

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



OBTENCION DE METANOL Y ETANOL (MEZCLA)  
A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFE  
POR DESTILACION

TESIS  
PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR  
OSCAR ALBERTO MARTINEZ LOBOS

PREVIO A OBTAR AL TITULO DE INGENIERO QUIMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 1996

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

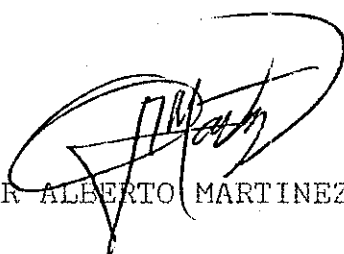
08  
T(3848)  
C.4

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con lo establecido por la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

OBTENCION DE METANOL Y ETANOL (MEZCLA)  
A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFE  
POR DESTILACION

Tema que me fuera asignado por la Dirección de  
la Escuela de Ingeniería Química

  
OSCAR ALBERTO MARTINEZ LOBOS

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck.
VOCAL 1o.	Ing. Miguel Angel Sánchez Guerra.
VOCAL 2o.	Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano.
VOCAL 3o.	Ing. Juan Adolfo Echeverría Méndez.
VOCAL 4o.	Br. Fernando Waldemar de León Contreras.
VOCAL 5o.	Br. Pedro Ignacio Escalante Pastor.
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López.

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio Ismael González Podszueck.
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz.
EXAMINADOR	Ing. Williams Alvarez
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom.
SECRETARIO	Ing. Francisco Javier González López

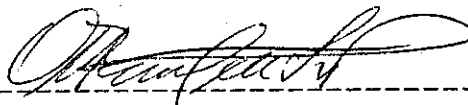
Guatemala, 17 de Septiembre de 1996

DR. ADOLFO GRAMAJO A.  
DIRECTOR DE ESCUELA DE ING. QUIMICA.  
FACULTAD DE INGENIERIA. U.S.A.C.

Estimado Sr. Director. después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he procedido a revisar el Informe Final de Tesis del Sr. OSCAR A. MARTINEZ L. de título: "OBTENCION DE METANOL Y ETANOL (MEZCLA) A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFE POR DESTILACION".

Una vez revisado este trabajo, lo he encontrado satisfactorio para su aprobación. Por tanto le pido que se proceda con los trámites subsiguientes al efecto.

Muy Atentamente:



---

Ing. Otto Raul de León de Paz.  
Asesor del Informe Final de Tesis.



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

Ref. WGAM.010.96

Guatemala, 02 de octubre de 1996

Doctor  
Adolfo N. Gramajo Antonio  
Director  
Escuela Ingeniería Química  
Presente.

Estimado Doctor Gramajo:

Por este medio me dirijo a usted para comunicarle que he revisado el informe final de tesis del estudiante OSCAR MARTINEZ LOBOS, quien realizó el trabajo titulado "OBTENCION DE METANOL Y ETANOL (MEZCLA) A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFE POR DESTILACION", el cual fue asesorado por el Ing. Otto Raúl de León de Paz.

Al respecto, me permito informarle que después de haber terminado la revisión del mencionado informe y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para ser aprobada por parte de la Escuela como trabajo de tesis, por lo cual se lo remito y lo pongo a su consideración.

Agradeciendo la atención a la presente, le saluda respetuosamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

M. en Ing. Williams G. Alvarez Mejia  
Profesor Titular IV  
Area de Operaciones Unitarias




**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante OSCAR ALBERTO MARTINEZ LOBOS, titulado: **OBTENCION DE METANOL Y ETANOL (MEZCLA) A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFE POR DESTILACION**, procede a la autorización del mismo.

  
Dr. Adolfo Gramajo

DIRECTOR  
DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 23 de octubre de 1,995.



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **OBTENCION DE METANOL Y ETANOL (MEZCLA) A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFE POR DESTILACION**, del estudiante **OSCAR ALBERTO MARTINEZ LOBOS**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Julio Ismael González Podszueck  
DECANO



Guatemala, 23 de octubre de 1,996

ACTO QUE DEDICO

A DIOS, POR QUE SIN EL NADA HABRIA PODIDO HACER

A MIS PADRES:                    Carlos H. Martínez Marroquin  
   Milvia N. Lobos de Martínez

A MIS HERMANOS Y HERMANAS

A MIS FAMILIARES

AGRADECIMIENTOS A:            Ing. Otto Raúl de León  
   Dr. Victor Quiroa



## ÍNDICE

Introducción .....	1
Justificación .....	2
Antecedentes .....	3
Objetivos generales y específicos .....	5
Hipótesis .....	6
CAPITULO I. Generalidades y Métodos Actuales .....	7
1.1 Generalidades .....	7
1.2 Procesos de obtención de metanol y etanol actuales .....	9
1.3 Industria cafetalera .....	13
1.3.1 Proceso cafetalero .....	13
1.3.2 Tratamiento que se da a los desechos .....	17
1.3.3 Lugares donde se expelen los desechos .....	18
CAPITULO II. Proceso de recuperación de metanol y etanol por Destilación del bagazo de café .....	20
2.1 Materia prima .....	20
2.1.1 Obtención de la materia prima .....	21
2.1.2 Estado de la materia prima .....	23
2.1.2.1 Estado físico .....	23
2.1.2.2 Composición .....	24
2.2 Recuperación de metanol y etanol por destilación .....	24
2.2.1 Propiedades del bagazo de café .....	24
2.2.2 Equipo que se va a utilizar .....	26
2.2.3 Destilación del bagazo .....	26
CAPITULO III. Resultados .....	31
CAPITULO IV. Discusión de resultados .....	43
4.1 Procedimiento .....	43
4.2 Análisis del rendimiento .....	44
4.3 Análisis de calidad .....	47
CONCLUSIONES .....	48
RECOMENDACIONES .....	49
APENDICE I. Muestra de cálculo .....	51
APENDICE II. Análisis de error .....	52
APENDICE III. Azeotropía alcohólica .....	58
BIBLIOGRAFIA .....	60

## LISTA DE TABLAS E ILUSTRACIONES

Fig. 1	Bosquejo de beneficio de café típico .....	16
Fig. 2	Grano de café .....	22
Fig. 3	Equipo .....	27

### CAPÍTULO III. RESULTADOS

#### Primera Destilación

Tabla No.1:	Tiempo de fermentación natural 2 meses .....	33
Tabla No.2;	Tiempo de fermentación natural 3 meses .....	33
Tabla No.3:	Tiempo de fermentación natural 4 meses .....	34
Tabla No.4:	Tiempo de fermentación natural 5 meses .....	34
Gráfica No.1,	Destilado vrs. meses de fermentación nat. ....	35
Gráfica No.2,	% de Metanol en destilados .....	35
Gráfica No.3,	% de Etanol en destilados .....	36
Gráfica No.4,	% de Agua en destilados .....	36

#### Segunda Destilación

Tabla No.1,	Tiempo de fermentación natural 2 meses .....	37
Tabla No.2,	Tiempo de fermentación natural 3 meses .....	37
Tabla No.3,	Tiempo de fermentación natural 4 meses .....	38
Tabla No.4,	Tiempo de fermentación natural 5 meses .....	38
Gráfica No.1,	Destilado vrs. meses de fermentación nat. ....	39
Gráfica No.2,	% de metanol en destilados .....	39
Gráfica No.3,	% de etanol en destilados .....	40
Gráfica No.4,	% de agua en destilados .....	40
Tabla No.1	Tercera destilación .....	41
Gráfica No.5,	% de los alcoholes por etapa de destilación .	42

### APÉNDICE II

#### Primera Destilación

Gráfica No.1,	Diagrama de control; tiempo 2 meses .....	54
Gráfica No.2,	Diagrama de control; tiempo 3 meses .....	54
Gráfica No.3,	Diagrama de control; tiempo 4 meses .....	55
Gráfica No.4,	Diagrama de control; tiempo 5 meses .....	55

#### Segunda Destilación

Gráfica No.1,	Diagrama de control; tiempo 2 meses .....	56
Gráfica No.2,	Diagrama de control; tiempo 3 meses .....	56
Gráfica No.3,	Diagrama de control; tiempo 4 meses .....	57
Gráfica No.4,	Diagrama de control; tiempo 5 meses .....	57

## GLOSARIO

**ALQUENOS:** compuesto orgánico insaturado de doble enlace carbono-carbono, también llamados olefinas.

**AZEOTROPO:** mezcla líquida que tiene un máximo o un mínimo en los puntos de ebullición, con relación a los puntos de ebullición de las composiciones de las mezclas a su alrededor. En este punto, la fracción molar de los componentes presentes, en la fase líquida, es igual a la del vapor.

**AZEOTROPO DE PUNTO MÍNIMO DE EBULLICIÓN:** azeótropo que posee un punto mínimo de ebullición.

**AZEOTROPO DE PUNTO MÁXIMO DE EBULLICIÓN:** azeótropo que posee un punto máximo de ebullición.

**AZÚCARES NO REDUCTORES:** carbohidrato que no puede ser oxidado, (se encuentra en su forma acetal o cetal), la reacción no ocurre debido a la inherente estabilidad y no reactividad de los acetales y cetales.

**AZÚCARES REDUCTORES:** carbohidratos cuyo grupo carbonilo (-C-) puede ser oxidado.

**BACTERIAS:** microorganismos unicelulares, clasificados en el reino Monera. Se presentan en el microscopio aisladas o forman una colonia en la cual son fisiológicamente independientes. Pueden generar reacciones.

**BENEFICIO DE CAFÉ:** lugar donde se procesa el fruto de café para obtenerlo como producto comercial.

**CAFÉ ORO:** fruto vegetal, específicamente, el grano sin su envoltura.

**CAFÉ UVA:** fruto vegetal, tal y como se encuentra en la

naturaleza.

CASCABILLO: también es llamado pajilla o endocarpio y es parte del café pergamino.

CATALIZADOR: sustancia que altera la velocidad de una reacción sin ser consumida, generalmente para acelerar la reacción pero también existen catalizadores que la retrasan.

CELOLOSA: sustancia sólida que se halla en la cubierta de las células vegetales. Poliacárido compuesto sólo por unidades D-glucosa. La mayoría de las plantas la contienen en un porcentaje relativamente alto, en general varía de 10 a 15%.

DESTILACIÓN: la operación unitaria de destilación es un método que se usa para separar los componentes de una solución líquida. Ambos componentes están presentes en ambas fases. La fase vapor se origina de la fase líquida por vaporización al punto de ebullición.

ETANOL: llamado también alcohol etílico,  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ; alcohol primario que se emplea en las bebidas alcohólicas.

FERMENTACIÓN: degradación de los hidratos del carbono, la cual puede ser catalizada.

GAS NATURAL: llamado metano; es el principal constituyente hidrocarbonado del gas de los pantanos formado por la descomposición anaeróbica de las plantas. Se observa primordialmente en los depósitos petrolíferos o en ellos; también se presenta en minas de carbón, donde se conoce como gas grisú o fuego húmedo, ya que explota fácilmente.

METANOL: alcohol primario más simple,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ; se prepara generalmente a partir de compuestos inorgánicos; es sumamente venenoso.

**MUCÍLAGO:** sustancia viscosa que se halla en algunos vegetales y se obtiene disolviendo en agua sustancias gomosas. Forma parte de la pulpa del café; posee la mayor cantidad de azúcares del bagazo.

**PERGAMINO:** llamado Café Pergamino, lo comprende el cascabillo, espermodermo y el café oro.

**PULPA:** envoltura superior del fruto de café, que está comprendido por el Epicarpio (cáscara o pellejo) y Mesocarpio (azúcares y mucilagos).

## INTRODUCCIÓN

1

Una de las áreas de la Ingeniería Química es la Investigación. El trabajo de esta tesis cae dentro de esta rama y se propone obtener Metanol y Etanol (mezcla), por métodos y fuentes no convencionales.

El objetivo principal es caracterizar una materia prima como fuente productiva, a través de la experimentación y el análisis correspondiente, e incrementar la industria del reciclaje en Guatemala, pues se utilizará un desecho como materia prima.

El metanol y etanol son alcoholes utilizados en muchas industrias del país y los procesos por medio de los cuales se obtienen, varían y son muy conocidos. Por ser compuestos tan útiles, la investigación de nuevos procedimientos y fuentes de obtención son importantes, no sólo por el carácter científico, sino por la importancia en la economía global del país.

La industria actual del reciclaje se ve fortalecida por un estudio de esta clase, pues se viene a incrementar la utilización de los residuos considerados inutilizables en algunas industrias, para obtener un producto de importancia industrial.

El Metanol o alcohol metílico, como también es llamado, se encuentra entre las primeras doce materias primas químicas básicas de uso comercial hoy en día (Ref. V). Es producido a través de procesos químicos bien establecidos y es usado como solvente e intermediario químico para la producción de un gran número de productos químicos con aplicaciones diversas en la industria. Mientras que más del 80% del abastecimiento de metanol mundial está basado en el proceso de "gas natural" (Ref. VII pp 3), éste puede ser y de hecho es producido por otras fuentes, como residuo de petróleo y carbón.

En el pasado, el metanol fue obtenido en cantidades limitadas a través de la destilación de la madera (de aquí su nombre de alcohol de madera), donde se ha determinado su presencia que varía según el tipo de madera; con el término de madera se quiere dar a entender, no sólo la que se obtiene de los árboles para hacer de ella bienes, sino en sentido general, en donde se puede encontrar celulosa, y aquí puede incluirse al café (cascabillo y pulpa).

A principios de los años setenta, varias investigaciones han alterado significativamente las expectativas del metanol. Su tradicional mercado ha sido rejuvenecido por nuevas aplicaciones químicas, como una nueva materia prima para el ácido acético, y para el MTBE (methyl tertiary butyl ether) con alto octanaje de gasolina aditiva (Ref. VII pp 1)



4

Ciertas investigaciones fueron motivadas por el crecimiento que concierne a la necesidad de desarrollar alternativas de combustible y de la calidad del aire, respecto a lo cual, el metanol posee ciertas ventajas. Esta aplicación, sin embargo, está limitada en proporción al presente y futuro consumo de petróleo, y significativamente incrementará los requerimientos del metanol, en relación con las aplicaciones químicas de éste actualmente.

Mientras la producción de metanol a través de la destilación de madera fue emprendida en el pasado, se están haciendo nuevas investigaciones sobre el potencial de producción de alcoholes (metanol y etanol) a partir de la celulosa.

El Etanol o alcohol etílico es un producto obtenido por fermentación de azúcares. Las materias primas convencionales para la obtención de etanol son materias naturales como: frutas, granos, etc. que contienen azúcar, almidón y celulosa (fibra leñosa), que pueden convertirse fácilmente en azúcar fermentable. El alcohol empleado en bebidas procede de la destilación de vinos defectuosos, de los residuos de la fabricación del vino, del maíz, centeno, cebada y melazas; también para bebidas se obtiene el alcohol del zumo fermentable de frutas, como melocotones, manzanas, etc.

## OBJETIVOS

5

### OBJETIVOS GENERALES

1. Promover la industria del reciclaje en el sector industrial cafetalero del país.
2. Obtener metanol y etanol de otras fuentes que no sean las tradicionales.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Utilizar el bagazo de café de los beneficios, como materia prima para obtener metanol y etanol.
2. Obtener metanol y etanol del bagazo de café por Destilación.

## HIPÓTESIS

6

ES POSIBLE LA OBTENCIÓN DE METANOL Y ETANOL A PARTIR DEL BAGAZO DE CAFÉ POR DESTILACIÓN.

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES Y MÉTODOS ACTUALES**

El presente capítulo expone algunos de los métodos actuales de obtención de Alcohol Etilico y Metilico que se llevan a cabo en la industria; a la vez se hará la descripción del proceso de fabricación de café en los beneficios típicos, con el fin de tener una visión más clara del tipo de desecho que se está generando, del porqué de algunas de las propiedades del bagazo de café (1), y la predicción de posibles efectos y resultados.

#### **1.2 GENERALIDADES:**

El metanol es sumamente venenoso. Produce ceguera y la muerte si se ingiere o se deja en contacto prolongado con la piel. Asimismo aspirar sus vapores también es dañino.

Medicinalmente, se clasifica al alcohol etílico como hipnótico (que produce sueño); es menos tóxico que otros alcoholes. Debido a su posición exclusiva como bebida gravada fuertemente con impuestos y como reactivo industrial, el alcohol etílico plantea un problema especial: debe estar al alcance de la industria en una forma que no se pueda beber. Este problema se resuelve, agregándole un

desnaturalizante o sea, una substancia que le confiere muy <sup>8</sup>  
mal sabor o, incluso, elevada toxicidad. Por ejemplo, uno o  
dos de los, aproximadamente ochenta desnaturalizantes  
legales, son el metanol y la gasolina de alto octanaje (Ref.  
VII pp 2).

El alcohol etílico es el alcohol de las bebidas  
<<alcohólicas>>. Para este propósito, se le prepara por  
fermentación de azúcar, contenido en una variedad  
verdaderamente sorprendente de fuentes vegetales. La bebida  
específica que se obtenga depende de lo que se fermente  
(centeno o maíz, uvas o saúco, pulpa de cacto o diente de  
león), cómo se fermente (acaso se deje escapar el dióxido de  
carbono, o se embotelle, por ejemplo), y qué se haga después  
de la fermentación (si acaso se destila o no). El sabor  
especial de bebida no es debido al alcohol etílico, sino a  
otras substancias, que son características de la fuente  
específica o que se adicionen deliberadamente.

Excepto para bebidas alcohólicas, prácticamente todo el  
alcohol etílico que se consume es una mezcla de 95% de  
alcohol y 5% de agua, la que se conoce simplemente como  
alcohol de 95% (Ref. III pp 514).

Cualquiera que sea su método de preparación, primero se  
obtiene alcohol etílico mezclado con agua, y luego se  
concentra esta mezcla por destilación fraccionada. Pero  
sucede que el componente de punto de ebullición más bajo no  
es el alcohol etílico (p.e. 78.3°), sino un azeótropo  
binario que contiene 95% de alcohol y 5% de agua (78.15°).

9  
Por ser azeótropo, el vapor y el líquido obtenidos tienen la misma composición, por lo que no puede ser concentrado más por destilación, cualquiera que sea la eficiencia de la columna de fraccionamiento que se emplee.

Para ciertos propósitos especiales, aún debe ser eliminada la ligera traza de agua que se encuentra en el alcohol absoluto comercial, lo que puede lograrse por un tratamiento del alcohol con magnesio metálico: el agua se convierte en  $Mg(OH)_2$  insoluble, del cual se destila luego el alcohol, ó bien destilación azeotrópica, método más complejo y difícil (Ref. III pp 515).

## 1.2 Procesos de obtención de metanol y etanol actuales.

Los métodos actuales de obtención de Metanol y Etanol (Alcohol Metílico y Etilico) son muy variados y cada uno tiene su diferente materia prima y procesamiento, sin embargo, ciertas materias primas y compuestos o materiales que se utilizan en su obtención, traen desventajas no sólo económicas, sino también en el aspecto ambiental.

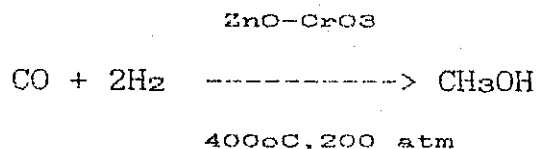
Entre los procesos que se pueden mencionar, específicamente el tipo o nombre de la reacción que se lleva a cabo para operación, se tienen:

### METANOL (Alcohol Metílico):

#### 1. Hidrogenación del monóxido de carbono.

El metanol  $CH_3OH$  se prepara generalmente a partir de compuestos inorgánicos. La hidrogenación del monóxido de

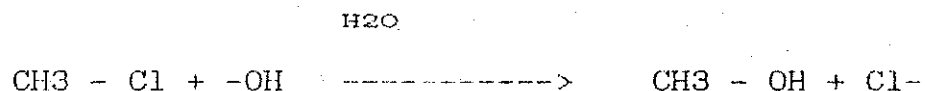
carbono puede llevarse a cabo en presencia de un catalizador<sup>10</sup>  
metálico a alta temperatura y presión:



El rendimiento de metanol por este proceso es excelente.  
(Ref. V pp 485).

## 2. Hidrólisis de haluros metílicos (Clorometano):

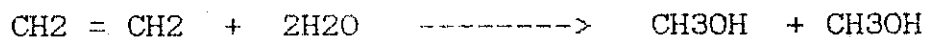
La reacción entre el haluro (Cl, I, Br) de metilo y el ión hidroxido, se produce por sustitución del -OH por I-, a través del mecanismo de sustitución nucleofílico alifática.



(Ref. V pp 422).

## 3. Cracking oxidativo de etano.

En la primera etapa, se trata de formar un gliol (alcohol que posee 2 elementos -OH vecinos), debido a su inestabilidad y al calor en el que se lleva a cabo el proceso, se rompe el enlace simple formando 2 moléculas de metanol.

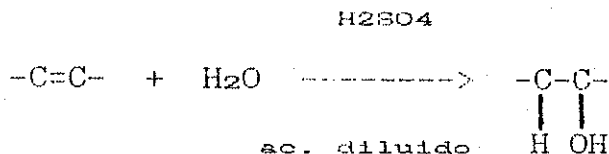


(Ref. V pp 378).

## ETANOL (alcohol etílico).

### 1. Hidratación de alquenos.

El agua se adiciona a los alquenos más reactivos, en presencia de ácidos, para dar alcoholes. La hidratación de alquenos es la principal fuente industrial para aquellos alcoholes más simples, cuya formación es consecuente con la regla de Markovnikov.



(Ref. V pp 336)

## 2. Oximercuración-desmercuración.

En presencia de agua, los alquenos reaccionan con acetato mercúrico para dar compuestos hidroximercurícos, los que dan alcoholes por reducción.



La primera etapa, la oximercuración, implica la adición de -OH y -HgOAc al doble enlace carbono-carbono. Luego, en la desmercuración, se reemplaza -HgOAc por -H. La secuencia de la reacción se reduce a la hidratación del alqueno, pero es de aplicación mucho más amplia que la hidratación directa.

El proceso en dos etapas de la oximercuración-desmercuración es rápido y conveniente, se realiza en condiciones suaves y da rendimientos excelentes, a menudo en más del 90%.

(Ref. III pp 515)

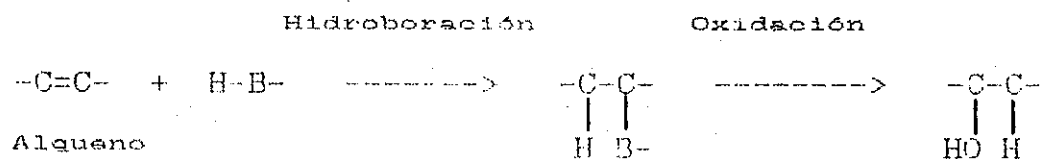
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 BIBLIOTECA CENTRAL



### 3. Hidroboración-Oxidación.

Con el reactivo diborano  $(BH_3)_2$ , los alquenos dan alquilboranos,  $R_3B$ , los que por oxidación dan alcoholes. El procedimiento es simple y práctico; los rendimientos son sumamente elevados y los productos son difíciles de obtener de alquenos en cualquier otra forma.

La hidroboración comprende la adición, al doble enlace, de  $BH_3$  (o en etapas posteriores,  $BH_2R$  y  $BHR_2$ ), en la que se une hidrógeno a uno de los carbonos de la unión doble y boro al otro. Luego, el alquilborano puede oxidarse, proceso en el que el boro es reemplazado por  $-OH$ .



[Donde:  $H-B- = H-BH_2, H-BHR, H-BR_2$ ]

Así, el proceso en dos etapas de la hidroboración-oxidación permite, en efecto, la adición de los elementos  $H-OH$  al doble enlace carbono-carbono.

(Ref. IV pp 516)

### 4. Por Fermentación de cerezas y mucílago de café.

Este es un procedimiento bastante nuevo y el cual no se le ha explotado como se esperaba.

Los frutos de café son cortados a mano; una porción de los frutos es comprimida ligeramente para romper la cáscara y permitir la penetración de un inóculo. En estos experimentos, se emplean cepas de levaduras, cepas de

13

bacterias pectinolíticas, y una cepa de bacterias capaces de producir etanol (Zymomonas). El inóculo se prepara en frascos de agitación provistos con tabiques conteniendo un medio estéril en cada frasco. Las cepas se mantienen en tubos de agar, y para inocular los frascos descritos, se llena el contenido de un tubo con medio estéril, para cada frasco. Luego cada frasco es incubado a 28 °C y 300 RPM durante 24 horas.

Pueden esperarse niveles de etanol de alrededor de 2.0 a 2.5% en 48 h mediante bioconversiones a 28°C. Este período tiene la misma duración que la fermentación no controlada tradicional empleada para la remoción del mucílago.

Las Mejores cepas para la producción de etanol a partir del fruto de café y del grano despulpado fueron tres de *Saccharomyces cerevisiae* (ICAITI 1-150, ICAITI L-168 e ICAITI L-180). (Ref.VI pp 129 a 136)

### 1.3 Industria cafetalera.

La descripción de todos los aspectos relacionados con esta industria, ayudará a explicar ciertas propiedades y condiciones que se encuentran en el bagazo de café.

#### 1.3.1 Proceso cafetalero.

Para entender cómo funciona el beneficio de café, se tiene que conocer la estructura de un grano de café, según la ilustración de la figura 1.

Estructura del Café Uva. La uva tiene aproximadamente 3/8 de

14  
pulgada de diámetro y media pulgada de largo. Dentro de ella hay dos semillas, los granos de café ("oro"), que son llanos por un lado y redondeados por el otro. Los granos están cada uno dentro de una cáscara con apariencia de pergamino, rodeada a su vez por una sustancia gelatinosa llamada mucílago. Todo eso está encerrado en la cáscara más gruesa de la fruta (pulpa).

El proceso de beneficiado consiste en quitar la cáscara exterior gruesa ("despulsar"), fermentar los granos para que se suelte el mucílago ("fermentación"), quitar el mucílago del grano ("lavado") y secar los granos al sol en los patios ("secado"). Se refiere a la fruta aún con pulpa como "uva" o cereza, a los granos con la cáscara exterior quitada como "pergamino", y a la cáscara exterior como "pulpa".

Despulsado. El principio del proceso para despulsar puede ser ilustrado apretando una uva por un extremo con dos dedos. La presión rompe el otro extremo de la uva y las dos semillas saltan.

Para llevar a cabo esta operación, se usan pulperos; dentro del pulpero se encuentra un tambor con protuberancias perforadas en él, rotando contra un pechero. Las uvas se alimentan al pulpero desde arriba y son dirigidas por las protuberancias en el tambor hacia los canales en el pechero hasta que por medio de presión, sueltan los granos. Los granos resbaladizos salen por las aperturas de escape mientras que la pulpa es arrastrada hacia la parte posterior de la máquina por las protuberancias. La pulpa es arrastrada

por agua hacia una área de desperdicios, mientras que el <sup>15</sup>  
café pergamino pasa a través de un separador.

La función del separador es aislar el café pergamino ya sin cáscara, de las uvas cuya cáscara (pulpa) no se ha separado totalmente. Estas uvas imperfectas van del separador a un repasador, que es un pequeño pulpero. El café pergamino cae del separador y es llevado por agua a los tanques de fermento. La pulpa procedente del repasador se dirige al área de desperdicios.

Fermentación. El proceso de fermentación consiste en colocar el café pergamino en tanques de hormigón, de los que se ha vaciado el agua. La fermentación convierte el mucílago exterior de los granos en una masa gelatinosa que es fácil de quitar, lo que puede tomar de 8 a 20 horas, y depende de la temperatura.

El proceso de fermentación requiere gran cuidado para evitar que afecte el sabor del café. Si los granos se fermentan demasiado tiempo, puede agriarse su sabor. Si no están completamente fermentados cuando se lavan, entonces puede quedarse algún mucílago en los granos, y se reduce la calidad de éstos.

Lavado. El lavado consiste en mover agitadamente el café pergamino haciendo pasar una corriente de agua sobre él para que se lleve el mucílago desprendido en el proceso de fermentación. Esto se obtiene haciendo rotar los granos a través de una bomba centrífuga.

Un tanque de fermento que contiene granos fermentados se

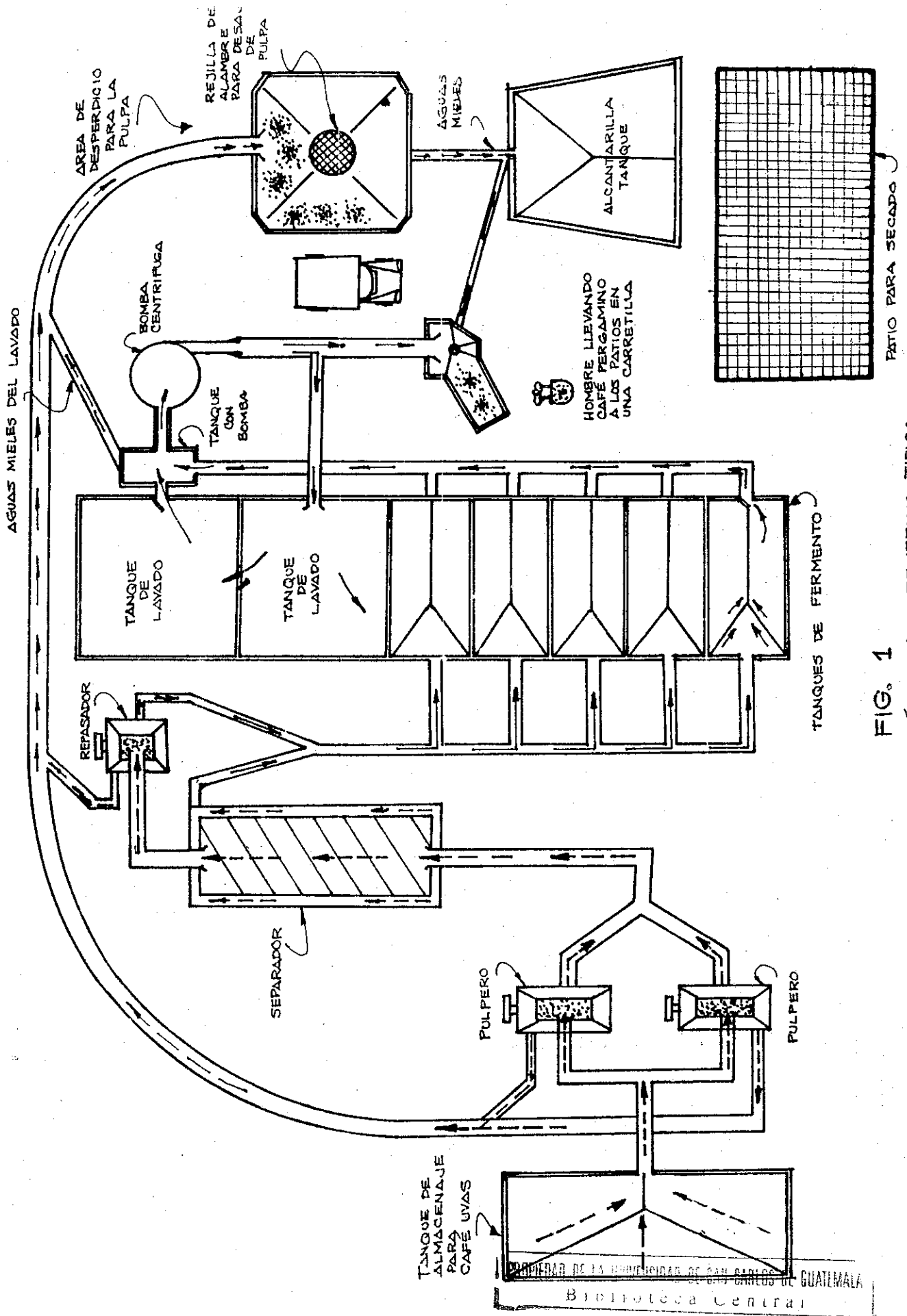


FIG. 1

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL BENEFICIO TÍPICO.

17  
llena de agua limpia y el contenido de dicho tanque se vacía en un canal que lo conducirá a un tanque pequeño que tiene una bomba. La bomba los elevaba a otro tanque para dar cabida al contenido de un tanque de fermento. Cuando todo el café pergamino está en el tanque de lavado, se cambia el agua y el contenido se echa nuevamente a través del tanque con bomba y bombeado, a un segundo tanque de lavado del mismo tamaño. Después de cambiarse el agua, se conducen hacia el área del patio de secado, desde donde los trabajadores los llevan a un patio vacío para secarse. Secado. Para el secado se esparcen los granos al sol, en un patio de ladrillos. Los trabajadores mueven constantemente los granos con rastrillos, para que la luz solar pueda llegar a todos (Ref.VI pp 1-10).

#### 1.3.2. Tratamiento que se les da a los desechos

Desde hace mucho tiempo y tal vez con mayor énfasis después de 1940, en Centro América, particularmente, surgió el interés por iniciar estudios con relación al tratamiento de los desechos sólidos y líquidos del beneficiado del café. El desecho principal en el beneficio húmedo del café es la pulpa, las aguas de despulpado y el arrastre de la pulpa, las aguas de recirculación (si las hubiere) y las de lavado del café fermentado. La pulpa es el más voluminoso y fuerte contaminante del proceso, representa el 40% en peso de la fruta, sin embargo, es fácilmente recuperada por diferentes diseños de "parrillas" o "trampas" que separan el agua de

arrastre y dejan la pulpa en seco; sin embargo, las aguas de la bomba de lavar café fermentado arrastran la principal proporción de mucílago suelto, y por lo tanto son las más contaminadas. 18

El problema principal en cualquier beneficio es el tratamiento de las aguas de desecho, ya que supone el estudio y experimentación locales para su solución.

Tanto los volúmenes de agua que se emplean, como la demanda química de oxígeno, varían gradualmente y dependen de las condiciones de beneficiado, y de las condiciones climáticas, ya que en zonas donde la cosecha se efectúa en plena época seca y a veces en regiones con escasez de agua, lo cual obliga a la recirculación de las mismas; también se ensayan técnicas como: digestión aeróbica y anaeróbica, filtro biológico, sedimentación con piedra caliza y tratamiento con jacintos acuáticos (Ref.VI pp 12).

### 1.3.3. Lugares donde se expelen los desechos.

De lo mencionado anteriormente, el bagazo de café que lo compone en su mayoría la pulpa, no sufre ningún tratamiento en su salida del beneficio, que pueda modificar sus características naturales, es decir, que no es tratado químicamente.

Los desechos líquidos son directamente conducidos a los ríos, lagunas o lagos, mientras que los desechos sólidos (bagazo), una mínima parte es arrastrada por los mismos desechos líquidos, y la mayor parte es depositada en

cuencas, barrancos, y lugares deshabitados.

Bajo la presencia de las autoridades sanitarias existe la obligación de eliminar o reducir el problema de contaminación; para eso se han tomado medidas inmediatas que consisten en separar la pulpa y luego construir pozos y fosas de absorción para acumular los desechos fluidos.



## CAPÍTULO II

### PROCESO DE RECUPERACIÓN DE METANOL Y ETANOL POR DESTILACIÓN DEL BAGAZO DE CAFÉ

En este capítulo, se describirá el proceso de destilación por medio del cual se obtendrá Metanol y Etanol (mezcla), así como otros aspectos importantes tales como las condiciones de la materia prima, que de una u otra manera afectan dicho proceso; también se especificará el equipo utilizado en las prácticas de laboratorio y sus respectivas condiciones.

#### 2.1 Materia prima

En esta sección, se describirán las características del bagazo de café tal y como es encontrado para su utilización en este nuevo proceso.

La materia prima en sí es "el bagazo de café", el cual es desechado como "basura" de los beneficios, sin embargo, no todos los beneficios tienen un procedimiento igual, tanto para la obtención del propio grano de café como para la eliminación de estos desechos; sin embargo, todos llevan,

con algunas variaciones, el mismo proceso que se describió <sup>21</sup>  
en el Capítulo I.

Se entiende por "bagazo de café", al desecho total expelido por el Beneficio, el cual consiste del cascabillo, pulpa y el pergamino ver figura No. 2 (sig. pág.) del grano inicial; para eliminarlos, sufren ciertos procesos, donde cambian no solo sus características físicas, sino también su actividad microbiológica.

En el caso de la pulpa, ésta es eliminada por medio de pulperos, pero luego es arrastrada por agua hacia el área de desecho; en este proceso absorbe cierta cantidad de agua que permite el mecanismo de fermentación.

Por otra parte, el pergamino formado en parte por el mucílago, éste es fermentado, para poder separarlo, y a los demás componentes del "grano oro".

#### 2.1.1 Obtención de la materia prima.

El bagazo de café con el que se trabajará pertenece a la región del departamento de Sacatepequez, específicamente de Antigua Guatemala. El desecho (bagazo) es similar en todos los Beneficios, independientemente de la región donde se encuentre a temperatura cercanas. Su condición es independiente de la presión, sin embargo, no de la temperatura, pues el proceso de fermentación, aunque se lleva a cabo en compartimientos (en el Beneficio) a la misma temperatura en todos los Beneficios, la

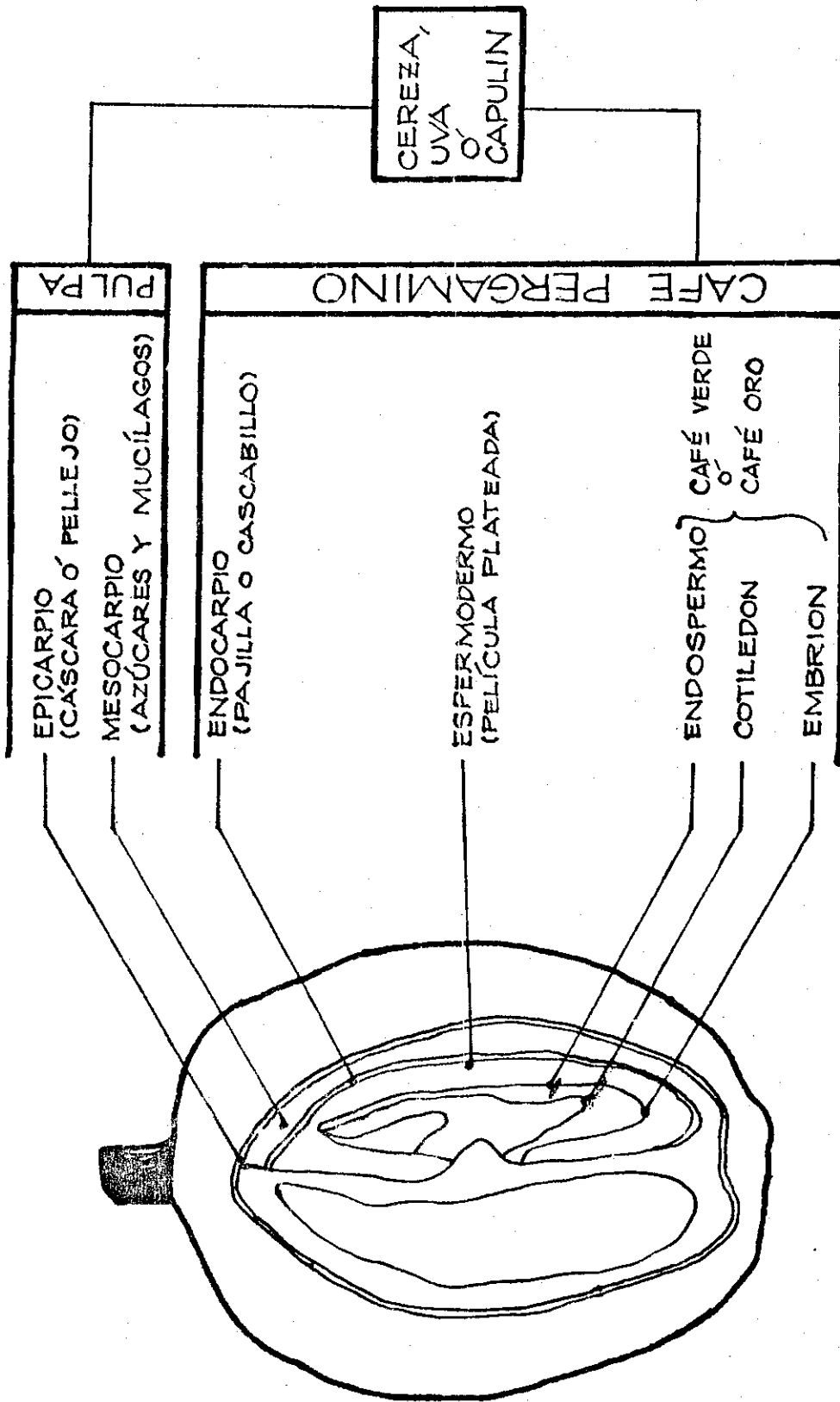


FIG. 2  
GRANO DE CAFÉ

La humedad propia de la pulpa es bastante <sup>24</sup> alta, igual a 62% (Ref. I pp 102) de su peso, más la debida a los procesos de lavado y arrastre con agua que ha sufrido, además, no hay que olvidar que están a la intemperie, por lo que la lluvia, el viento y la humedad del ambiente influyen sobre este porcentaje.

#### 2.1.2.2 Composición

La determinación de la composición se hizo a través de refractometría, la cual identificó los siguientes elementos: agua, metanol, etanol, estirenos, y celulosa (el orden en que se mencionan no corresponde a su proporción ni en peso ni en volumen de las muestras analizadas).

### 2.2 Recuperación de metanol y etanol del bagazo de café por destilación.

En esta sección, se describirán los procedimientos, equipos y condiciones de las muestras usadas para realizar la práctica experimental.

#### 2.2.1 Propiedades del bagazo de café.

Descripción de las propiedades más importantes que afectan el proceso de destilación.

La variable más importante, que afecta el rendimiento de la destilación, es el tiempo que ha estado acumulado el desecho, por lo tanto, influye

en el grado de degradación. Los componentes de la <sup>25</sup>  
 pulpa de café son, según el análisis de Van Soest  
 (Ref. VI pp 102 a 103):

Componente:	Fracción (%) en peso
Contenido Celular	60.20
Fibra detergente neutro	37.40
Fibra ácido detergente	34.80
Hemicelulosa	2.80
Celulosa	18.30
Lignina	18.21

Composición química del mucílago del café.

Sustancia:	Fracción (%) peso
Materias pécticas totales	33
Azúcares reductores	30
Azúcares no reductores	20
Celulosa	17

Composición del grano de café:

Producto:	Fracción (%) peso
Fruto del café	100
Pulpa de café	40
Mucílago del café	22
Cascarilla o pergamino	18
Café oro o grano sin sus envolturas	20

Debido a que la fermentación produce, en esta clase de <sup>26</sup> desechos, las cantidades de Etanol debido al proceso microbiológico, conforme avanza el tiempo, se espera un mayor porcentaje de etanol en la recuperación.

### 2.2.3 Equipo que se va a utilizar

El equipo que se utilizará para realizar la destilación del bagazo de café, consiste principalmente en la cristalería:

Matraces de tres bocas (también de 2 c de una boca),

Termómetros de 110 °C,

Condensadores (refrigerantes),

Mecheros,

Varillas de agitación,

Soportes,

Anillos,

Rejilla de de asbesto

Tubos de ensayo,

Probetas,

Balanzas,

Refractómetro.

Ver figura 3 en la siguiente página.

### 2.2.3 Destilación del bagazo.

Se sabe que de la celulosa de las maderas se

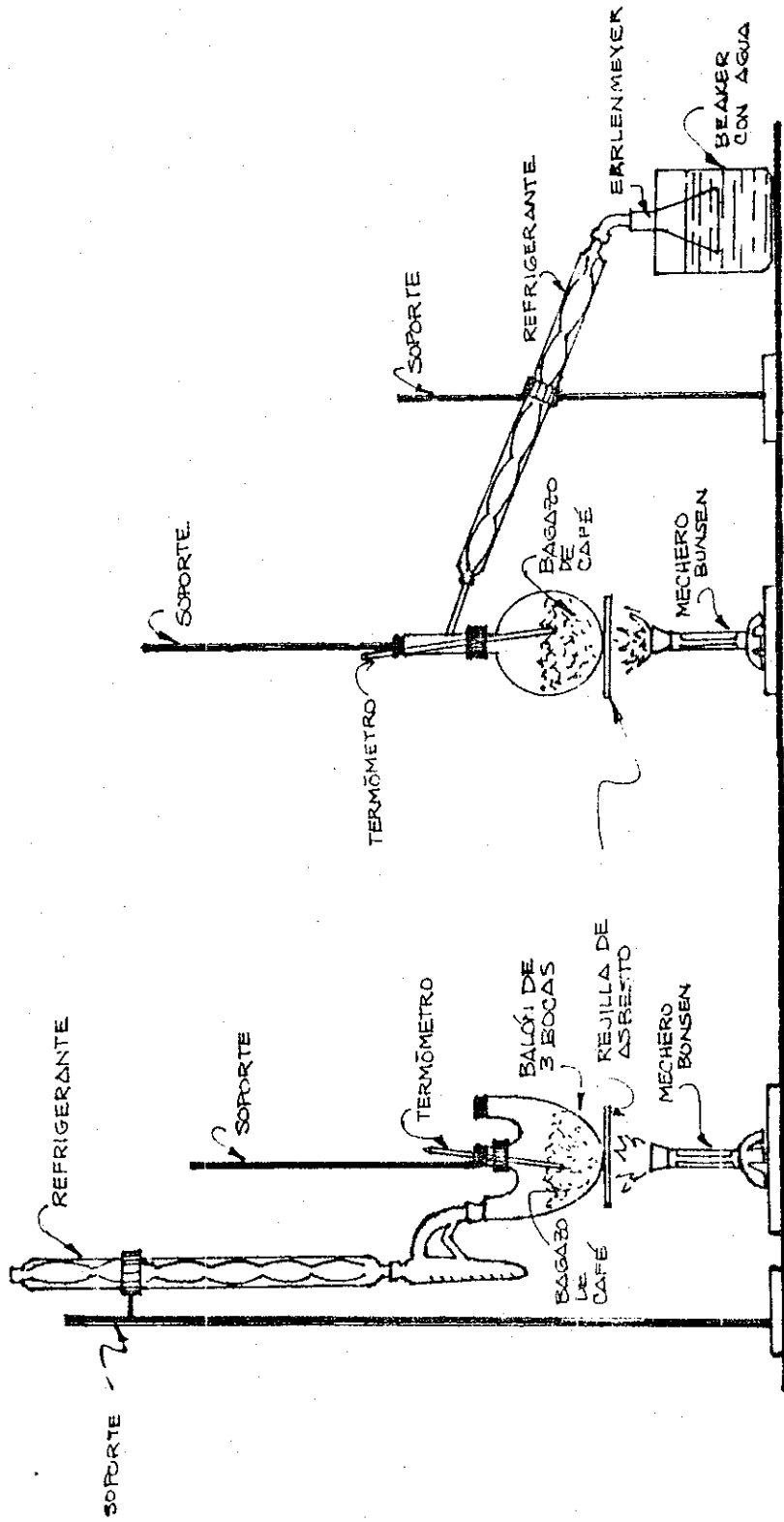


FIG. 3  
EQUIPO DE LABORATORIO

28  
puede extraer alcohol metílico en porcentajes altos, a través de la destilación de la madera (procedimiento muy conocido y practicado desde mucho tiempo); pero también es posible la obtención de etanol, aunque en porcentajes muy bajos (ref. VII pp 1).

De toda los tipos de maderas, concepto que incluye a todas las especies que contienen celulosa en sus estructuras, es posible la recuperación de metanol (y pequeño porcentaje de etanol), a través de la destilación de este compuesto, sin embargo, algunas tienen un alto contenido de celulosa en relación con otros, lo que permite un rendimiento de recuperación mayor.

El bagazo de café compuesto por cascabillo (ó pergamino), mucílago y pulpa, suman en total un porcentaje de celulosa, igual a un 15% (Ref. I pp 102) aproximadamente del grano de café (uva).

De aquí que es posible utilizar el mismo procedimiento sobre otras maderas en este compuesto para obtener los alcoholes; se debe recordar que el porcentaje de etanol será mayor que lo esperado (de la celulosa), debido a la fermentación del mismo bagazo.

La destilación que se realizará, en realidad, será una serie de destilaciones con el fin de extraer estos alcoholes (mezcla) lo más limpio de



impurezas. El procedimiento empleado es <sup>29</sup> el  
siguiente:

- a. Pesar 400 gr. de bagazo de café y colccarlo en el interior del matraz.
- b. Armar el equipo (soportes, anillo, matraz, termómetro, etc.), como se muestra en la figura 2.2
- c. Calentar el matraz y mantener el bagazo a una temperatura entre 84-97 oC.
- d. Dejar calentar a esta temperatura durante un tiempo de 4.5 hrs. (observar la formación y condensación de vapor).
- e. Analizar el destilado y determinar los compuestos presentes (por cromatografía o por refractometría).
- f. Tomar el destilado y volverlo a destilar a una temperatura de 85-87 oC, por 3.5 hrs. aproximadamente.
- g. Analizar el producto final con los procedimientos mencionados en el inciso e.
- h. Repetir el paso f y g con el nuevo producto destilado a un rango de temperata de 80-82 por un tiempo aproximado de 3 hrs.

Para determinar la cantidad de bagazo de café que se va a utilizar en cada destilado y las temperaturas de las mismas, se realizaron pruebas preliminares, en las

cuales se determinó que, con una masa de 400 gr <sup>30</sup> se  
obtiene un destilado considerable para realizar las  
tres etapas de destilación. Si se trabaja con  
temperaturas cercanas a los puntos de ebullición de  
cualquier alcohol, es muy difícil obtener el destilado  
en el tiempo establecido, pero si se hace a  
temperaturas superiores, se obtiene una mezcla  
considerable de agua-etanol-metanol, aunque a mayor  
temperatura, más impurezas habrá en el destilado  
(estirenos en su mayoría).

Los productos del destilado obtenido fueron: etanol,  
metanol, agua y estirenos.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio.

Se tomaron 20 muestras de 400 gr. de bagazo de café con las cuales se realizó el proceso de la primera destilación.

Al destilado obtenido en ésta, se vuelve a destilar a una temperatura menor, y a este resultado se aplica por última vez el proceso de destilación; en cada etapa, se realizó el análisis correspondiente de refractometría para identificar los compuestos presentes y su porcentaje en peso del destilado obtenido, a la vez, también, se determinó la densidad de cada destilado.

El objetivo de la segunda y tercera destilación es obtener estos alcoholes (mezcla), más concentrados y más puros valiéndose de sus puntos de ebullición para eliminar agua e impurezas y a la vez, observar el comportamiento de las proporciones (en peso) de todos estos componentes en cada subsiguiente destilado. La práctica experimental se estableció para tres etapas de destilación.

De los resultados obtenidos correspondientes al porcentaje (en peso) de los compuestos presentes en la última etapa de

destilación, con base en la cantidad original de bagazo utilizada <sup>32</sup>  
(400 g) para realizar cada prueba, se tiene:

1. Un 0.879% de recuperación (en peso) para los dos alcoholes (metanol-etanol).
2. Un 32.4% (en peso) de presencia de agua en el último destilado.

A continuación, se presentan los datos en sus correspondientes tablas y gráficas.

PRIMERA DESTILACIÓN

TABLA No.1  
TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL) : 2 MESES

No. Temp. cal.(°C)	tiempo calt.	cant. obt.(ml)	dt cal.(min)	cv obt.(ml)	% de componentes (promedio) ± 1.3%
1 94-97	4:16	26.2	30	0.3	Metanol 2
2 95-97	4:17	26.1	30	0.2	Etanol 8.2
3 94-96	4:20	26.4	25	0.1	Agua 7.3
4 94-96	4:10	26.1	33	0.3	Impurezas 17.4
5 94-96	4:11	26.2	25	0.2	densidad 0.972

Promedio horas: 4.25 hrs.

Promedio destilado (ml) : 25.2 ml.

TABLA No.2  
TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL) 3 MESES

No. Temp. cal.(°C)	tiempo calt.	cant. obt.(ml)	dt cal.(min)	cv obt.(ml)	% de componentes (promedio) ± 1.3%
1 94-96	4:13	28.1	29	0.3	Metanol 1.3
2 94-96	4:15	27.3	25	0.2	Etanol 10.1
3 94-96	4:14	28.4	26	0.4	Agua 7.3
4 94-96	4:16	28.4	24	0.2	Impurezas 15.6
5 94-96	4:10	28.1	25	0.1	densidad 0.961

Promedio horas: 4.23 hrs.

Promedio destilado : 25.06 ml

TABLA No.3  
TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL): 4 MESES

No.	Temp. cal. (°C)	tiempo calt.	cart. obt. (ml)	dt cal. (min)	ctv obt. (ml)	% de componentes (promedio) ± 1.3%
1	93-95	4:11	29.4	22	0.2	Metanol 1.3
2	93-95	4:13	28.9	20	0.4	Etanol 11.4
3	92-94	4:10	28.6	22	0.1	Agua 72.1
4	92-94	4:16	29.1	21	0.2	Impurezas 15.2
5	92-94	4:10	29	20	0.2	densidad 0.954

Promedio horas: 4.2 hrs.

Promedio destilado: 29.04

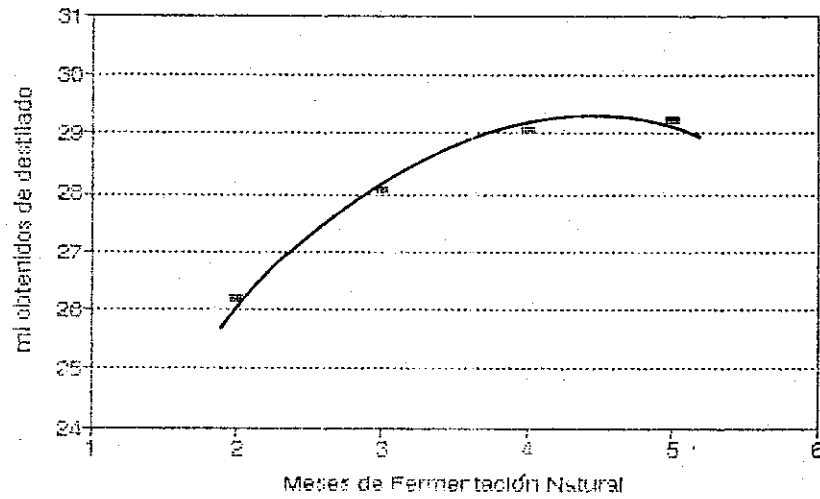
TABLA No.4  
TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL): 5 MESES

No.	Temp. cal. (°C)	tiempo calt.	cart. obt. (ml)	dt cal. (min)	ctv obt. (ml)	% de componentes (promedio) ± 1.3%
1	90-92	4:10	29.1	20	0.3	Metanol 1.4
2	90-92	4:14	29.4	21	0.2	Etanol 11.8
3	90-91	4:09	29.3	19	0.3	Agua 71.6
4	90-91	4:06	28.3	20	0.1	Impurezas 15.2
5	90-91	4:12	29.4	19	0.2	densidad 0.955

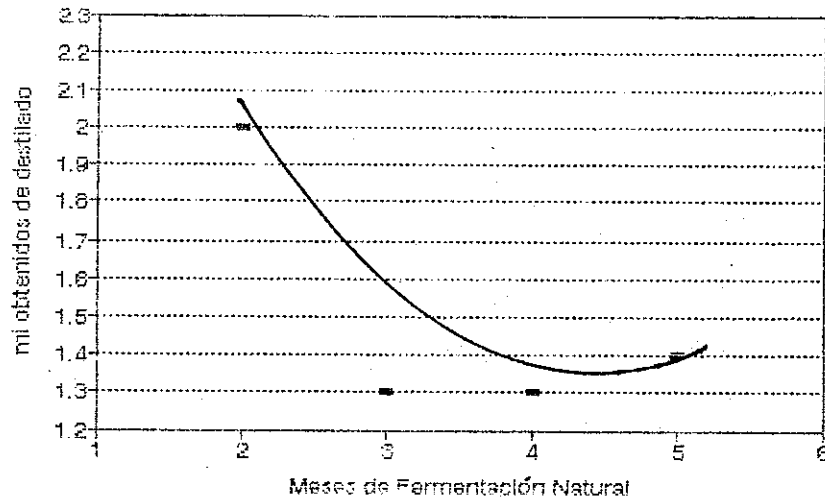
Promedio horas: 4.17 hrs.

Promedio destilados: 29.22

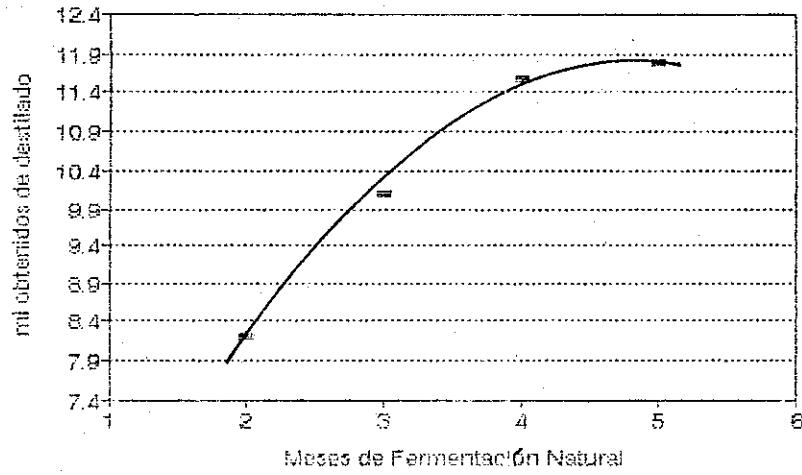
**Gráfica No.1**  
Desilado(mi) vrs. Meses (fer. nat.)



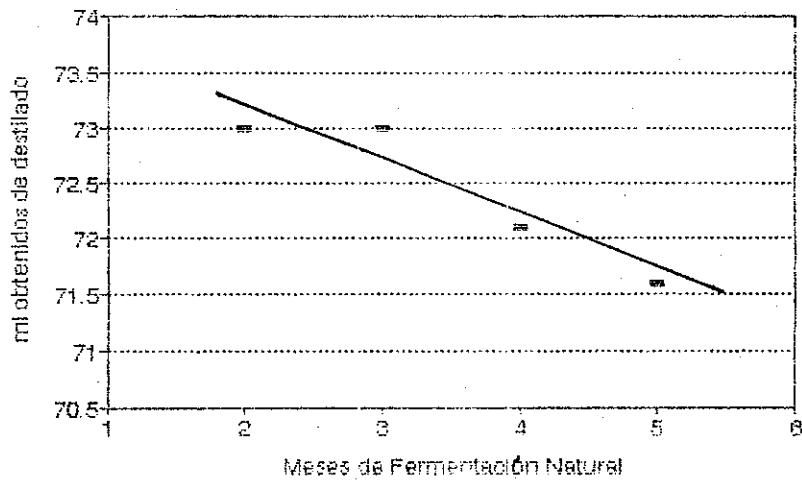
**Gráfica No.2**  
% Metanol en destilado



Gráfica No.3  
% Etanol en destilado



Gráfica No.4  
% Agua en destilado





SEGUNDA DESTILACIÓN

(Se utilizaron 25 ml para cada muestra)

TABLA No.1  
TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL): 2 MESES

No. Temp.	tiempo cal.(°C)	tiempo cart. obt. (ml)	cart. obt. (ml)	dt cal.(min)	dt obt.(ml)	% de componentes ± 2.1%
1	85-87	3:50	9.3	15	0.1	Metanol 9.3
2	85-88	3:45	9	16	0.2	Etanol 8.1
3	85-87	3:50	8.9	14	0.2	Agua 87.5
4	85-88	3:43	8.8	15	0.1	Impurezas 15.1
5	85-86	3:50	8.9	15	0.3	densidad 0.93

Promedio tiempo (hrs): 3.8

Promedio (ml): 8.98

TABLA No.2  
TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL): 3 MESES

No. Temp.	tiempo cal.(°C)	tiempo cart. obt. (ml)	cart. obt. (ml)	dt cal.(min)	dt obt.(ml)	% de componentes ± 2%
1	85-87	3:50	9.6	15	0.2	Metanol 9.1
2	85-87	3:46	9.7	15	0.3	Etanol 12.7
3	85-88	3:45	10.0	13	0.2	Agua 88.2
4	85-88	3:43	9.6	15	0.1	Impurezas 12
5	85-88	3:50	9.8	12	0.1	densidad 0.926

Promedio tiempo (hrs): 3.79

Promedio (ml): 9.3

TABLA No.3

## TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL): 4 MESES

No.	Temp. cal.(°C)	tiempo calt.	carit. obt.(mf)	dit cal.(min)	dtv obt.(ml)	% de componentes $\pm$ 2%
1	85-86	3:47	10.8	13	0.2	Metanol 9.1
2	85-86	3:45	10.9	10	0.1	Etanol 14.3
3	85-86	3:42	11.9	12	0.1	Agua 66.3
4	85-86	3:46	10.9	13	0.2	Impurezas 10.3
5	85-86	3:46	10.8	15	0.1	densidad 0.92

Promedio tiempo (hr):

3.75

Promedio (mf): 11.02

TABLA No.4

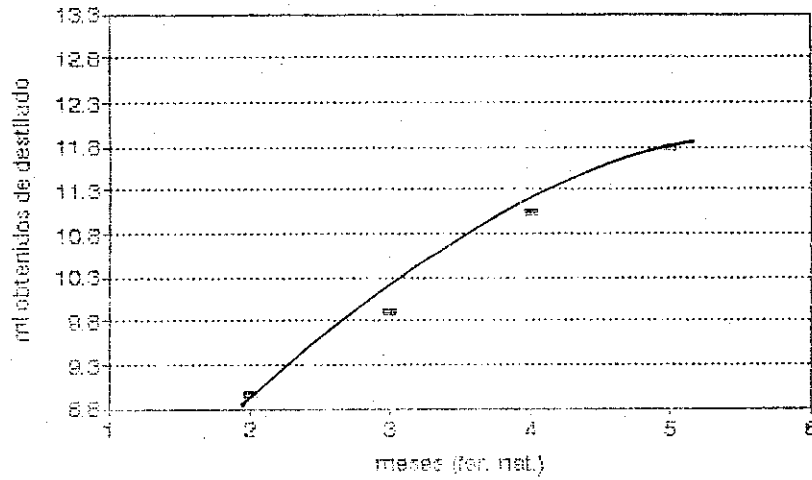
## TIEMPO DE FERMENTACIÓN (NATURAL): 5 MESES

No.	Temp. cal.(°C)	tiempo calt.	carit. obt.(mf)	dit cal.(min)	dtv obt.(ml)	% de componentes $\pm$ 2%
1	85-86	3:42	12	12	0.2	Metanol 9
2	85-86	3:43	11.9	10	0.3	Etanol 16.1
3	85-86	3:43	12.2	11	0.1	Agua 64.9
4	85-86	3:40	11.7	12	0.2	Impurezas 10
5	85-86	3:41	11.1	10	0.1	densidad 0.91

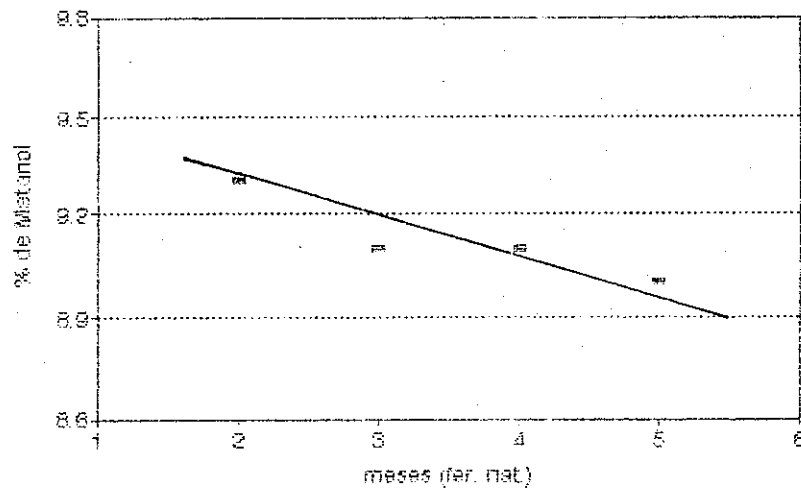
Prome. Hrs. : 3:419 (3.696)

Promedio (mf): 11.78

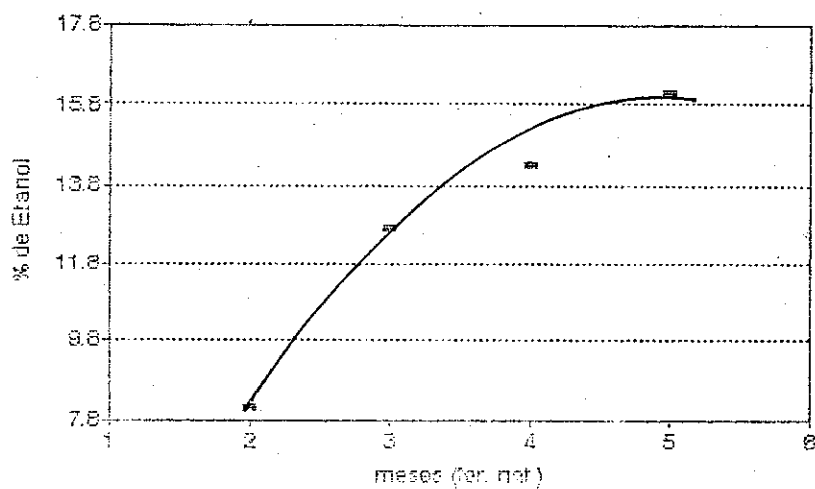
**Gráfica No. 1**  
Cant. de destilado vs. meses fert. nat



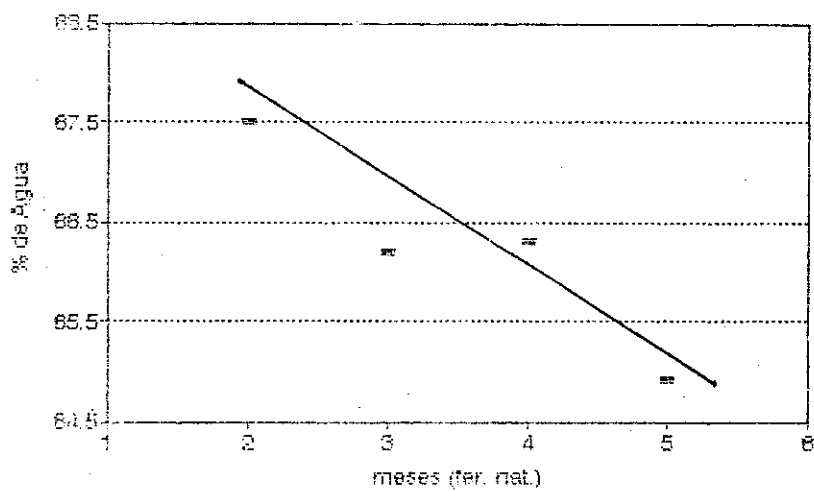
**Gráfica No.2**  
% de Metanol



Gráfica No.3  
% de Etanol



Gráfica No.4  
% de Agua



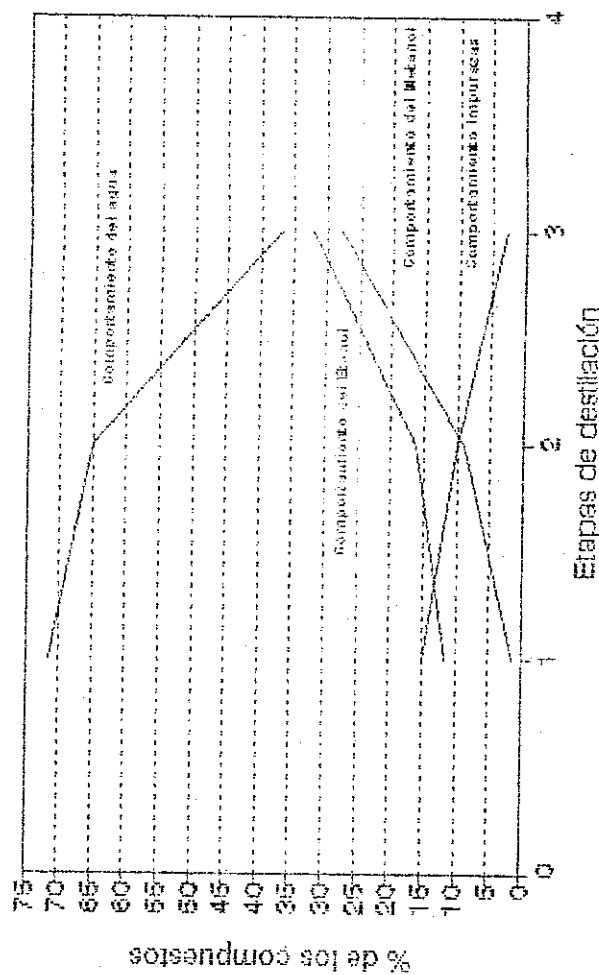
## TERCERA DESTILACIÓN

TABLA No.1

(ml utilizados 17ml)

No	Tiempo fer. (meses)	Temp. cal. (oC)	tiempo calt.	cant. obt. (ml)	componentes (%)± 2.5%	
1	2	81-83	3:10	1.2	Metanol	28.4
2	2	80-83	3:15	1.3	Etanol	24.3
					Agua	41.6
					Impurezas	5.7
					densidad	0.89
3	3	80-82	3:05	1.8	Metanol	28.1
4	3	80-83	3:00	1.7	Etanol	27.2
					Agua	39.5
					Impurezas	5.2
					densidad	0.86
5	4	80-82	3:12	2.3	Metanol	27.3
6	4	80-82	3:10	2	Etanol	25.3
					Agua	40.2
					Impurezas	5.2
					densidad	0.84
7	5	80-82	3:15	2.3	Metanol	27.8
8	5	80-82	3:15	2.41	Etanol	32.4
					Agua	36.8
					Impurezas	3
					densidad	0.82

**Gráfica No.5**  
 % de los compuestos por destilación



Tiempo de fermentación natural: 6 meses

## CAPITULO IV

### DISCUSION DE RESULTADOS

En este capítulo, se expone y se discute todo lo relacionado con el procedimiento empleado para la realización de la destilación del bagazo de café como los resultados obtenidos en la parte experimental.

#### 4.1 Procedimiento

Se toman 400 gr. del bagazo para realizar la destilación, con el fin de obtener una muestra considerable en el destilado, analizarla y proceder con la siguiente etapa; para cantidades menores, el destilado obtenido no es suficiente para proseguir con el procedimiento de destilación. Debe hacerse notar, que mientras más grande es la muestra, mayor es el tiempo de calentamiento.

El rango en el cual se realizan las primeras destilaciones es de 91-93 oC; si se toma un rango de temperatura cercano a cualquier punto de ebullición de los alcoholes (metanol p.e.: 64.7 oC, etanol p.e.: 78.4 oC), no es posible obtener alcoholes en cantidad necesaria para las siguientes etapas; debido a que estos alcoholes se encuentran en una mezcla de

compuestos orgánicos y agua, además se requiere que el vapor pueda escapar del interior de la estructura del bagazo. Pruebas de ensayo posteriores demostraron que con el aumento de la temperatura, se formaba más vapor dentro de la estructura del bagazo y al aproximarse a los 96 oC se forma más vapor de agua, el cual facilitará la extracción de los alcoholes, debido a la ruptura de las micelas. Cuando se incrementa la temperatura, arriba de los 100 oC, se obtiene un extracto considerable de color amarillo en el destilado, más denso que el agua; estos compuestos se identificaron como estirenos.

En las primeras cuatro horas, se observa que se condensa vapor a una velocidad constante; es después de este tiempo cuando es difícil obtener más destilado a la misma temperatura, por ello en las tablas de los resultados aparecen un dt y un dv, que indican un tiempo adicional (dt), en el cual únicamente se ha obtenido un pequeño volumen (dv).

#### 4.2 Análisis de rendimiento.

En el proceso de destilación de la madera, se obtiene metanol de la celulosa (Ref. VII pp 3), ya que el bagazo de café tiene un alto porcentaje de celulosa (Ref. I pp 102 y 103) es posible, aunque no se haya demostrado antes, que se puede extraer metanol del bagazo de café y por los azúcares que posee (Ref. VI 102) se puede también obtener etanol.



45

La pulpa del bagazo tiene una humedad de 62% en grano fresco (Ref. VI pp 102), mientras que el pergamino posee un 7.6% en peso (Ref. VI pp 103), sin embargo, ésta aumenta por el proceso de despulpado, y también debido a las condiciones climatológicas donde es depositado como desecho; esto favorece las condiciones para que los microorganismos se desarrollen y generen el proceso de la fermentación (Ref. I pp 435), por lo que a más tiempo de estar expuesto al ambiente, estará más fermentado, específicamente se refiere a los azúcares reductores, cuyo porcentaje de composición en el bagazo también es considerable; la mayor cantidad de ellos se encuentra en el mucílago con un 30% en peso (Ref. VI pp 102). También de esta fermentación se produce metanol en una cantidad muy pequeña, que se desprecia (Ref. III pp 513).

El metanol es producido en la celulosa, a través del mecanismo de la fermentación generado por microorganismos metanólicos (denominados en función de la sustancia que producen), que encuentran condiciones favorables para su actividad microbiológica en ésta; la celulosa también se ve afectada por los microorganismos etanólicos, cuya actividad producirá etanol, sin embargo, ésta no es un ambiente o sustrato propicio para su desarrollo (Ref. VII pp 4), por lo que su rendimiento es relativamente bajo. De todo esto se puede concluir que el metanol en casi su totalidad proviene de la celulosa, mientras que la mayor parte del etanol proviene de la fermentación de los azúcares reductores.

El porcentaje de metanol se mantiene relativamente constante dentro de cada una de las etapas de destilación (Ver Cap. III Primera Destilación); en la primera destilación, se puede observar que el porcentaje de metanol en el destilado es relativamente constante, independiente del tiempo de fermentación que tenga el bagazo, puesto que la generación de éste proviene de la celulosa, y se puede decir que su producción en la celulosa es rápida y alcanza un límite máximo posible de extracción en esta etapa (bajo las condiciones en las que se trabajó). Su porcentaje de composición en peso va aumentando en las siguientes etapas, pues el punto de ebullición del metanol es menor que el del etanol y agua, por consiguiente, el próximo destilado será más rico en el compuesto más volátil (metanol).

En el caso del etanol, en la primera destilación el porcentaje de composición peso, es directamente proporcional al tiempo de fermentación (natural) (Ver Cap. III Primera Destilación), sin embargo, en las últimas pruebas se ve un acercamiento de los resultados, e indican su estabilización en su generación (Cap. III Gráf. No.2); cabe recordar que una menor parte proviene de la celulosa y hemicelulosa presentes en la pulpa, pergamino y mucílago (Ref.VI pp 102 y 103).

En las siguientes etapas, este porcentaje sube, pues su punto de ebullición (78.4 oC) es menor que el del agua (96 oC) (Ref. IV pp 3-42), pero es mayor que el del metanol (65.7 oC) (Ref. IV pp 3-48); se espera que el siguiente

destilado sea rico en el compuesto volátil, y así es; sin embargo, también es más rico en etanol, ya que existe una composición mayor de este en el líquido que se va a destilar (Cap. III Gráf. No.5). Debe hacerse notar que la extracción por destilación de estos compuestos, también se ve afectada por el grado de eficiencia del equipo con que se trabaje.

El rendimiento de extracción de metanol del bagazo de café por destilación es de 0.09% en peso (base húmeda), y para el etanol de 0.789% en peso (base húmeda).

#### 4.3 Análisis de calidad

En cada etapa de destilación, aumenta el porcentaje de composición en peso de los alcoholes (metanol-etanol) (Cap. III Gráf. No.5), sin embargo, a pesar de que el porcentaje de agua disminuye (Cap. III Tercera Destilación), es relativamente grande en la última etapa.

En esta sección, se usa el término de calidad para indicar el grado de pureza de los alcoholes, es decir, el valor del porcentaje de esta mezcla en cada destilado, si es alto es de mejor calidad, y al contrario si es de menor calidad porque se ve afectado de impurezas y agua. Se logró en la última etapa un 60.2% de pureza contra un 32.4% de agua y 3% de impurezas; este mismo porcentaje nos da la calidad (en peso), y es bastante bajo debido a las propiedades intermoleculares de estos tres componentes, como la miscibilidad, puntos de ebullición relativamente cercanos

(Ref. IV pp 3-42,3-48) y la formación de un azeótropo mínimo etanol-agua (Ref. IV pp 13-63), el cual permite un máximo de separación del etanol del 95% (Ref. III pp 514 y 515) (teniendo un equipo eficiente).

## CONCLUSIONES

49

1. Es posible obtener hasta un  $0.879\% \pm 0.09\%$  (en base húmeda) o  $1.42 \pm 0.09\%$  (base seca) de metanol y etanol, a partir del bagazo de café por destilación, con un tiempo de fermentación natural del mismo de 2 meses.
2. El porcentaje de composición del etanol en el destilado es proporcional al tiempo de fermentación del bagazo de café, asintótica al valor  $0.789 \pm 0.09\%$  en base seca en función de la cantidad de azúcares reductores.
3. El bagazo de café puede ser utilizado como fuente de producción de metanol y etanol, y ser reutilizado como abono, dado que no se ven afectadas sus propiedades como abono orgánico.

## RECOMENDACIONES

50

1. Para tener un conocimiento más amplio del proceso de extracción de estos alcoholes del bagazo de café, se recomienda hacer una serie de las mismas pruebas con distintas muestras de este bagazo procedente de las diferentes regiones del país.
2. Para determinar el límite de extracción de estos alcoholes del agua bajo las condiciones a las que se trabajó, se recomienda realizar más destilaciones sucesivas sobre el último destilado obtenido.
3. Se debe a la vez utilizar el proceso de fermentación por levaduras (el cual dura poco tiempo), para fermentar los azúcares del bagazo y luego realizar el proceso de destilación.
4. La mezcla obtenida de alcoholes (metanol-etanol) por destilación del bagazo de café es peligrosa, si se utiliza como bebida, pues a pesar de que el porcentaje (peso) del metanol es pequeño y el del etanol es más grande en la primera destilación, es venenoso, pues causa severos daños en el organismo, e inclusive la muerte.

## APÉNDICE I

### MUESTRA DE CÁLCULO

#### Rendimiento

La cantidad de bagazo para cada muestra es de 400 gr. Se tiene en la primera destilación (Cap. III, sección Primera destilación) los siguientes datos de la Tabla No.1:

Promedio de destilado: 29.04 ml  
 Densidad del destilado: 0.954 gr/ml  
 % en peso de metanol: 1.3 %  
 % en peso del etanol: 11.4 %

Cantidad de metanol:  $(29.04\text{ml}) \cdot (0.954 \text{ g/ml}) \cdot (0.013) = 0.360 \text{ g}$

Cantidad de etanol:  $(29.04\text{ml}) \cdot (0.954 \text{ g/ml}) \cdot (0.114) = 3.1582 \text{ g}$

Rendimiento:

Metanol:  $0.360 \text{ g} / 400 \text{ g} \cdot 100\% = 0.09\%$

Etanol:  $3.1582 \text{ g} / 400 \text{ g} \cdot 100\% = 0.789\%$

Estos datos están calculados en base húmeda; para base seca se tiene:

Humedad promedio: 62%

Cantidad de base seca (base de cálculo = 100 g): 48 g

% Metanol =  $0.09 \text{ g} / 48 \text{ g} \cdot 100\% = 0.1875 \%$  en peso

% Etanol =  $0.789 \text{ g} / 48 \text{ g} \cdot 100\% = 1.6244 \%$  en peso

## APÉNDICE II

### ANÁLISIS DE ERROR

Para cada mes de fermentación (natural), se tomaron 5 muestras, es decir; para la primera destilación; para el caso de 2 meses, se tomaron 5 muestras de 400 g cada una.

Para la primera y segunda destilación, se realizaron los análisis estadísticos de control que se presentan en los gráficos siguientes. El objetivo de estas gráficas es determinar los datos que están fuera de control por razones injustificadas (errores humanos o de aparatos), por lo que se permite hasta un 30% de estos datos fuera de control, un % igual o menor puede ser corregido eliminando el o los datos, y se le asigna el valor promedio; si es mayor, deberá repetirse la corrida (las 5 muestras).

Los límites de control se establecen en cantidad igual al promedio  $\pm \alpha\sigma$ , donde  $\alpha$  es un número, que depende del grado de confiabilidad y  $\sigma$  es la desviación estándar de la muestra; se trabaja con un 67% de confiabilidad, por lo que  $\alpha$  toma un valor de 2, si fuera una confiabilidad del 95 se tomaría un valor de 3.

De las gráficas, se puede ver que todas las muestras de cada mes, están bajo control con la confiabilidad dada, por lo que no es necesario eliminar datos.

Determinación de la desviación estandar (muestral):

Fórmula: 
$$\sigma = \sqrt{((\sum x^2 - n\bar{X}^2)/(n-1))}$$



Donde:

$\sigma$  = desviación estandar muestral

$\sum x^2$  = suma de cada dato de la muestra elevado al cuadrado

n = cantidad de datos de la muestra

X = promedio de la muestra

De la Tabla No.1 Cap. Resultados, secc.: Primera Destilación se tiene:

X = 26.2ml

$\sum x^2$  = 686.44

n = 5 (volúmenes de destilado).

$\sum x^2$  =  $26.2^2 + 26.1^2 + 26.4^2 + 26.1^2 + 26.2^2$

$\sum x^2$  = 3432.26

$\sigma = \sqrt{((3432.26 - (5*686.44))/(5 - 1))}$

$\sigma = 0.1225$

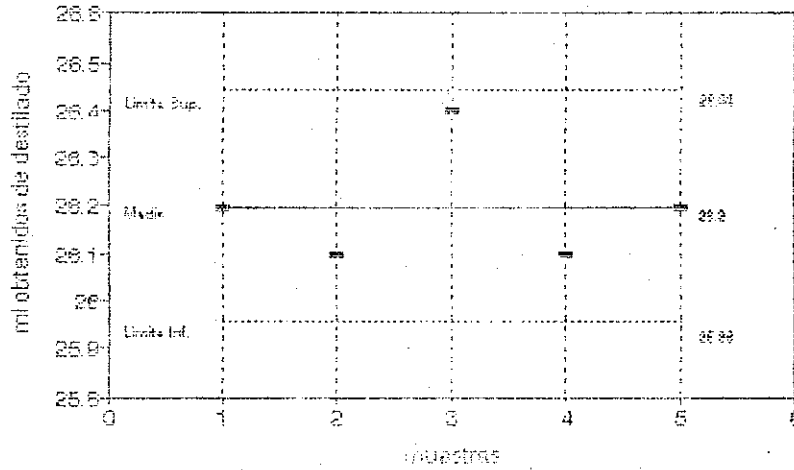
Límite superior de control =  $26.2 \text{ ml} + 0.1225 = 26.323 \text{ ml}$

Límite inferior de control =  $26.2 \text{ ml} - 0.1225 = 26.078 \text{ ml}$

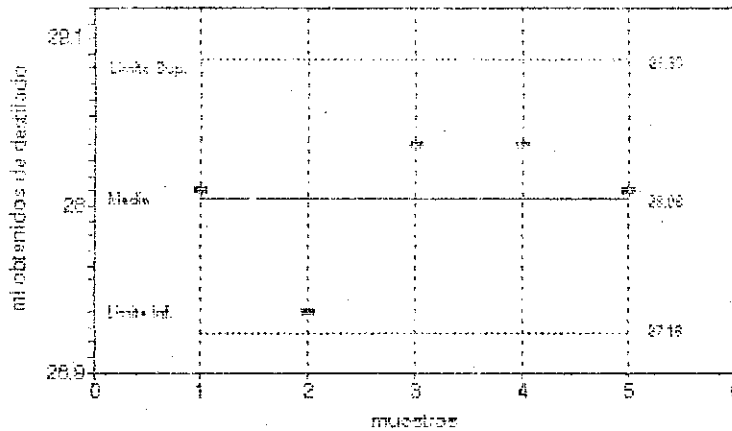
De esta manera, se encuentran los límites correspondientes a cada gráfica que se presenta a continuación.

## PRIMERA DESTILACIÓN

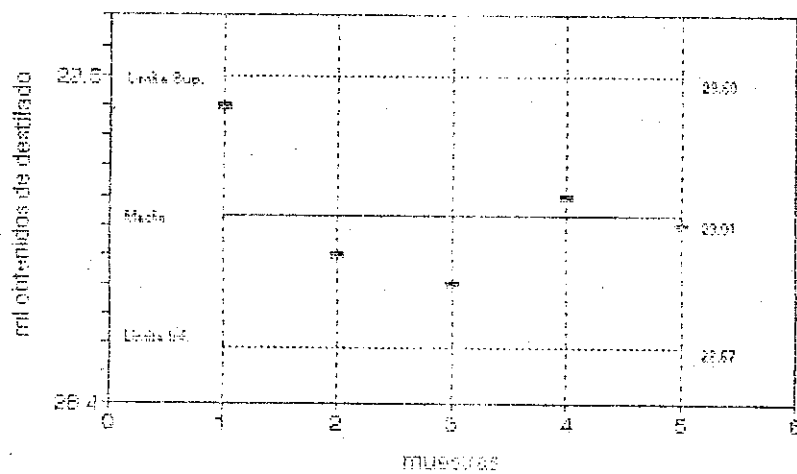
Gráfica No. 1  
Diagrama de control (2 meses)



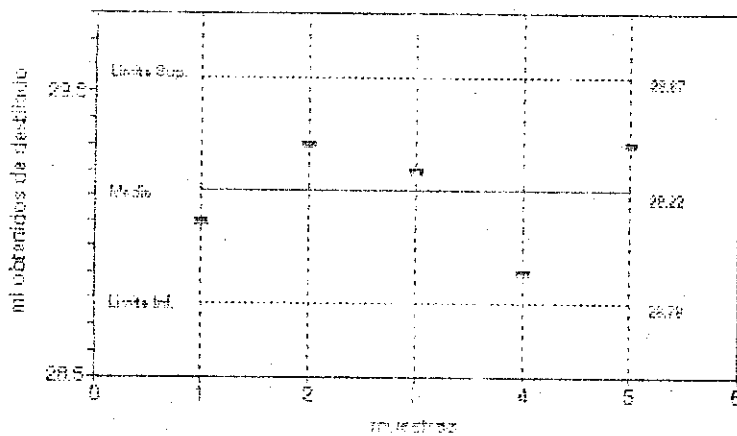
Gráfica No. 2  
Diagrama de control (3 meses)



Gráfica No.3  
Diagrama de control (4 meses)

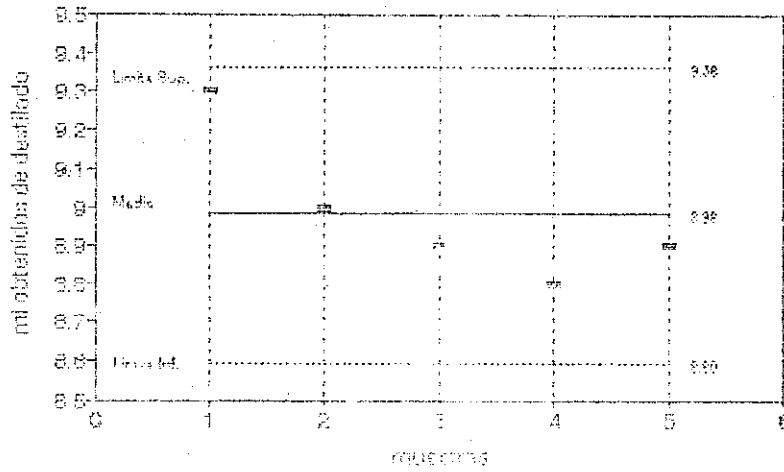


Gráfica No.4  
Diagrama de control (5 meses)

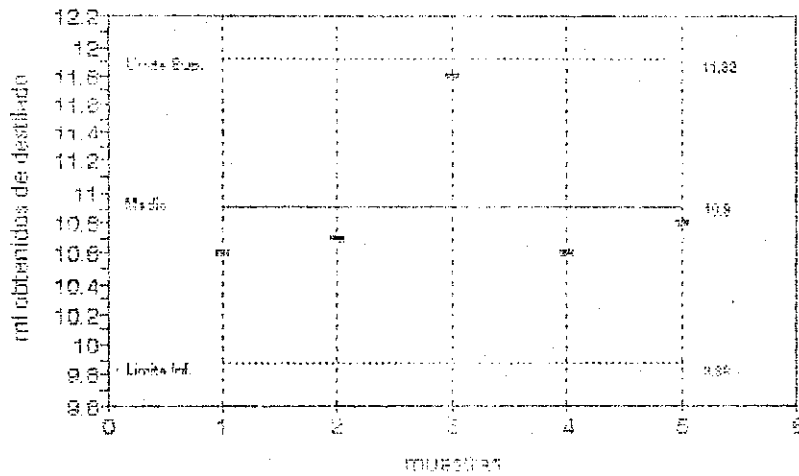


SEGUNDA DESTILACION

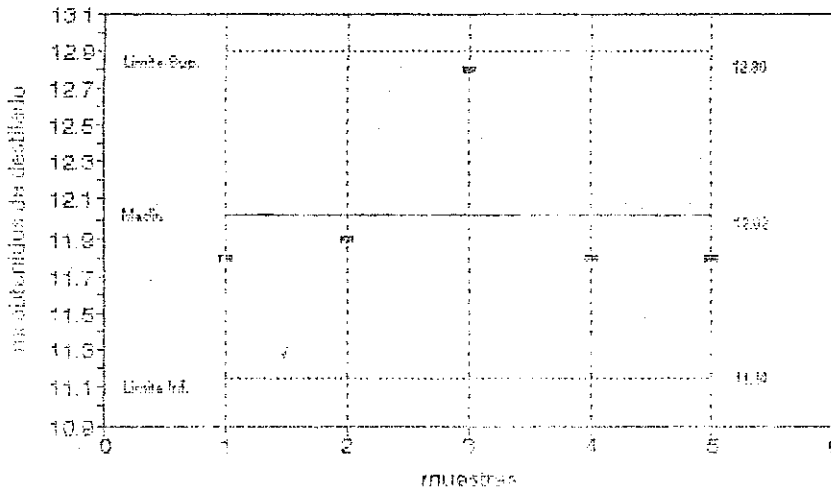
**Grafica No. 1**  
Diagrama de control (2 meses)



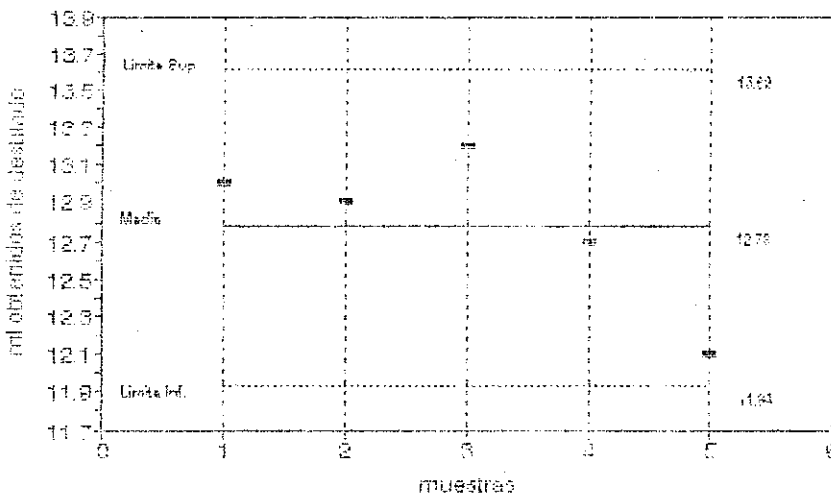
**Grafica No. 2**  
Diagrama de control (3 meses)



Gráfica No.3  
Diagrama de control (4 meses)



Gráfica No.4  
Diagrama de control (5 meses)



## APÉNDICE III

### AZEOTROPÍA ALCOHÓLICA

En esta sección, se expone la tendencia (empírica) de la azeotropía de los alcoholes con el agua en fases finarias entre éstos; también es necesario anotar que por su naturaleza el azeótropo puede ser máximo o mínimo; un azeótropo es el estado de composición en sistema bifásico de dos componentes en el que la composición del alcohol, tanto en la fase líquida como en la gaseosa, es la misma (Ref. IV pp 13-62).

El metanol, que es alcohol de menor peso molecular, no forma ningún tipo de azeótropo con el agua, sin embargo, los siguientes alcoholes mencionado en orden creciente de peso molecular y tomados para este análisis con su estructura lineal (n-) se tienen los siguientes datos:

Presión 760 mm de Hg

Mezclas azeotrópicas binarias de punto mínimo de ebullición.

Sistema:

A	B	Mol %A	Temp. °C
Agua	Alcohol etílico	10.57	78.15
	Alcohol n-propílico	56.83	87.72
	Alcohol n-butílico	75.0	92.25

(Ref. V pp 13-63)

De esto, se puede esperar que el aumento en el peso molecular en los alcoholes de estructura lineal (n-), es proporcional al aumento del porcentaje de composición del agua en esta clase de azeótropo, y también proporcional a la temperatura

del mismo, al menos con estos primeros cuatro alcoholes.

Se debería investigar más sobre esta tendencia para relacionar alcoholes mayores que el n-butílico, con el fin de determinar si existe azeotropía para ellos y su correspondiente comportamiento.

**BIBLIOGRAFIA**

- I. GEANKOPLIS, C. J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: Compañía Editorial Continental S.A. 1,982. Págs. 555-560
- II. KIRK, R. E. Enciclopedia de tecnología química. Segunda Edición. México: Editorial Hispano-Americana. 1,962. Tomo VII. Págs. 917-920
- III. MORRISON, R. Química orgánica. Segunda Edición. Estados Unidos: Editorial educativo Interamericano S.A. 1,976. Págs. 33-45, 509.
- IV. PERRY, J. H. Manual del Ingeniero Químico. Sexta Edición. México: McGraw-Hill. 1,994. Capítulo 13.
- V. WINGROVE, A. Química orgánica. Segunda Edición. México: Editorial Harla. 1,984. Pp. 485-490
- IV. Utilización integral de los subproductos del café. ICAITI. Tercer Simposio Internacional sobre la utilización de los subproductos de café. Guatemala: s.p.i. 1,987.
- VII. Emerging energy and chemical applications of methanol: opportunities for developing countries. Estados Unidos, University of Connecticut: s.p.i. 1,990