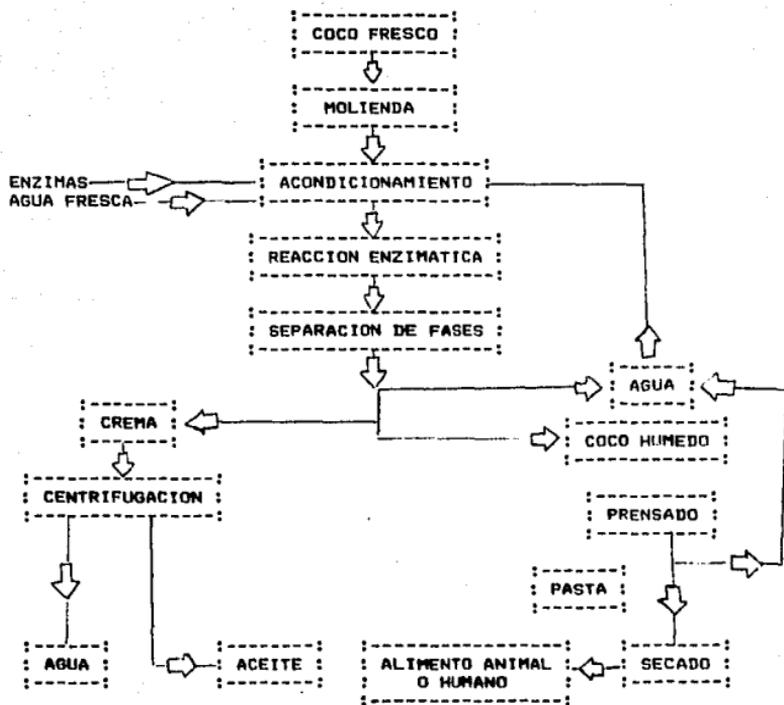


Fig. 7. Diagrama de bloques del proceso de obtención de aceite de coco por método enzimático.

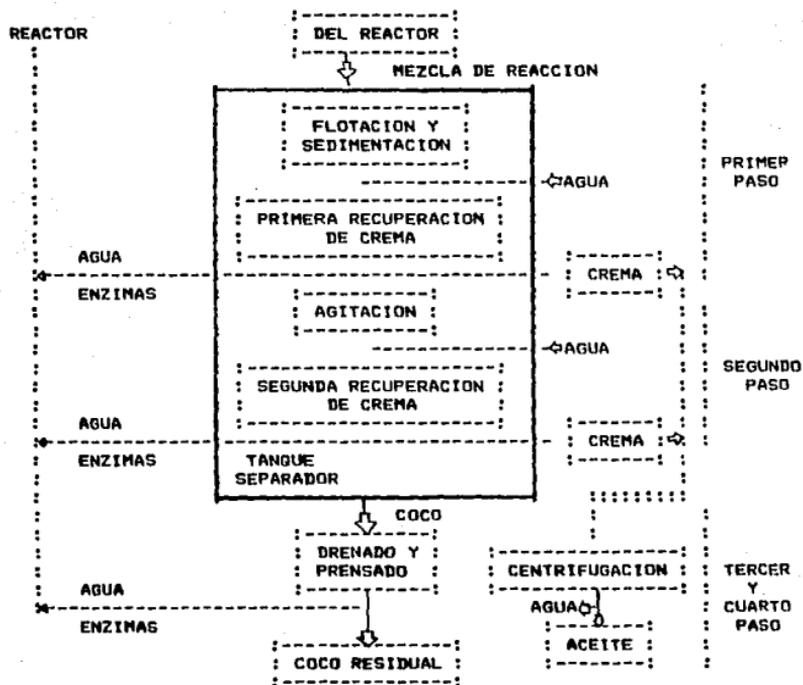
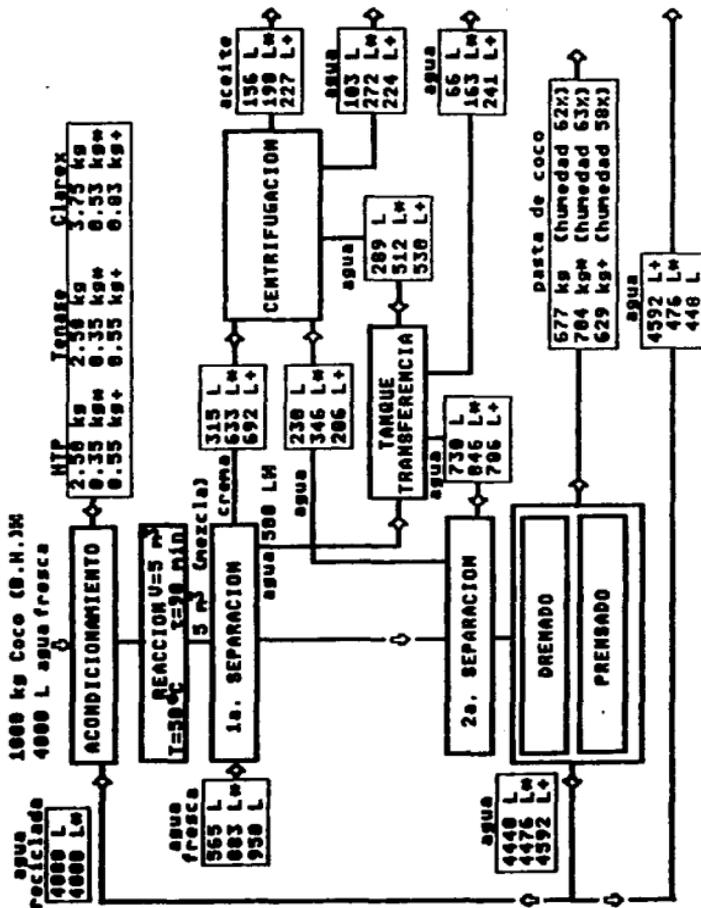


Fig. 8. Diagrama de bloques de la separación de fases del proceso de obtención de aceite de coco por método enzimático.

BALANCE DE MASA PARA PROCESAR 3000 KG DE COCO FRESCO EN TRES LOTES DE 1000 KG



Nota: W se refiere a los tres lotes de coco, w al segundo y + al tercero.

Fig. 9. BALANCE DE MASA PARA PROCESAR 3000 KG DE COCO FRESCO EN TRES LOTES DE 100 KG.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se optimizó una tecnología desarrollada a nivel laboratorio, habiéndose determinado todos los factores necesarios para el diseño de una planta piloto.

La optimización se centra en el factor clave que representa el costo de las enzimas y el uso eficiente del agua. Así mismo se introduce una etapa de separación de fases, especialmente adaptada para el proceso de extracción de aceite de coco.

El proceso de reacción-separación, de la extracción de aceite de coco por vía enzimática, presenta las siguientes ventajas:

- Rendimiento del orden del 70%.
- La recirculación permite el reuso de enzimas y agua. Esto reduce costos de producción y las necesidades de tratamiento de los efluentes.
- La etapa de separación, es una operación simple que permite su escalamiento a nivel industrial, sin requerimientos de equipo y mano de obra especializado.
- Dadas las condiciones de operación del proceso, el producto (aceite), es de alta calidad y los subproductos pueden ser utilizados en alimentación animal (pulpa residual) o en producción de biogas (efluente líquido). Otro posible aprovechamiento de ambos subproductos es utilizarlos para consumo humano.

Como conclusión general, se puede asegurar que este trabajo aporta una contribución al desarrollo tecnológico efectuado conjuntamente entre industria y universidad.

BIBLIOGRAFIA

- A.O.A.C. (1975). Official Methods of Analysis. 12 th Ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, DC.
- BADUI, D.S. (1981). Química de los alimentos. Ed. Alhambra México, 430 p.
- CINTRA M.O., LOPEZ-MUNGUÍA C.A. & VERNON C.J. (1985). "Coconut Oil Extraction by a New Enzymatic Process". Journal of Food Science. 51, 3, 695.
- FORGATY W.M. and GWARD G.A. (1974). "In Progress in Industrial microbiology, 13, D.J. Hckenhall ed. Churchill-Liulhgs Tone, edinburgh.
- GARCIA A.M.A., RIVAS R.I. & SALGADO C.M.A. (1986). "Construcción y operación de un secador solar indirecto para yuca". Gestión Tecnológica. No.2, Febrero.
- GEANKOPLIS C.J. (1982). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Ed. Continental, 1075 p.
- HAGENMAIER R., CATERCH C.M., and MATTILK (1973) "Aqueous Processing of fresh coconuts for recovery of oil and coconut skim milk". Journal of Food Science 38, 516.
- LEHWINGER L.A. (1980) "Bioquímica" Ediciones Omega S.A. 2a. Ed, 1104 p.
- LOPEZ-MUNGUÍA C. A. (1986) "Las enzimas y los alimentos" Tecnología de Alimentos, Vol. 21, 2, 22.

MEYRATH, J. and VOLAUSEK G. (1975) "Enzymes in food processing"
2a. Ed. de Academic Press, New York.

PERRY J.H. (1967) Manual del Ingeniero Químico. Tomo II
Ed. Hispanoamericana, 4a. Ed, 3076 p.

POTTER N.N. (1978). La Ciencia de los Alimentos. Ed. Edeutex,
2a Ed, 749 p.

REYNOLDS T.D. Unit Operations and Processes in Environmental
Engineering. Texas Muniversity, Brooks/Cole Engineering Division.

SEGURAJAUREGUI A.J.S. "Parámetros Cinéticos de la Deshidratación
de Yuca". Dpto Alimentos División de Estudios de Posgrado,
Facultad de Química UNAM.

THIEME J.G. (1979) "La industria del aceite de coco", FAO
Cuadernos de Fomento Agropecuario No. 89

WHITAKER J. (1972) "Principles of enzymology for the food
scientist" Ed. Marcel Dekker, New York, 636p.

WOODROOF J.G. (1979) "Coconuts: production, processing and
products" AVI Publishing Co. Inc. 2a Ed.

VACCAREZZ L.M., LOMBARDI J.L. & CHIRIFE J. (1974). "Heat Transfer
Effects on Drying Rate of Food Dehydration." The Canadian
Journal of Engineering, Vol. 52, October.

ANEXO A

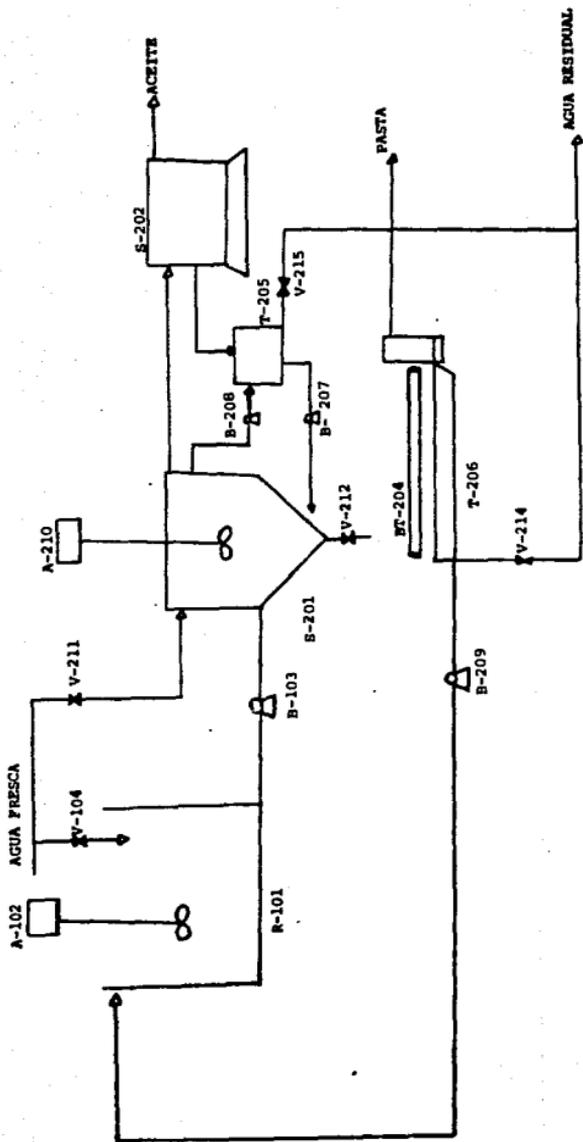


FIG.10 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE OBTENCION DE ACEITE DE COCO
POR METODO ENZIMATICO

100 AREA DE REACCION

R-101 Reactor $5m^3$ + tirante

A-102 Agitador

B-103 Bomba

200 AREA DE SEPARACION

S-201 Separador crema-copra $5m^3$ + $0.5m^3$ = $5.5m^3$

S-202 Centrifuga continua

S-203 Prensa de rodillos

BT-204 Banda transportadora

T-205 Tanque de transferencia $1m^3$

T-206 Tanque de drenado

B-207 Bomba de llenado

B-208 Bomba de vaciado

B-209 Bomba de recirculación

B-210 Agitador

DISEÑO DEL TANQUE SEPARADOR DE CREMA-PASTA

1.- Volumen de mezcla de reacción = 5 m^3

2.- Porcentajes (% V/V) ocupados por las diferentes fases:

Coco 60%

Agua 30%

Crema 10%

3.- Volumen ocupado por el agua en la mezcla de 5 m^3

$$V_a = 5 \text{ m}^3 (0.30) = 1.5 \text{ m}^3$$

4.- Altura de la fase agua

Se fija en función de la velocidad de flotación de la crema, que es de 1 cm/min , y del tiempo en que se piensa realizar esa separación, 30 minutos.

$$H_a = 1 \text{ cm/min} (30 \text{ min}) = 30 \text{ cm}$$

5.- Sección en planta del tanque

$$A = \frac{V_a}{H_a}$$

$$A = \frac{1.5 \text{ m}^3}{0.3 \text{ m}} = 5 \text{ m}^2$$

Se fijan sus lados L en $2.25 \text{ m} \times 2.25 \text{ m}$

6.- Tolva inferior

Pirámide de base cuadrada A y ángulo de 45° ($h = 0.5 L$)

$$V \text{ tolva} = \frac{1}{3} h A$$

$$V \text{ tolva} = \frac{1}{3} (1.125 \text{ m}) (5 \text{ m}^2) = 1.875 \text{ m}^3$$

7.- Sección rectangular

$$V \text{ útil} = V \text{ tolva} + V \text{ reac.}$$

$$V \text{ útil} = 5 - 1.875 = 3.125 \text{ m}^3$$

8.- Altura útil sección rectangular

$$H_v = 3.125 \text{ m}^3 (1/5 \text{ m}^2) = 0.625 \text{ m}$$

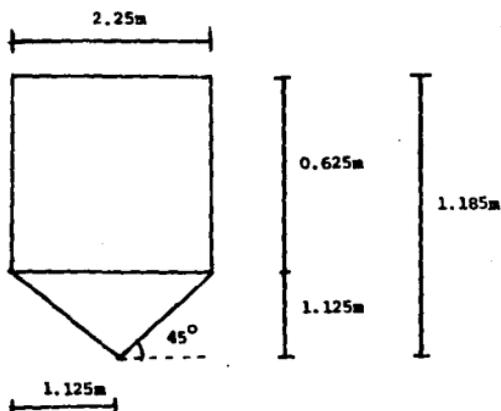
9.- Cotas generales del tanque separador

$$H_T = H_v + H_{tolva} + H_{tirante}$$

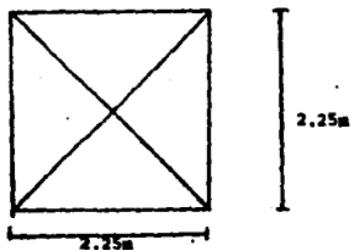
$$H_T = 0.625 \text{ m} + 1.125 \text{ m} + 0.10 \text{ m} = 1.185 \text{ m}$$

$$L = 2.25 \text{ m}$$

TANQUE SEPARADOR, DIMENSIONES GENERALES



CORTE



PLANTA

ANEXO B

Fig. 11. Curva de secado de coco a 60°C y espesor de lecho 1.0 cm

$$f(x) = 2.76714637 - 1.185987616 t + 0.324687728 t^2$$

$$r^2 = 0.999861515$$

$$r = 0.999930755$$

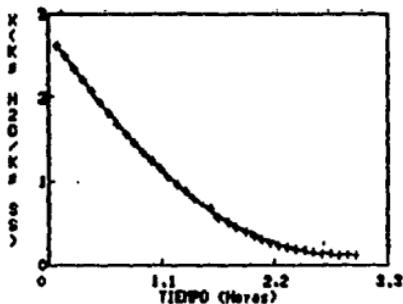


Fig. 12. Curva de velocidad de secado a 60°C y espesor de lecho 1.0 cm

$$f(R) = -0.609724105 + 8.79806941 x - 9.68660717 x^2 - 5.15024464 x^3 - 0.959618323 x^4$$

$$r^2 = 0.961304591$$

$$r = 0.980461418$$

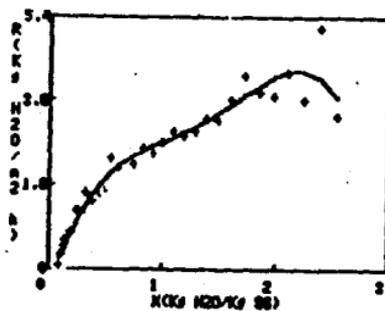


Fig. 13. Curva de secado de coco a 60°C y espesor de lecho 0.5 cm

$$f(x) = 3.34167785 - 3.91522305 t + 1.19982753 t^2$$

$$r^2 = 0.99743779$$

$$r = 0.998718128$$

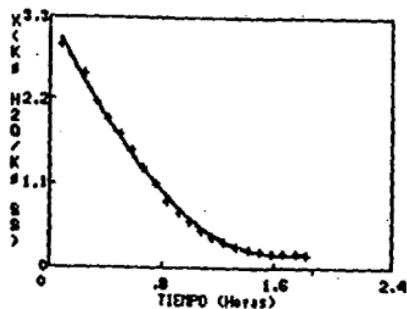


Fig. 14. Curva de velocidad de secado de coco a 60°C y espesor de lecho 0.5 cm

$$f(R) = -1.14429578 + 8.77603309 X - 5.82801415 X^2 + 1.3600116 X^3 - 0.115509752 X^4$$

$$r^2 = 0.950705442$$

$$r = 0.975041252$$

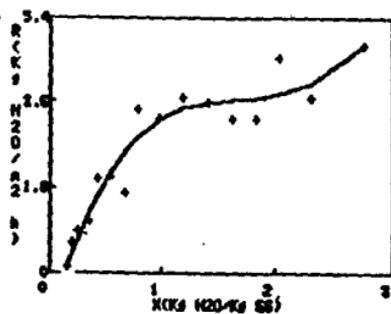


Fig. 15. Integración gráfica para el período de velocidad decreciente para el proceso de secado de coco a 60°C y espesor de lecho 1.0 cm

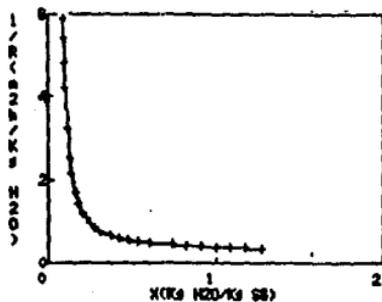


Fig. 16. Integración gráfica para el período de velocidad decreciente para el proceso de secado de coco a 60°C y espesor de lecho 0.5 cm

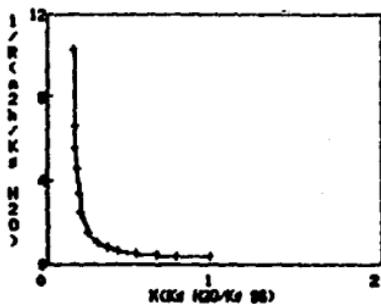


Fig. 17. Curva de secado de coco a 75°C y espesor de lecho 1.0 cm

$$f(x) = 2.78637848 - 2.45051699 t + 0.553954734 t^2$$

$$r^2 = 0.999382529$$

$$r = 0.999691217$$

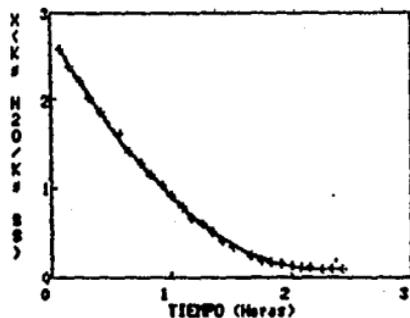


Fig. 18. Curva de velocidad de secado de coco a 75°C y espesor de lecho 1.0 cm

$$f(R) = -0.920427639 + 14.2747556 X - 17.7808742 X^2 + 9.9114392 X^3 - 1.89006575 X^4$$

$$r^2 = 0.954785393$$

$$r = 0.977131206$$

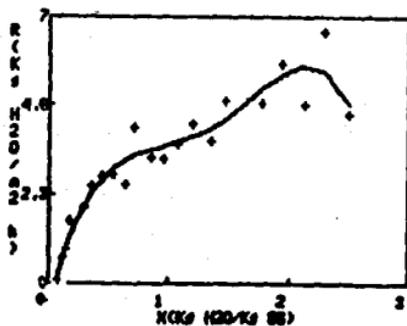


Fig. 19. Curva de secado de coco a 75°C y espesor de lecho 0.5 cm

$$f(x) = 2.73333642 - 4.65951133 x + 2.05231974 x^2$$

$$r^2 = 0.999230818$$

$$r = 0.999615335$$

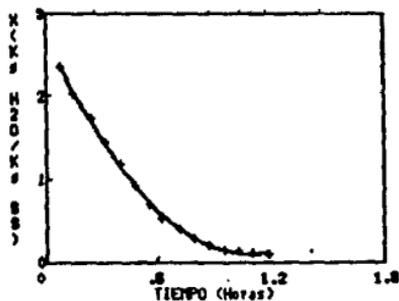


Fig. 20. Curva de velocidad de secado de coco a 75°C y espesor de lecho 0.5 cm

$$f(R) = -0.712476768 + 11.701033 x - 7.03279505 x^2 + 0.8146762 x^3 + 0.327327021 x^4$$

$$r^2 = 0.989250887$$

$$r = 0.994610923$$

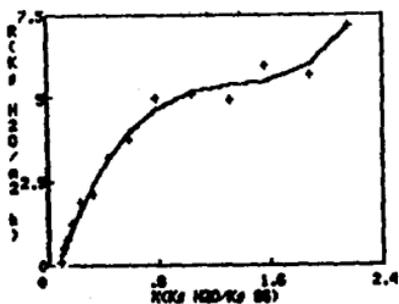


Fig. 21. Integración gráfica para el período de velocidad decreciente
para el proceso de secado de coco a 75°C y espesor de lecho 1.0 cm

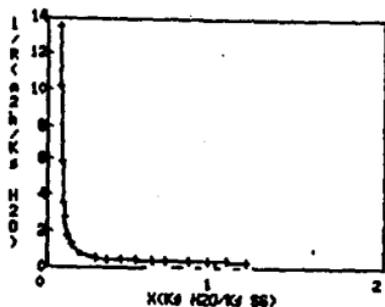


Fig. 22. Integración gráfica para el período de velocidad decreciente
para el proceso de secado de coco a 75°C y espesor de lecho 0.5 cm

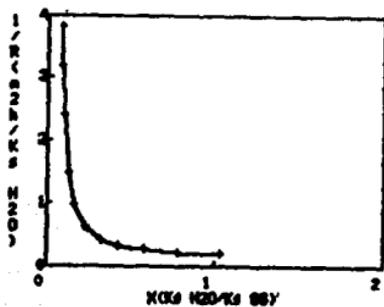


Fig. 23. Curva de secado de coco a 90°C y espesor de lecho 1.0 cm

$$f(x) = 3.32193494 - 3.53883654 t + 0.972633889 t^2$$

$$r^2 = 0.998566501$$

$$r = 0.999282994$$

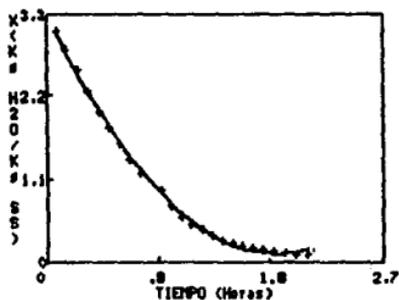


Fig. 24. Curva de velocidad de secado de coco a 90°C y espesor de lecho 1.0 cm

$$f(R) = 0.735274332 + 10.411675 X - 8.35959973 X^2 + 3.7627046 X^3 - 0.618560919 X^4$$

$$r^2 = 0.959356974$$

$$r = 0.979467699$$

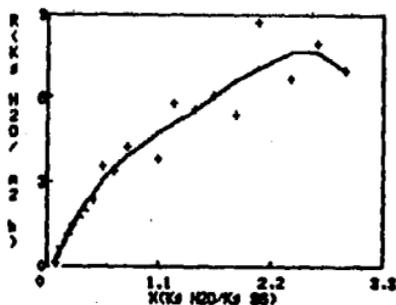


Fig. 25. Curva de secado de coco a 90°C y espesor de lecho 0.5 cm

$$f(x) = 2.24425002 - 5.73792508 x + 2.89162378 x^2$$

$$r^2 = 0.998049853$$

$$r = 0.999024451$$

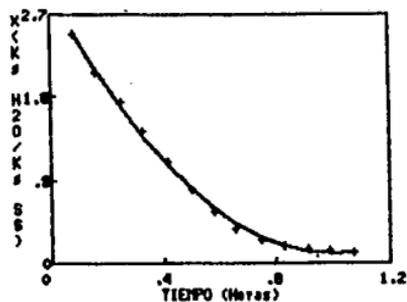


Fig. 26. Curva de velocidad de secado de coco

$$f(R) = 1.90379146 + 21.2316214 X - 18.26071 X^2 + 5.90764108 X^3 - 0.207521919 X^4$$

$$r^2 = 0.992994349$$

$$r = 0.996240106$$

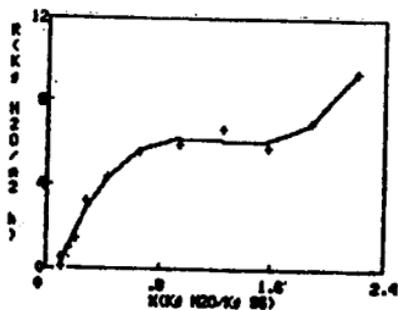


Fig. 27. Integración gráfica para el período de velocidad decreciente

para el proceso de secado de coco a 90°C y espesor de lecho 1.0 cm

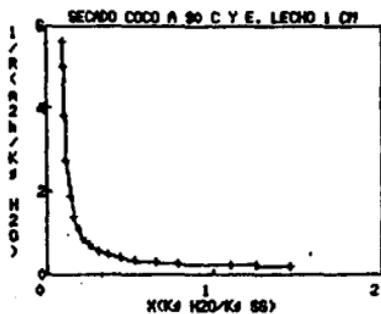


Fig. 28. Integración gráfica para el período de velocidad decreciente

para el proceso de secado de coco a 90°C y espesor de lecho 0.5 cm

