

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DEL AFRECHO DE CAFÉ

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL

FERNANDO XAVIER GUERRÓN QUIROZ
ferx.edu@hotmail.com

DIRECTORA: ING. NEYDA FERNANDA ESPÍN FÉLIX, M.Sc.
neyda.espin@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2018

© Escuela Politécnica Nacional (2018)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo Fernando Xavier Guerrón Quiroz declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Fernando Xavier Guerrón Quiroz

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fernando Xavier Guerrón Quiroz, bajo mi supervisión.

Ing. Neyda Espín, M.Sc.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la fuerza que necesité en los momentos difíciles y nunca desampararme en los instantes de soledad.

A mis padres por brindarme todo su apoyo integral e incondicional durante todas las etapas de mi formación como profesional.

A mis hermanos Daniela y Santiago por su cariño, comprensión y preocupación y por alegrarme la vida cuando las cosas se tornaban mal.

A los señores Ingenieros: Oswaldo Proaño y Oswaldo Acuña, quienes con su experiencia y conocimientos me guiaron en el desarrollo de la presente tesis.

A mis amigos Marina, Pao, Marce, Iralda, Silvi, Darío, Ricardo, Andrés, Víctor, Xavier, Klever, Segundo, Pillín y César, quienes compartieron conmigo la vida universitaria. Gracias por su compañía, apoyo y ánimos durante mi larga permanencia en el laboratorio y mil gracias por su amistad.

A don Willman por darme apertura al Laboratorio de Ingeniería de Procesos y a doña Ceci por continuar en la misma línea; colaborándome con todo el material y equipos que necesitaba y con la disponibilidad del laboratorio, sin olvidar tampoco la ayuda de don Camilo. De manera especial quiero agradecerles su confianza.

DEDICATORIA

A mis padres, Wilson y Graciela
por su amor y cariño que en cada momento
me demuestran y que me ayuda a seguir adelante.

A ellos por ser ejemplo de superación
quiero dedicarles este trabajo, que es
el fruto de todos los esfuerzos puestos en mí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	xii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. El café	1
1.2. Grasas y aceites	5
1.2.1. Aceites para la producción de biodiésel	5
1.2.2. Extracción de aceite para biodiésel	8
1.3. Biodiésel	10
1.3.1. Situación del biodiésel en el mercado	12
1.3.2. Propiedades del biodiésel	13
1.3.3. Obtención de biodiésel	15
2. PARTE EXPERIMENTAL	18
2.1. Materiales	18
2.2. Determinación de las condiciones de secado y extracción de aceite a partir de afrecho de café	18
2.2.1. Secado	18
2.2.2. Extracción de aceite de café	19
2.2.3. Determinación de propiedades físico-químicas del aceite de café	20
2.3. Determinación del efecto del catalizador y la concentración de alcohol en la etapa de transesterificación en el proceso de obtención de biodiésel	21
2.4. Diseño básico de la planta	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
3.1. Caracterización del afrecho de café	37
3.2. Condiciones de secado y extracción de aceite a partir de afrecho de café	37
3.2.1. Secado	37
3.2.2. Extracción de aceite	41
3.2.3. Análisis del aceite de café extraído	48

3.3.	Efecto del catalizador y la concentración de alcohol en la etapa de transesterificación en el proceso de obtención de biodiésel	53
3.4.	Diseño básico de la planta	62
3.4.1.	Capacidad de la planta	62
3.4.2.	Balances de masa	64
3.4.3.	Balance de energía	65
3.4.4.	Dimensionamiento y especificaciones de equipos	66
3.5.	Lay- out	68
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA	71
	ANEXOS	82

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Clasificación taxonómica del cultivo de Café	1
Tabla 1.2.	Exportación de café industrializado del Ecuador del 2009 al 2014 por sacos de 60 kg	4
Tabla 2.1.	Características de los reactivos utilizados en los procesos de obtención del biodiésel	18
Tabla 2.2.	Propiedades evaluadas en el aceite de café de acuerdo con las normas INEN	20
Tabla 3.1.	Análisis proximal del afrecho de café	37
Tabla 3.2.	Variación de la humedad en base seca y velocidad de secado del afrecho de café a 70, 90 y 110 °C	40
Tabla 3.3.	Humedad inicial del afrecho de café y humedad de equilibrio alcanzado luego del proceso de secado	41
Tabla 3.4.	Promedio de aceite obtenido en el transcurso del tiempo de extracción para afrecho sin secado previo	42
Tabla 3.5.	Promedio de aceite de café (g/100 g afrecho seco) obtenido del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C durante cada intervalo de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos de extracción	42
Tabla 3.6.	Aceite (g) obtenido en los períodos de extracción del afrecho seco a 70, 90 y 110 °C	44
Tabla 3.7.	Promedio de aceite de café obtenido frente al tiempo de extracción del afrecho secado a 110 °C	45
Tabla 3.8.	Cambios de la velocidad de extracción (g aceite/100 g afrecho seco*min) en la obtención del aceite de café secado a 70, 90 y 110 °C	47
Tabla 3.9.	Resultados obtenidos para cada propiedad evaluada en el aceite de café	48
Tabla 3.10.	Rendimiento de biodiésel obtenido en los ensayos realizados en la transesterificación del aceite para las diferentes relaciones de catalizador y alcohol	53

Tabla 3.11.	Resultados de las propiedades valoradas en la calidad del biodiésel	57
Tabla 3.12.	Balance de materiales para cada proceso de la obtención de aceite de café en planta	64
Tabla 3.13.	Balance de materiales para cada proceso de la obtención de biodiésel de café en planta	64
Tabla 3.14.	Calor de calentamiento y calor de vaporización utilizado en cada etapa de proceso	65
Tabla 3.15.	Capacidades requeridas y capacidades seleccionadas por equipo para cada etapa del proceso de obtención de biodiésel	67
Tabla 3.16.	Dimensiones y cantidad de los equipos principales seleccionados para la obtención de biodiésel del afrecho de café	67
Tabla AVI.1.	Datos experimentales del proceso de secado del afrecho de café a 70 °C	88
Tabla AVI.2.	Datos experimentales del proceso de secado del afrecho de café a 90 °C	89
Tabla AVI.3.	Datos experimentales del proceso de secado del afrecho de café a 110 °C	90
Tabla AVI.4.	Datos experimentales de la pérdida de humedad del afrecho de café a 70, 90 y 110 °C	92
Tabla AVII.1.	Datos experimentales del proceso de extracción del aceite de café a partir del afrecho húmedo (H=11,96 %) en tiempos de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos	94
Tabla AVII.2.	Datos experimentales del proceso de extracción del aceite de café a partir del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C en tiempos de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos	96
Tabla AVIII.1.	Datos experimentales del promedio del porcentaje de aceite de afrecho de café obtenido y velocidad de extracción a 10, 15, 20, 30 y 45 minutos para el afrecho seco a 70 °C	98
Tabla AVIII.2.	Datos experimentales del promedio del porcentaje de aceite de afrecho de café obtenido y velocidad de extracción a 10, 15, 20, 30 y 45 minutos para el afrecho seco a 90 °C	98
Tabla AVIII.3.	Datos experimentales del promedio del porcentaje de aceite de afrecho de café obtenido y velocidad de extracción a 10, 15, 20, 30 y 45 minutos para el afrecho seco a 110 °C	99

Tabla AIX.1.	Resultados de la prueba de densidad relativa	100
Tabla AIX.2.	Resultados de la prueba de índice de acidez	100
Tabla AIX.3.	Resultados de la prueba de índice de saponificación	100
Tabla AIX.4.	Resultados de la prueba de índice de yodo	101
Tabla AIX.5.	Resultados de la prueba de índice de peróxidos	101
Tabla AX.1.	Biodiésel obtenido para cada interacción de catalizador y alcohol	102
Tabla A.XI.1.	Análisis de varianza ANOVA a dos vías para el rendimiento del biodiésel en unidades adimensionales	104
Tabla A.XI.2.	Pruebas de Múltiples Rangos para el rendimiento del biodiésel respecto del catalizador	104
Tabla AXIV.1.	Hoja de especificación del secador de afrecho	117
Tabla AXIV.2.	Hoja de especificación del extractor	118
Tabla AXIV.3.	Hoja de especificación del destilador	119
Tabla AXIV.4.	Hoja de especificación del desolventizador	120
Tabla AXIV.5.	Hoja de especificación del Precalentador	121
Tabla AXIV.6.	Hoja de especificación del mini reactor	122
Tabla AXIV.7.	Hoja de especificación del reactor de transesterificación	123
Tabla AXIV.8.	Hoja de especificación de la máquina destiladora de agua	124
Tabla AXIV.9.	Hoja de especificación del decantador	125
Tabla AXIV.10.	Hoja de especificación del caldero	126
Tabla AXIV.11.	Hoja de especificación del Elevador - transportador	127
Tabla AXIV.12.	Hoja de especificación del Elevador de cangilones hermético	128

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Principales zonas cafetaleras del Ecuador	3
Figura 1.2.	Difusión del soluto del solido hacia el solvente	9
Figura 1.3.	Equipo de Extracción Butt	10
Figura 2.1.	Diagrama de bloques del proceso de obtención de biodiésel a partir de afrecho de café	24
Figura 3.1.	Cambios de la humedad en base seca del afrecho de café en función del tiempo, durante el tratamiento a 70, 90 y 110 °C	38
Figura 3.2.	Cambios de velocidad con respecto a la humedad en base seca en cada período de secado del afrecho de café durante el tratamiento a 70, 90 y 110 °C	39
Figura 3.3.	Porcentaje de aceite de café obtenido durante la extracción del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C	44
Figura 3.4.	Comportamiento de la velocidad de extracción (g/100 g afrecho seco*min) en función del aceite de café obtenido (g/100 g afrecho seco) para las temperaturas de secado de 70, 90 y 110 °C	46
Figura 3.5.	Comparación del contenido de aceite en el residuo de café frente al contenido más alto de aceite en otros materiales destinados a la producción de biodiésel	47
Figura 3.6.	Densidad relativa a 25/25 °C del aceite del residuo de café en cotejo a las densidades de aceites destinados para biodiésel	49
Figura 3.7.	Comparativa del índice de Acidez (mg/g) de aceites destinados a biodiésel y del aceite proveniente del afrecho de café	50
Figura 3.8.	Índices de Saponificación (mg KOH/g) de aceites de diversas materias primas utilizadas para obtención de biodiésel y del aceite del residuo de café	51
Figura 3.9.	Comparativa de Índices de Yodo (cg/g) de aceites para biodiésel y del residuo de café	52
Figura 3.10.	Rendimiento de biodiésel para la relación 4:1 alcohol/aceite y a las relaciones de catalizador de 0,5, 1,0 y 1,5 % de catalizador	54

Figura 3.11.	Rendimiento de biodiésel para la relación 6:1 alcohol/aceite y a las relaciones de catalizador de 0,5, 1,0 y 1,5 % de catalizador	55
Figura 3.12.	Rendimiento de biodiésel para la relación 8:1 alcohol/aceite y a las relaciones de catalizador de 0,5, 1,0 y 1,5 % de catalizador	56
Figura 3.13.	Comparación de la viscosidad cinemática a 37,8 °C (cSt) del biodiésel de café con varios tipos de biodiésel	58
Figura 3.14.	Comparativa de densidades (mg/ml) de tipos de biodiésel comunes y del biocombustible de residuo de café a la temperatura de 15 °C	59
Figura 3.15.	Contraste de los puntos de inflamación (°C) de algunos combustibles y del biodiésel del afrecho de café	60
Figura 3.16.	Número de cetano obtenido del biodiésel de residuo de café frente al número de cetano del biodiésel de girasol, sebo, algodón y soya	61
Figura 3.17.	Diagrama de bloques del proceso de obtención del biodiésel a partir del afrecho de café en la planta	63
Figura AI.1.	Unidad en laboratorio para la extracción de aceite del afrecho de café	83
Figura AII.1.	Unidad preparada en laboratorio para la reacción de transesterificación	84
Figura AXV.1.	Plano vista superior de los equipos y áreas de la planta Marcador no definido.	¡Error!
Figura AXV.2.	Lay-out de equipos para la producción de aceite de café	130
Figura AXV.3.	Lay-out de equipos para la producción de biodiésel	131

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Unidad de extracción	83
ANEXO II	
Unidad de transesterificación	84
ANEXO III	
Informe de resultados del análisis proximal del afrecho de café	85
ANEXO IV	
Propiedades de vapor saturado	86
ANEXO V	
Propiedades físicas del agua a la presión de saturación	87
ANEXO VI	
Datos experimentales del proceso de secado a 70, 90 y 110 °C	88
ANEXO VII	
Datos experimentales del proceso de extracción	94
ANEXO VIII	
Datos experimentales de la velocidad de extracción	98
ANEXO IX	
Pruebas inen para la calidad del aceite de café	100
ANEXO X	
Biodiésel obtenido a partir del afrecho de café	102
ANEXO XI	
Resultados del análisis estadístico del rendimiento del biodiésel	104

ANEXO XII

Informe de resultados de análisis de la calidad del biodiésel 105

ANEXO XIII

Diagrama de bloques de los balances de masa y energía 106

ANEXO XIV

Dimensionamiento de equipos principales para la planta industrial de obtención de biodiésel 117

ANEXO XV

Lay-out de áreas y equipos de la planta industrial 129

RESUMEN

Se realizó el estudio de las condiciones del proceso para la obtención de biodiésel a partir del afrecho de café obtenido de las plantas procesadoras de café soluble de la Compañía de Elaborados El Café C. A.

Se analizaron las temperaturas de secado del afrecho a 70, 90 y 110 °C y los tiempos de extracción que permitieron obtener el mayor rendimiento de aceite de café. Para determinar el porcentaje de aceite extraído, se efectuó la extracción por el método de Butt con hexano como solvente en una proporción (p/v) 1:5, a intervalos de tiempo de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos. El aceite se sometió a caracterización físico – química mediante las pruebas de densidad relativa, índices de acidez, saponificación, yodo y peróxidos. Se determinó que el mejor rendimiento de extracción de aceite (11,25 %) se obtuvo con secado a 110 °C y tiempo de extracción de 45 minutos.

Para determinar el efecto del catalizador y de la relación alcohol/aceite en la transesterificación se planteó un diseño factorial 3^2 con dos réplicas: los factores fueron la cantidad de catalizador y la relación alcohol/aceite, cada uno de estos factores con tres niveles: 0,5, 1,0 y 1,5 % (p/p) y 4:1, 6:1 y 8:1 (mol/mol) respectivamente.

De la transesterificación y análisis estadístico se obtuvo que la interacción del catalizador en la relación 1,5 % p/p con respecto a la masa de aceite utilizada y el metanol en la relación molar 8:1 con respecto al mismo aceite producen un rendimiento en conversión del aceite de café a biodiésel del 97,46 %.

En el biodiésel se analizó las propiedades de: densidad cuyo resultado fue de 25,6 °API, viscosidad cinemática de 6,88 cSt, punto de inflamación de 103,1 °C, índice de Cetano de 41,68, y contenido de agua de 0,3 % V.

Con los datos del afrecho de café que obtuvo el mejor rendimiento de aceite y el proceso con mayor rendimiento de biodiésel luego de la transesterificación se

calcularon los flujos másicos y también los balances de energía para dimensionar los equipos y establecer las áreas que se podrían utilizar en la planta de obtención de biodiésel a partir de afrecho de café.

INTRODUCCIÓN

Las exportaciones de café industrializado en el Ecuador generan un ingreso importante para la economía; pero también generan una gran cantidad de residuos que no son aprovechados completamente. Según el CENICAFE (2010), por cada kilogramo de café en verde se obtiene el 40 % de café industrializado mediante un proceso de extracción que deja un residuo no soluble, denominado afrecho o “concho”, que representa aproximadamente el 10 % del producto en fresco, residuo que no se aprovecha ni genera beneficios. En el año 2014, el Ecuador exportó aproximadamente 58 834,72 toneladas de café industrializado, (ANECAFE, 2014) lo que habría generado para ese mismo año alrededor de 130 743,82 kg de afrecho subutilizado.

El afrecho generado en la producción de café soluble en Ecuador se destina a usos como: abono de plantas o consumo animal, sin embargo, una gran cantidad no tiene uso definido y se acumula o se elimina como desecho sólido, lo que significa un problema ambiental. De ahí la importancia de dar uso a este residuo y producir a partir de este un biocombustible (Figueroa, 2011).

El mercado del biodiésel en el mundo presenta buenas perspectivas y en Ecuador se reporta un incremento en la demanda por parte de países que utilizan este biocombustible. En el año 2006, Estados Unidos importó 45 millones de galones de biodiésel a partir de aceite de palma desde el Ecuador y en el 2007 importó más de 100 millones de galones (Dufey, 2006, p.15). Según datos de la Fundación de fomento de las exportaciones de aceite de palma y sus derivados (FEDAPAL), en el año 2013, el 8 % de las exportaciones de aceite de palma y sus derivados corresponde al biodiésel, y en el año 2014 el porcentaje se incrementó al 17 % (FEDAPAL, 2015).

El biodiésel presenta ventajas respecto a combustibles similares, ya que aporta un mayor contenido de oxígeno y cetanos que el diésel, lo que implica una mejor combustión traducida en una eficiencia energética igual o superior al combustible de origen fósil (IICA, 2007).

El afrecho de café es el producto que resulta de la torrefacción o percolado en la preparación del café soluble. Debido a su composición química tiene un alto contenido de grasas, que pueden extraerse y posteriormente derivar en biocombustible (Valencia, 2000). El biodiésel producido a partir del aceite que se obtiene del afrecho de café es más estable y de lenta degradación que el biodiésel convencional por su alto contenido de antioxidantes (King, 2010, p. 243).

La importancia de la obtención del biodiésel a partir del afrecho de café radica en que se hace uso de un residuo subutilizado rico en aceite al que se le da un valor agregado al transformarlo en biocombustible, y se reduce el efecto negativo que tiene sobre el medio ambiente.

En el presente estudio se determinan las condiciones de secado y extracción de aceite a partir de afrecho de café, el efecto del catalizador y la concentración de alcohol en la etapa de transesterificación y se define un diseño básico de planta para la producción del biocombustible.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. EL CAFÉ

La palabra café tiene diversas raíces etimológicas y se puede decir que proviene de una palabra árabe que puede ser: kahwa, kahua, kaffa o kahoueh, y que tiene variantes de pronunciación y escritura acordes al idioma de cada región. Así en inglés se conoce como coffee, en español como café, en alemán como kaffee, en y en ruso como kophe (Harrison, 1935, p.3).

El café tuvo su origen en África, en Sudán y en el suroeste de Etiopía, más específicamente en un pueblo de la provincia de Kaffa llamado Shoa. Las condiciones climáticas y geográficas de aquellos lugares contribuyeron para que allí naciera de forma silvestre la variedad que se conoce como *Coffea arabica*. Arabia fue el primer destino de esta planta proveniente de Etiopía, donde se dio a conocer como bebida; sin embargo, el primer lugar donde se cultivó el cafeto fue en Yemen. Para evitar que el café se cultivara en otras partes se permitió la comercialización fuera de Arabia únicamente como grano tostado o previamente filtrado (Wagner, 2003, p. 5). En la Tabla 1.1. se presenta la clasificación taxonómica del cultivo del café.

Tabla 1.1. Clasificación taxonómica del cultivo de Café

Taxonomía	Nombre
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Sub división	Angiospermae
Clase	Magnoliata
Sub clase	Asteridae
Orden	Rubiales
Familia	Rubiaceae
Género	Coffea
Especie (s)	arabica, canephora, liberica, etc. (Alvarado y Rojas, 1994, p. 11)

Las especies que se cultivan principalmente con objetivos comerciales son: *Coffea arabica* L., *C. excelsa* y *C. liberica*.

Generalmente, el café es consumido como bebida caliente o fría e incorporado a otros alimentos por su sabor y aroma. También se utilizan sus subproductos y se dan usos alternativos a sus residuos como por ejemplo; la pulpa de café proveniente de la industria sirve como alimento de reemplazo de los concentrados que se proporcionan al ganado vacuno y porcino o como sustrato para el cultivo de setas; el agua residual del extracto de la cereza del café es utilizada en la producción de biogás; la cáscara de café se incorpora como combustible en hornos; y del mucílago del café se obtienen pectinas (International Coffee Organization, 2005, p. 1 - 3).

Producción de café

La producción de café a nivel global se da en más de sesenta países, concentrada la mayor parte en el continente americano. En el año 2012, la producción mundial de café fue de aproximadamente 8 millones de toneladas, 61,7 % correspondiente a la especie arábica y 38,3 % a robusta. Otras especies que se produjeron en menor porcentaje fueron: *Coffea liberica* y *C. excelsa* (ICAFFE, 2012, p. 5 - 11).

Los principales países productores y exportadores de café y sus derivados en orden de importancia en el mundo son: Brasil, Colombia, Vietnam, Indonesia, Suiza, Bélgica, Etiopía y Honduras. Los 3 primeros países llegan a ocupar alrededor del 53 % de la producción mundial (PRO ECUADOR, 2013, p.18; USDA, 2013, p. 1 - 3).

En Ecuador se producen las siguientes especies de café: arábigo natural y lavado, (bourbón, típica, caturra, catuaí, catimor, pacas, sachimor) y robusta; en presentaciones en verde, tostado, soluble o instantáneo (PRO ECUADOR, 2013, p. 6).

Las variedades arábicas y robusta se producen en el país desde 1830 y 1950 respectivamente. En el Ecuador las principales zonas de producción de ambas variedades se muestran en la Figura 1.1.

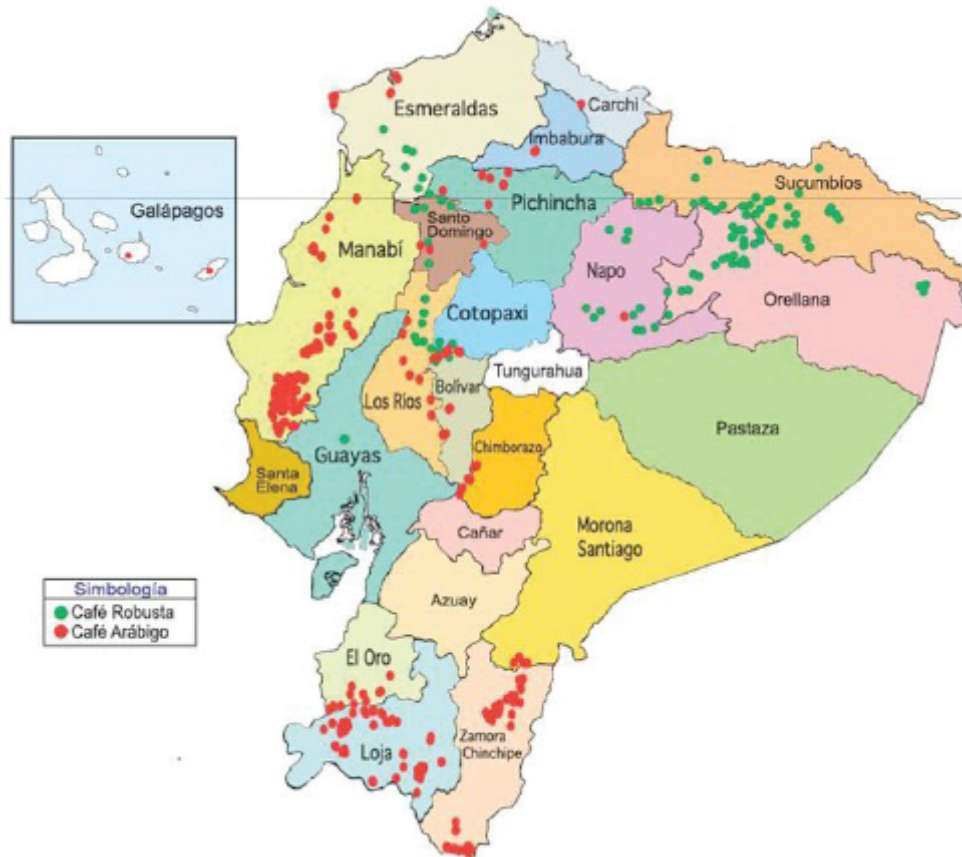


Figura 1.1. Principales zonas cafetaleras del Ecuador
(PRO ECUADOR, 2013, p.7)

El área destinada al sector cafetalero en Ecuador es de 199 215 ha, el área cosechada de 149 411 ha, considerando que hay cafetales abandonados se estima que solo el 75 % del área total corresponde a cafetales en producción que se cosechan. La producción nacional para el año 2012 fue de 39 000 ton/año con un porcentaje del 62 % para la variedad robusta y 38 % para la arábica y la capacidad instalada de la industria de 72 000 ton/año (PRO ECUADOR, 2013, p. 5 - 6).

La oferta exportable del sector cafetalero incluye el grano en bruto tostado y sin tostar y sus derivados o café industrializado. En la Tabla 1.2. se muestra la evolución de las exportaciones del café industrializado.

Tabla 1.2. Exportación de café industrializado del Ecuador del 2009 al 2014 por sacos de 60 kg

Años	Industrializado	
	Sacos	Dólares
2009	690 643	99 036 730
2010	806 049	111 983 813
2011	939 112	151 427 867
2012	1 097 452	198 440 132
2013	1 060 447	186 759 310
2014	980 579	126 953 936

(ANECAFE, 2015, p. 1)

Según ANECAFE (2015) entre las principales empresas productoras de café industrializado (soluble) se encuentran: El Café C.A., Solubles Instantáneos C. A., y Gusnobe S. A. (p. 1). La producción exportable de café soluble de la empresa El Café C. A. fue de 401 578 sacos de 60 kg de enero a diciembre del 2014 (ANECAFE, 2015, p. 1).

En la industrialización del café se generan residuos en cada etapa de su procesamiento, como lo son: la pulpa, el mucílago, el cisco de café, los ripios y el café deteriorado, que pueden ser utilizados directamente como combustibles, y para producir biogás y bioetanol. Otro residuo que se genera en las fábricas productoras de café soluble es el afrecho de café que puede utilizarse como combustible directo, para la producción de biogás, bioetanol y biodiésel (Cenicafé, 2010, p. 2 – 5).

El afrecho de café es el residuo generado durante la fabricación del café soluble, que se produce durante el proceso de extracción y corresponde a la parte insoluble del grano. Su composición química indica un alto contenido en grasas del 15,2 al 17,9 % según sea la especie de café (Fan y Soccol, 2005, p. 92).

En la industrialización del café se genera de 0,33 a 0,45 kg de café soluble por cada kilogramo de granos que se procesa, la parte restante lo constituyen los residuos,

entre los que se encuentra el afrecho que representa alrededor del 10 % del peso de los granos de café a industrializarse. (Acevedo et al, 2013, p. 1).

1.2. GRASAS Y ACEITES

Las grasas y aceite son biomoléculas de origen animal o vegetal obtenidas a través de procesos de extracción físicos o químicos como prensado o extracción por solventes orgánicos tales como el éter, hexano, cloroformo, benceno, metanol, o mezclas de cualquiera de ellos. Se constituyen en un grupo muy heterogéneo cuya característica principal es su escasa polaridad (Primo, 1995, p. 927).

Las grasas son lípidos que se encuentran en condiciones normales en estado físico sólido. La diferencia primordial con los aceites que se encuentran en estado líquido, se establece por la estructura de los ácidos grasos en los ésteres de los que forman parte. Debido a que comercialmente se requieren grasas vegetales para su uso a nivel alimentario como mantequillas y mantecas, estas se obtienen mediante la hidrogenación de los aceites (Acuña, 2006, p. 290).

Los aceites son sustancias orgánicas que se presentan en estado líquido a condiciones ambientales y se encuentran formadas por mezclas de triglicéridos de ácidos grasos y ésteres de glicerina, acompañados en menor porcentaje de diglicéridos, monoglicéridos, ácidos grasos libres, vitaminas solubles, fosfolípidos, entre otros compuestos que durante la refinación son removidos o eliminados. El uso de una grasa o aceite va ligado a su disponibilidad en cuanto a cantidad y al producto que se requiere obtener. En la fabricación de biodiésel tanto grasas como aceites pueden producir biocombustible de buena calidad (Bailey, 1984, p. 4; Gunstone, 2004, p. 1).

1.2.1. ACEITES PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL

La materia prima idónea para la obtención del biodiésel puede ser cualquiera que posea triglicéridos en su composición. De acuerdo con Agudelo, Benjumea y Rios

(2009) y García y García (2006), entre los aceites utilizados se encuentran (p. 10 - 11; p. 35 - 38) los siguientes:

- Aceites vegetales convencionales: colza, soya, girasol, palma africana
- Aceites vegetales alternativos: cardo, piñón, mostaza etiópica, camelina, caucho, coco, higuera, cártamo
- Aceites de fritura usados
- Subproductos de las industrias de aceites comestibles y papelera
- Aceite de micro algas
- Aceite de producciones microbianas
- Aceite de pescado, cebo de res, manteca de cerdo, subproductos de la industria avícola

La materia prima para la obtención de biodiésel debe cumplir ciertas características importantes como: que su contenido de aceite justifique su elección y uso, y que su propósito fundamental no sea la alimentación. Así también el aceite extraído y destinado a la transformación en biodiésel debe cumplir características físicas y químicas que permitan una fácil transesterificación, reducción de productos no deseados como el glicerol, y un porcentaje de conversión alto, superior al 90 % de aceite en biodiésel (Moreira, 2012, p. 54 - 56).

Existen algunos parámetros que dan cuenta de la factibilidad para usar un determinado aceite para la producción de biodiésel. Estos parámetros son los siguientes:

Densidad

La densidad del aceite indica la presencia de agua y sedimentos que influirán en la eficiencia de la conversión a biodiésel. Y es una medida que indica la relación directa con el grado de insaturación y disminuye si el peso molecular del ácido graso aumenta. Para los aceites es conveniente conocer la densidad relativa. (Bailey, 1984, p. 65).

Índice de acidez

El índice de acidez expresa el nivel de descomposición del aceite. Para neutralizar la acidez libre de una muestra, es necesaria una cantidad en mg de hidróxido de sodio por gramo de muestra y es a la cantidad en mg de NaOH a la que se define como índice de acidez (Bolaños, Herrera y Lutz, 2003, p. 28).

El índice de acidez influye al momento de obtener biodiésel. Cuando los ácidos grasos libres del aceite reaccionan con el catalizador durante la reacción de transesterificación, se obtiene como resultado la formación de jabones, y en consecuencia un rendimiento bajo del combustible (Castillo, Castro y Coello, 2007, p. 101).

Índice de Saponificación

Medida de la cantidad de hidróxido de potasio en mg que se requiere para saponificar un gramo de aceite. Este valor puede ser usado para conocer el peso promedio de un aceite debido a que tres moléculas de KOH saponifican una molécula de triglicérido, del conocimiento de este índice se evitarán reacciones secundarias de saponificación en la transesterificación (Castillo, Castro y Coello, 2007, p. 104).

Índice de Yodo

Da una idea del grado de insaturación de un ácido graso de un aceite y se expresa en centigramos de yodo por gramo de aceite. Existe una relación proporcional entre el número de insaturaciones y la cantidad de yodo que se fija a éstas. Lo óptimo es tener un aceite con un bajo índice de yodo, que permita fabricar un biodiésel con una buena estabilidad a la oxidación (Castillo, Castro y Coello, 2007, p. 103).

Índice de Peróxidos

Los hidroperóxidos, se conocen como peróxidos, que se forman como productos primarios en la rancidez de los aceites. Este índice mide solo la fase inicial de oxidación y se expresa en mmol de yodo por kg de aceite o grasa. Este índice indicará si el biodiésel obtenido permitirá una combustión más completa y a su vez la reducción de emisiones de CO₂ (Bolaños, Herrera y Lutz, 2003, p. 29; Castillo, Castro y Coello, 2007, p. 102 - 103).

1.2.2. EXTRACCIÓN DE ACEITE PARA BIODIÉSEL

La extracción de aceite para biodiésel se da según el contenido de aceite presente en la materia prima. Si el aceite se obtiene por prensado y el contenido está sobre el 20 % de aceite, se considera un valor alto y adecuado para la obtención de biodiésel. El contenido de aceite en el afrecho de café es del 15,2 al 17,9 % y se hace necesario el uso de solventes. Comercialmente para obtener una mayor cantidad de aceite y no dejar remanentes se utiliza la combinación de extracción por prensado y solventes (Chakrabarty, 2009, p. 215).

La extracción por solventes también se conoce como extracción sólido - líquido, la cual es una operación en donde un constituyente o componente soluble de un sólido se separa de éste al entrar en contacto con un solvente, en este caso el constituyente soluble es el aceite de café. Esta operación puede ser realizada en forma continua o discontinua (batch).

Según Tojo y Ocón (1980) para que esta operación se lleve cabo debe ocurrir lo siguiente (p. 208):

- Que el sólido entre en contacto con el solvente.
- Que exista la separación de la mezcla solvente - componente o extracto, del sólido agotado o lodos.

El solvente que mayormente se utiliza en la extracción de aceites es el hexano, por su bajo punto de ebullición de 68,6 °C, lo cual supone una ventaja en el momento de separarlo del extracto; en cualquier proporción es miscible con los aceites vegetales, y produce aceites más puros (Dutta, 2007, p. 477).

Como se observa en la Figura 1.2., el principio de esta operación se basa en la difusión de las moléculas del aceite entre el sólido C_s y el líquido C_l por la diferencia de las concentraciones. Durante la extracción no solo ocurre la difusión del soluto dentro del sólido sino también el lavado fuera de la superficie del sólido, la solubilización y la separación del extracto (Hartel y Heldman, 1999, p. 243).

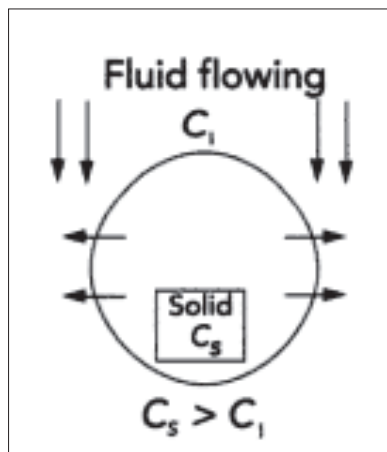


Figura 1.2. Difusión del soluto del sólido hacia el solvente
(Hartel y Heldman, 1999, p. 243)

Para la obtención de aceite del afrecho de café se recurre a una forma de extracción por percolación denominada método de Butt, donde se vierte un líquido sobre la materia a extraer. El proceso se realiza en un tubo de vidrio llamado Butt, en el cual se ubica la muestra de la cual se va a separar el soluto o aceite. Por la parte inferior del tubo va acoplado un balón con el solvente en su interior. Y por la parte superior del tubo Butt va acoplado un tubo refrigerante. El proceso de extracción inicia cuando el solvente caliente o en su punto de ebullición pasa a través de la muestra y se dirige hacia la parte superior donde se encuentra el refrigerante, para luego retornar percolándose por la masa a extraer, por gravedad. El solvente que retorna hacia el balón lleva consigo una porción del aceite que logra extraer de la muestra. El solvente debe realizar varias veces el mismo ciclo de percolación para

que se logre extraer la mayor cantidad del aceite de la muestra. La miscela formada por el aceite y el hexano luego se separa por destilación (Bailey, 1984, p. 451 - 453).

En la Figura 1.3. se expone el sistema para la extracción del aceite a partir del afrecho de café.

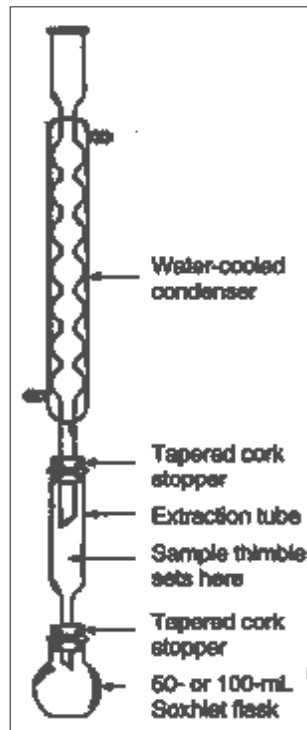


Figura 1.3. Equipo de Extracción Butt
(Luthria, 2004, p. 103)

1.3. BIODIÉSEL

En la actualidad, para la conversión de aceite en biodiésel, se realiza el mismo proceso de transesterificación que fue realizado en 1853 por E. Duffy y J. Patrick, científicos que desarrollaron esta reacción con el propósito de disminuir la viscosidad de los aceites. En 1893 Rudolph Diesel publicó un artículo en el que se detallaba la teoría y construcción de un motor de combustión interna que en 1900 se exhibió en la Exposición Mundial de París. Para el funcionamiento de este motor se utilizó como combustible aceite de maní. Es así que el motor diésel fue

concebido en sus inicios para trabajar con aceites vegetales (Castillo, Castro, Coello, 2007, p. 40 - 41; Demirbas, 2008, p. 112 - 113).

Transcurrido alrededor de un siglo, los motores diésel se perfeccionaron y ya utilizaban los excedentes de destilado del petróleo, convertidos en gasolina por su menor viscosidad y costo, en comparación con los aceites vegetales (Castillo, Castro, Coello, 2007, p. 40 - 41; Demirbas, 2008, p. 112 - 113).

Durante el siglo XX, se realizaron experimentos con aceites de colza y piñón obteniéndose buenos resultados. A finales de ese siglo, la preocupación por el cambio climático y la búsqueda de nuevas alternativas a los derivados de petróleo impulsó nuevamente la idea de usar los aceites, pero esta vez bajo el nombre de biodiésel. A partir del año 2004, con el incremento de los precios del petróleo, se equiparó el valor del diésel al de los aceites, lo que promovió la investigación en la obtención del biocombustible de diversas fuentes vegetales y animales (Castillo, Castro, Coello, 2007, p. 40 - 41; Demirbas, 2008, p. 112 - 113).

El biodiésel se define como un biocombustible líquido o éster mono alquílico de ácidos grasos de cadenas largas, obtenido por un proceso llamado transesterificación y producido a partir de aceite de origen vegetal o animal (Acosta, Castro y Cortijo, 2008, p. 7; García y García, 2006, p. 7; IICA, 2010, p. 32).

Este biocombustible presenta ventajas como:

- Es un biocarburante de origen renovable, orgánico y no tóxico que puede reemplazar a los combustibles de origen fósil, lo cual representa una contribución al mantenimiento del medio ambiente.
- La combustión del biocombustible en los motores de ignición por compresión o motores diésel, presenta gases con una menor cantidad de aldehídos y monóxido de carbono. Su uso en lugar del diésel, reduce entre un 60 a 90 % los hidrocarburos totales no quemados (IICA, 2010, p. 8).

- Puede ser producido por aceites que no son destinados para consumo humano o animal, tales como aceites quemados o aceites provenientes de residuos de procesos en las industrias de alimentos (IICA, 2010, p. 8).

De acuerdo con Romano y Sorichetti (2010) el biodiésel presenta desventajas como (p. 8):

- Tiene alto punto de nube o temperatura a la cual se forman cristales en el biocombustible, lo que en climas fríos es un inconveniente.
- Menor contenido energético.
- Oxidativamente menos estable y puede formar sedimentos.
- Emisiones de óxido nitroso superiores.
- Causa problemas en las válvulas y sistemas de inyección de los motores.
- En estado puro puede degradar el plástico de las mangueras.

1.3.1. SITUACIÓN DEL BIODIÉSEL EN EL MERCADO

Según Dufey (2006) la producción de cantidades significativas de biodiésel desde 1990 ha ido en aumento. Los principales productores en el mundo son (p. 17):

- La Unión Europea con participación del 77 %
- Estados Unidos, producción del 10 %
- Brasil, producción del 10 %

En el contexto nacional aún no existe un sector industrial consolidado de biodiésel. La Fabril S.A. es la única empresa productora que obtiene biodiésel a partir de palma africana. Los subsidios del estado al diésel han ocasionado que esta industria no se desarrolle (IICA, 2010, p. 176).

En el año 2005 se dio inicio a las exportaciones de biodiésel desde el Ecuador hacia los Estados Unidos. Las cantidades exportadas fueron de 45 millones de galones

en el 2006 y en el 2007 más de 100 millones de galones, y con el potencial para diversificar las exportaciones al mercado europeo (Dufey, 2006, p. 15).

Para incentivar la industria de biocombustibles, el Ministerio de Energía creó el Programa Nacional de Biocombustibles (PNB) que busca promover el uso de biodiésel en territorio ecuatoriano para la producción, distribución y comercialización en libre competencia y en igualdad de condiciones, por personas naturales o jurídicas, mediante el establecimiento de políticas y mecanismos de concertación y coordinación entre el sector público y privado, vinculados a la producción y comercialización de biocombustibles (IICA, 2010, p. 183).

1.3.2. PROPIEDADES DEL BIODIÉSEL

De acuerdo al origen de la materia prima y al proceso de producción se obtiene un biocombustible con características propias:

Viscosidad

El biodiésel presenta una viscosidad ligeramente más alta que la viscosidad del diésel de petróleo. El diésel de petróleo a su vez presenta una viscosidad mucho menor que la del aceite del cual es proveniente el biodiésel.

La presencia de una cantidad superior de dobles enlaces trans en un éster de ácido graso da como resultado una viscosidad alta en comparación con la viscosidad de compuestos con un mayor número de dobles enlaces cis. De igual forma, un número mayor de grupos CH₂ en un éster también muestra una viscosidad mayor. Por lo tanto, la viscosidad del éster depende de la longitud de la cadena, el número de dobles enlaces y su naturaleza (Ching y Jei-Fu, 2008, p. 38 - 39).

La viscosidad cinemática para el biodiésel según las especificaciones de la norma ASTM D445 debe estar entre el rango de 1,9 – 6,0 mm²/s a 40 °C y según las

normas europeas ISO 3104 e ISO 3105 de 3,5 – 5,0 mm²/s a 40 °C (Moser, 2009, p. 233; National Renewable Energy Laboratory, 2008, p. 11).

Densidad

El valor de la densidad depende de la pureza de los ácidos grasos y de su composición, también se encuentra en relación indirecta con el aumento de dobles enlaces y grupos OH (Sarin, 2012p. 41).

Punto de inflamación

Esta propiedad se define como la temperatura mínima a la cual un biocombustible líquido emana vapores que se mezclan con el aire y se inflaman. También indica la presencia de metanol en el biodiésel, a medida que se incrementa el alcohol residual el punto de inflamación disminuye. Este valor constituye en un indicador de calidad, requerimientos legales y de seguridad durante la manipulación y almacenamiento del biocombustible (Sarin, 2012, p. 35 - 36).

Número de Cetano

El número o índice de cetano como propiedad se relaciona con el tiempo que requiere el biodiésel para encender luego de la inyección en un motor de combustión interna y de la capacidad para arrancar en frío, por lo que da una medida de la calidad de ese encendido o de su tiempo de retardo, nivel de rendimiento y de una química favorable del biocombustible para el autoencendido (Ching y Jei-Fu, 2008, p. 86; Rand, 2003, p.48).

Debido a un alto contenido de oxígeno en el biodiésel éste presenta un mayor número de cetano en comparación con el diésel de petróleo (Ravicumar y Sivaramakrishnan, 2012, p. 206).

Materias primas pobres en su composición de ácidos grasos saturados producen biocombustibles con un menor índice de cetano al contrario de aquellas con niveles altos de estos ácidos. El autoencendido se da en menor tiempo en combustibles líquidos con altos números de cetano mejorando de esta forma la calidad de la reacción (Sarin, 2012, p. 126; Wauquier, 2004, p. 216 - 217).

Contenido de agua

En la purificación del biodiésel durante la etapa de lavado quedan residuos de agua que son reducidos al mínimo en el secado, pero en el almacenamiento el biodiésel al ser higroscópico absorbe agua que tiende a causar daños en el sistema de combustible del motor, además corroe los sitios de almacenamiento, si hay detergente forma emulsiones y dificulta su limpieza (Sarin, 2012, p. 126; Wauquier, 2004, p. 39).

1.3.3. OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

El biodiésel se obtiene por un proceso químico llamado transesterificación o alcoholisis; el biodiésel así obtenido puede ser usado sólo o en mezclas con diésel de petróleo (Romano y Sorichetti, 2010, p.7).

En la reacción de transesterificación intervienen alcoholes de bajo peso molecular más las moléculas de triglicéridos para dar como resultado la separación de las cadenas de ésteres de la molécula de glicerina. Se lleva a cabo en una relación de 3 moles de alcohol por 1 mol de triglicérido. Para que sea favorable la formación del éster se añade una cantidad mayor de alcohol (Larosa, 2000, p. 4 - 5).

Pueden ser usados el metanol y etanol. El primero de los alcoholes es de un costo menor, su temperatura de ebullición es baja, es el más utilizado debido a su polaridad y presenta mayor reactividad. El etanol tiene el problema de presentar emulsiones durante la reacción (Kafarov, Moreno y Plata, 2009, p. 38; Torossi, 2006, p. 45).

Químicamente, la transesterificación consta de tres reacciones reversibles y consecutivas en cada una de las cuales se libera una mol de éster (García y García, 2006, pág. 40).

Para mejorar la velocidad de la reacción de transesterificación así como el rendimiento final de biodiésel es necesario el uso de catalizadores. Un catalizador interviene para que la reacción sea propicia de forma cinética en un periodo de tiempo menor (García y García, 2006, pág. 40).

Los catalizadores empleados en reacciones de transesterificación son: ácidos y básicos, estos últimos pueden ser homogéneos o heterogéneos. El uso de uno u otro catalizador dependerá del método de obtención del biodiésel y de las características del aceite (García y García, 2006, p. 41).

Mediante catálisis básica homogénea se logran conversiones de aceite en biodiésel a condiciones atmosféricas en un tiempo de 60 minutos aproximadamente, pero se requiere que tanto el alcohol como el aceite sean anhídridos. Estos catalizadores pueden ser: KOH y NaOH. El uso de catalizadores ácidos homogéneos está orientado a procesos de pre esterificación de aceites con un índice de acidez elevado. Las reacciones con este tipo de catalizador requieren de mayor tiempo y temperatura. Estos catalizadores son: H_2SO_4 , H_3PO_4 y HCl (ARPEL, Ganduglia y IICA, 2009, p. 6 - 7; García y García, 2006, p. 41 - 45).

También existen los catalizadores heterogéneos que demandan presiones y temperaturas severas, entre sus ventajas se encuentran: mayor conversión, facilidad de separación y purificación. Las zeolitas y resinas sulfónicas son ejemplos de este tipo de catalizadores (ARPEL, Ganduglia y IICA, 2009, pág. 41)

Entre los catalizadores más utilizados a escala industrial por su alto porcentaje de conversión son: ácido sulfúrico, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. El empleo de ácido sulfúrico en una catálisis ácida homogénea se da a escala industrial, y para conseguir conversiones altas se requieren relaciones molares significativas

que además provocan la corrosión de los equipos que se utilizan para la transesterificación (Kafarov, et al., 2009, p. 38).

La potasa cáustica facilita la formación del metóxido y tiene un alto grado de transformación del aceite. La glicerina que se obtiene se puede usar como fertilizante (Acosta et al., 2008, p.8).

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES

Se empleó afrecho de café obtenido de las industrias elaboradoras de café soluble ubicadas en las provincias de Guayas y Manabí en el Litoral Ecuatoriano. La materia prima fue recolectada, mezclada y almacenada.

Para la extracción del aceite del afrecho de café se empleó hexano como solvente, mientras que para los diferentes ensayos de transesterificación se utilizó metanol y un catalizador homogéneo básico. Las características de estos reactivos se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de los reactivos utilizados en los procesos de obtención del biodiésel

REACTIVO	PM (g/mol)	PUREZA (%)	PROVEEDOR
Hexano	86,17	96	Shell Chemical Company
KOH	56,11	84	E. Merck
Metanol	32,04	99	LabGuard

2.2. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SECADO Y EXTRACCIÓN DE ACEITE A PARTIR DE AFRECHO DE CAFÉ

2.2.1. SECADO

Para determinar las condiciones óptimas de secado y extracción del aceite a partir del afrecho de café, primero se realizó una caracterización química del afrecho de café, mediante la determinación de humedad, proteína, extracto etéreo y cenizas a través de los métodos AOAC: 934.01, 2001.11, 920.39 y 923.03 respectivamente y carbohidratos totales por diferencia. Para la caracterización se envió el afrecho de café al Departamento de Ciencia de Alimentos y Biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional para su caracterización.

Una vez caracterizada la materia prima, se determinaron las condiciones de secado del afrecho. Se obtuvieron curvas de secado a 70, 90 y 110 °C en una estufa P. Selecta con circulación de aire caliente.

Para cada proceso de secado se utilizaron 100 gramos de afrecho, se registró la pérdida de peso y humedad en una balanza digital A. E. Adam cada 15 minutos, hasta llegar a peso constante. Se realizaron 3 repeticiones y con los datos obtenidos se construyeron la curva que relaciona la humedad en función del tiempo y la curva que relaciona la velocidad de secado en función de la humedad para cada temperatura establecida.

Las muestras secas fueron molidas en un molino de disco manual marca Corona, a fin de que las partículas del afrecho presentaran uniformidad y facilidad para la extracción.

2.2.2. EXTRACCIÓN DE ACEITE DE CAFÉ

Para cada condición de secado se efectuó la extracción de aceite de café por el método de Butt en una unidad experimental adaptada para tal propósito como se observa en el Anexo I. La relación café seco y solvente fue 1:5 (p/v), en tanto que los intervalos de tiempo de extracción fueron 10, 15, 20, 30 y 45 minutos (Dutta, 2007, p. 477 - 482).

Se determinaron la temperatura de secado y el tiempo de extracción que permitieron obtener el mayor rendimiento de aceite de café; expresado como gramos de aceite por gramos de afrecho seco.

Adicionalmente, se evaluó la extracción de aceite en una muestra húmeda, para lo cual se prepararon, por separado, cartuchos de extracción con aproximadamente 20 gramos del afrecho de café seco y también cartuchos con 20 g de afrecho de café húmedo a fin de comparar resultados en la obtención de aceite. Se cubrió cada cartucho con un tapón de algodón y se colocaron en el interior de un tubo Butt.

Se armó la unidad de extracción, conformada por el balón con el hexano, el tubo Butt con el cartucho y la muestra, y por la parte superior del tubo Butt se acopló un tubo refrigerante.

Luego de la extracción, la mezcla obtenida se dispuso en un equipo de destilación para separar el aceite del solvente.

La destilación concluyó cuando el solvente se evaporó y quedó el aceite. Se retiró el balón con el aceite, se dejó enfriar y se procedió a pesar para verificar la cantidad de aceite obtenido.

2.2.3. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS DEL ACEITE DE CAFÉ

El aceite crudo de café obtenido se sometió a una caracterización físico-química. Las propiedades evaluadas y normas utilizadas para cada una se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades evaluadas en el aceite de café de acuerdo con las normas INEN

PROPIEDADES	NORMA INEN NTE
Densidad relativa	0035:73
Índice de acidez	0038:73
Índice de saponificación	0040:73
Índice de yodo	0037:73
Índice de peróxidos	0277:78

(INEN, 2001)

2.3. DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL CATALIZADOR Y LA CONCENTRACIÓN DE ALCOHOL EN LA ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

Para determinar el efecto del catalizador y de la relación alcohol/aceite en la transesterificación, se planteó un diseño experimental factorial 3^2 con tres réplicas, los factores fueron: la cantidad de catalizador y la relación alcohol/aceite, cada uno de estos factores con tres niveles; 0,5; 1,0 y 1,5 % p/p para el catalizador y 4:1, 6:1, 8:1 para la relación alcohol/aceite; la variable de respuesta fue el rendimiento del biocombustible expresado como la masa del producto final en función de la masa de aceite utilizado.

La transesterificación alcalina se llevó a cabo de la siguiente manera:

El aceite de café se calentó a una temperatura de 65 °C, para evitar la formación de jabones y favorecer la velocidad de la reacción (Torossi, 2006, p. 45).

Como catalizador en la formación de metóxido de potasio, se utilizó hidróxido de potasio porque permite su utilización en condiciones de temperatura y presión moderadas requeridas para la reacción, por ofrecer altos rendimientos en periodos de tiempo cortos y además porque permite la separación eficiente de la glicerina (Nimcevic et al., 2000, p. 275 - 276).

El metanol fue el alcohol empleado en la transesterificación debido a sus propiedades físicas y químicas favorables para la reacción (Fukuda et al., 2001, p. 406).

En la formación del metóxido de potasio, se ensayaron tres cantidades de catalizador: 0,5, 1,0 y 1,5 % p/p con respecto a la masa de aceite utilizada, tomando como referencia que para la transesterificación de otros tipos de aceites se sugiere 1,0 % p/p de catalizador (Torossi, 2006).

El metanol se ensayó en relaciones molares de 4:1, 6:1 y 8:1 con respecto al aceite, por experiencias en trabajos de investigación con diferentes relaciones en transesterificación alcalina de aceites de origen vegetal (Fukuda et al., 2001, p. 408).

La reacción de transesterificación se realizó en un reactor de vidrio, como el indicado en el Anexo II. Se colocó en el reactor un agitador magnético y 150 gramos de aceite de café, se montó el reactor sobre una plancha con agitación. Cuando se alcanzaron los 65 °C se añadió el catalizador disuelto en el alcohol al balón y se acopló el refrigerante. La reacción se mantuvo por una hora con temperatura y agitación controladas.

Concluido el tiempo se detuvo la agitación, se retiró el refrigerante y se transfirió la mezcla a un embudo de decantación para separar la glicerina del biodiésel.

Los ésteres metílicos obtenidos se sometieron a una etapa de lavado con agua destilada, en volúmenes iguales de agua y biodiésel, por tres veces, con el fin de remover jabones producidos durante la transesterificación (Castillo et al., 2011, p. 39).

Se empleó el programa Statgraphics Centurion XV para el análisis estadístico de la influencia de los niveles de catalizador y alcohol sobre el rendimiento del biodiesel.

Para analizar simultáneamente el efecto del catalizador y alcohol sobre el rendimiento del biodiésel se realizó un ANOVA de dos vías.

Análisis del biodiésel

Se evaluó la calidad del biodiésel obtenido de la mejor conversión del aceite de café, en función de las normas ASTM D 287 (2000), D 445 (2003), D 93 (2006), D 976 (2007), D 4006 (2011). Para densidad API, viscosidad cinemática, punto de inflamación, índice de cetano y contenido de agua, respectivamente (ASTM).

Para la determinación de cada propiedad, se envió el biodiésel al Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación de la Facultad de Química de la Universidad Central del Ecuador.

2.4. DISEÑO BÁSICO DE LA PLANTA

Se realizó un diseño básico de una planta de obtención de biodiésel para una capacidad de procesamiento de 260 ton/mes de afrecho que resultan como residuos del proceso de filtración de 748 ton/mes de café que se procesan en las plantas industriales de la Compañía de Elaborados El Café C.A.

La planta trabajará de forma continua 24 horas durante los 365 días del año.

A partir de la producción anual del afrecho de café se estimó las producciones mensuales, diarias y por hora que la planta será capaz de transformar en el producto objetivo del proyecto.

Para obtener el dimensionamiento de los equipos se realizó el balance de masa y energía a partir del diagrama de bloques presentado en la Figura 2.1.

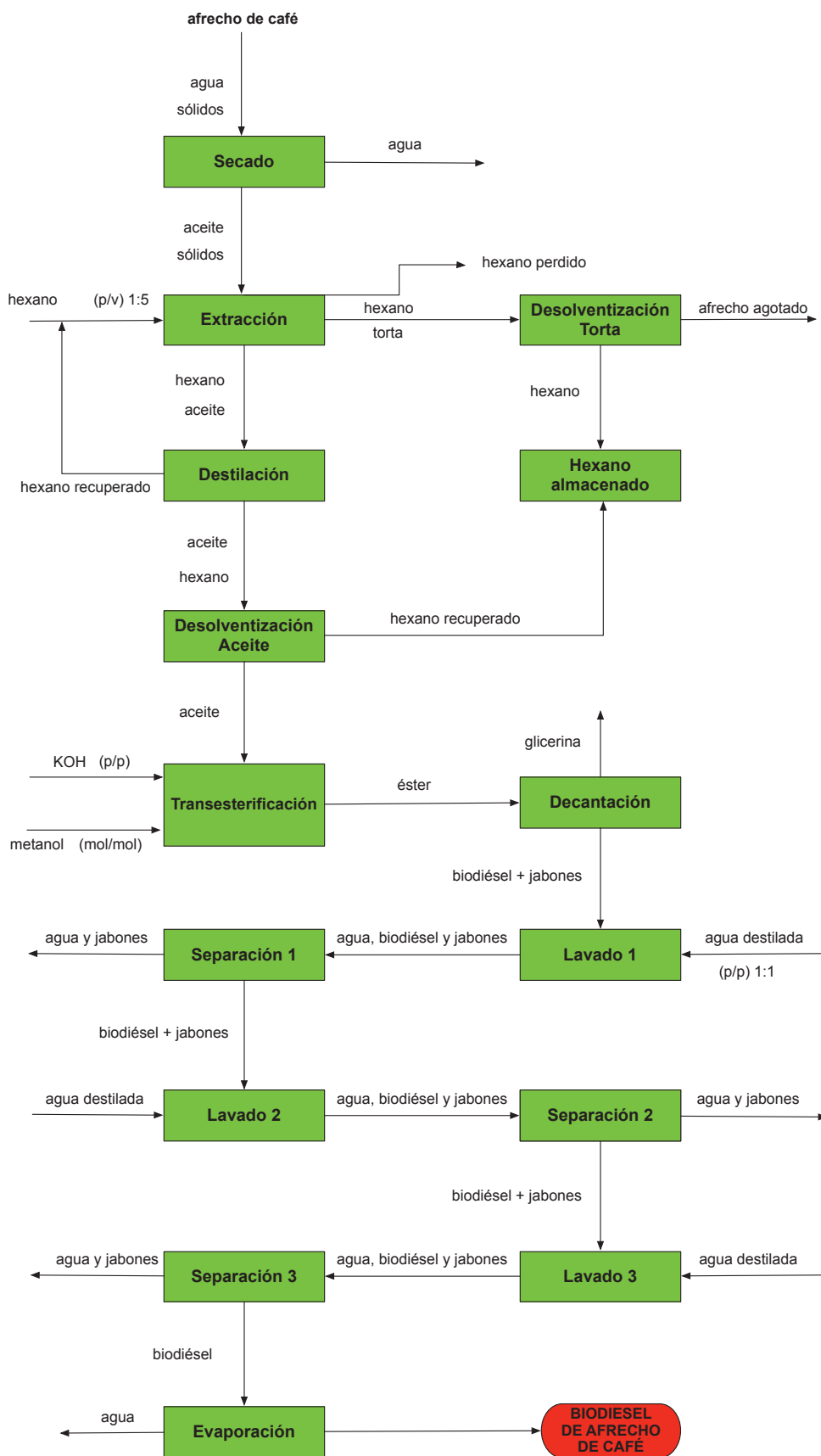


Figura 2.1. Diagrama de bloques del proceso de obtención de biodiésel a partir de afrecho de café

A continuación, se describe cada unidad operativa para la obtención de biodiésel a partir de afrecho de café:

Secado

En esta etapa se suministra calor para la eliminación del agua del afrecho de café a fin de reducir el contenido de humedad que afectaría la etapa de extracción (Coulson y Richardson, 1981, p. 911).

Extracción

En la extracción se obtiene el aceite del afrecho de café por percolación, a través del uso de hexano como solvente y el método Butt (Costa, Cervera, Cunill, Esplugas, Mans, Mata, 2004, p. 49 - 50).

Destilación

Se separa el aceite del hexano por diferencias en el punto de ebullición. El hexano se recupera para su reutilización y el aceite para la transesterificación (Gómez y Valcárcel, 1988, p. 157).

Desolventización

El objetivo de esta etapa es remover el residuo de solvente de la torta como en el aceite y de esta forma recuperar el solvente. La torta representa el afrecho agotado del que no se puede extraer más aceite (Béjar, 2014, p. 196).

Transesterificación

Se realiza la reacción del aceite con metanol para obtener biodiésel, en presencia de hidróxido de potasio como catalizador (Allinger, Cava, Jongh, Level y Stevens, 1984, p. 740).

Decantación

Se realiza la separación física del producto de la transesterificación en: biodiésel y glicerina por diferencia en sus densidades (Villa, 2007, p. 75).

Lavado

Se realiza el lavado del biodiésel con agua destilada para separar residuos como jabones o glicerina a fin de purificar el producto final.

Separación

En esta etapa se realiza la separación del agua y residuos del biodiésel mediante varias etapas de decantación luego de cada lavado.

Evaporación

Se suministra calor a fin de eliminar residuos de agua adheridos al biodiésel.

CRITERIOS DE DISEÑO

Se consideraron criterios de diseño con base en datos obtenidos experimentalmente y otros tomados de bibliografía para cada una de las etapas.

Secado

Se tomó en cuenta el flujo másico de afrecho de café a la entrada de esta etapa del proceso. Se consideró el calor específico (C_{p_a}) del afrecho de café y el análisis proximal del afrecho que se presenta en el Anexo III. El C_{p_a} se calculó mediante la ecuación empírica presentada por Helman y Sing (1997), que se muestra en 2.2. Para determinar el calor necesario se utilizó la ecuación 2.3 en la que el gradiente de temperatura está dado por las temperaturas inicial o de ambiente de 25 °C y la temperatura de secado del afrecho con la que se obtuvo la mayor cantidad de aceite p. 153 - 154:

$$C_{p_a} = 1,424 m_c + 1,549m_p + 1,675m_f + 0,837m_a + 4,187m_m \quad [2.2]$$

Donde:

m_c : hidratos de carbono (%)

m_p : proteínas (%)

m_f : grasa (%)

m_a : cenizas (%)

m_m : humedad (%)

$$Q_a = (m_a * C_{p_a} * \Delta T) \quad [2.3]$$

Donde:

Q_a : calor de calentamiento del afrecho de café (kJ/h)

C_{p_a} : calor específico del afrecho de café (kJ/Kg °C)

m_a : masa de afrecho (kg/h)

ΔT : gradiente de temperatura (°C)

Extracción

En la extracción, el aceite de café se separa del afrecho, y pasa a formar parte de una solución con hexano llamada miscela. La relación de extracción se obtuvo mediante pruebas preliminares, y correspondió a 1:5 peso de afrecho por volumen de solvente, esto significa que por cada 20 g de afrecho se utilizaron 100 mL de hexano. Esta relación fue considerada al momento de calcular los flujos másicos a nivel industrial.

Se consideró el flujo másico de afrecho de café que fue secado a la temperatura con la que se obtuvo la mayor cantidad de aceite. También se tomó en cuenta la cantidad de solvente a la entrada y salida de esta etapa del proceso. El calor específico del hexano (C_{p_h}) según Sharapin (2000), es de 2,26 kJ/kg °C, a la temperatura de ebullición del hexano de 69 °C (p. 38). El solvente en esta etapa es calentado con el calor que cede el vapor de agua en el intercambiador. El hexano calentado hasta su temperatura de ebullición humedece el afrecho de café. Para calcular el calor de calentamiento del hexano se aplicó la fórmula de calor 2.4.

$$Q_{c_h} = (m_h * C_{p_h} * \Delta T) \quad [2.4]$$

Donde:

Q_{c_h} : calor de calentamiento del hexano (kJ/h)

C_{p_h} : calor específico del hexano (kJ/kg °C)

m_h : masa de hexano (kg/h)

ΔT : gradiente de temperatura (temperatura inicial de 25 °C y final de 69 °C)

Para calcular el calor de evaporación del hexano se utilizó la fórmula 2.5.

$$Q_{v_h} = (m_h * \lambda) \quad [2.5]$$

Donde:

m_h : masa de hexano (kg/h)

λ : calor latente de vaporización del hexano igual 334,72 kJ/kg (Perry, 1941, p. 2383)

El calor total para la extracción se calculó mediante la aplicación de la ecuación 2.6.

$$Q_t = Q_{c_h} + Q_{v_h} \quad [2.6]$$

Donde:

Q_{c_h} : calor de calentamiento del hexano (kJ/h)

Q_{v_h} : calor de vaporización del hexano (kJ/h)

Destilación

Durante la destilación, se separa el aceite de café del hexano, a escala de laboratorio no existe una recuperación eficiente del hexano. Mediante pruebas experimentales se obtuvo el 92,48 % del hexano inicial utilizado, dato que se consideró para el cálculo del balance de masa en la recuperación.

Para el cálculo del calor de calentamiento en la destilación se utilizó la fórmula 2.7, a un gradiente de temperatura medida con termómetro entre los 25 y 70 °C iniciales y finales respectivamente.

$$Q_{c_m} = (m_m * C_{p_m} * \Delta T) \quad [2.7]$$

Donde:

Q_{c_m} : calor de calentamiento de la miscela (kJ/h)

C_{p_m} : calor específico de la miscela (kJ/kg °C)

m_m : masa de miscela (kg/h)

ΔT : gradiente de temperatura (temperatura inicial de 25 °C y final de 69 °C)

El Cp_m de la mezcla aceite y hexano se calculó mediante la ecuación 2.8,

$$Cp_m = [(m_m * X_{ac} * Cp_{ac}) + (m_m * X_h * Cp_h)]/m_m \quad [2.8]$$

Donde:

m_m : masa de la miscela (kg/h)

X_h : hexano en la miscela, valor obtenido experimentalmente en laboratorio (%)

X_{ac} : aceite en la miscela, valor obtenido experimentalmente en laboratorio (%)

Cp_m : calor específico de la miscela (kJ/kg °C)

Cp_{ac} : calor específico del aceite de afrecho de café (kJ/kg °C)

Cp_h : calor específico del hexano (kJ/kg °C)

Se calculó el calor de evaporación del hexano con la fórmula 2.5.

El calor total para la destilación se calculó mediante la aplicación de la ecuación 2.9.

$$Q_t = Q_{c_m} + Q_{v_h} \quad [2.9]$$

Donde:

Q_{c_m} : calor de calentamiento de la miscela (kJ/h)

Q_{v_h} : calor de evaporación del hexano (kJ/h)

Desolventización

En el cálculo de la desolventización del aceite de café, se consideró el dato obtenido mediante experimentación en laboratorio, es decir la cantidad de aceite y solvente presentes en el balón luego de la destilación. Se evaporó el solvente residual a 70

°C por 20 min. Se enfrió el balón con el aceite por 10 minutos en el desecador y se procedió a pesarlo de nuevo.

Al nuevo peso que se obtuvo se lo restó del peso inicial y la diferencia calculada es el hexano contenido en el aceite luego de la destilación. De esta forma se obtuvo el dato de solvente contenido en el aceite de café para el cálculo de desolventización.

Para el cálculo en la desolventización de la torta se procedió de forma similar, una vez concluida la extracción, se pesó la torta incluida en el cartucho y se la llevó a evaporación a temperatura de 70 °C por 20 min, para luego enfriar por 30 min y se pesó nuevamente. Al peso inicial de la torta se restó el peso final y se obtuvo el dato del solvente contenido en la torta.

Para el cálculo del calor de calentamiento en la desolventización de la torta se utilizó la fórmula 2.10.

$$Q_{c_t} = (m_t * C_{p_t} * \Delta T) \quad [2.10]$$

Donde:

Q_{c_t} : calor de calentamiento de la torta con hexano (kJ/h)

C_{p_t} : calor específico de la torta con hexano (kJ/Kg °C)

m_t : masa de la torta con hexano (kg/h)

ΔT : gradiente de temperatura, entre 45 a 70 °C, valores que fueron obtenidos en la experimentación

El calor específico de la torta con hexano se calculó con la fórmula 2.11.

$$C_{p_t} = \frac{[(m_t * X_a * C_{p_a}) + (m_t * X_h * C_{p_h})]}{m_t} \quad [2.11]$$

Donde:

m_t : masa de la torta con hexano (kg/h)

X_h : porcentaje de hexano en la torta, valor obtenido experimentalmente en laboratorio (%)

X_a : porcentaje de afrecho en la torta, valor obtenido experimentalmente en laboratorio (%)

C_{pa} : calor específico del afrecho de café (kJ/Kg °C)

C_{pt} : calor específico de la torta con hexano (kJ/Kg °C)

C_{ph} : calor específico del hexano (kJ/Kg °C)

Se calculó el calor de evaporación del hexano en la desolventización de la torta con la fórmula 2.5.

El calor total para la desolventización de la torta se calculó mediante la aplicación de la ecuación 2.12.

$$Qt_t = Qc_t + Qv_h \quad [2.12]$$

Donde:

Qc_t : calor de calentamiento de la torta con hexano (kJ/h)

Qv_h : calor de evaporación del hexano (kJ/h)

Para el cálculo del calor de calentamiento en la desolventización del aceite se utilizó la fórmula 2.13.

$$Qc_{ah} = (m_{ah} * C_{pah} * \Delta T) \quad [2.13]$$

Donde:

Qc_{ah} : calor de calentamiento del aceite con hexano (kJ/h)

C_{pah} : calor específico de la mezcla aceite y hexano (kJ/Kg °C)

m_i : masa del aceite y hexano (kg/h)

ΔT : gradiente de temperatura, entre 45 a 70 °C, valores que fueron obtenidos en la experimentación

El calor específico de la mezcla aceite y hexano se calculó con la fórmula 2.14.

$$Cp_{ah} = \frac{[(m_{ah} * X_{ac} * Cp_{ac}) + (m_{ah} * X_h * Cp_h)]}{m_{ah}} \quad [2.14]$$

Donde:

m_{ah} : masa de aceite con hexano (kg/h)

X_{ac} : porcentaje de aceite en la mezcla aceite y hexano, valor obtenido experimentalmente en laboratorio (%)

X_h : porcentaje de hexano en la mezcla aceite y hexano, valor obtenido experimentalmente en laboratorio (%)

Cp_{ac} : calor específico del aceite de afrecho de café (kJ/kg °C)

Cp_{ah} : calor específico de la mezcla aceite y hexano (kJ/Kg °C)

Cp_h : calor específico del hexano (kJ/Kg °C)

Se calculó el calor de evaporación del hexano en la desolventización del aceite con la fórmula 2.5.

El calor total para la desolventización del aceite se calculó mediante la aplicación de la ecuación 2.15.

$$Qt_{ah} = Qc_{ah} + Qv_h \quad [2.15]$$

Donde:

Qc_{ah} : calor de calentamiento del aceite con hexano (kJ/h)

Qv_h : calor de evaporación del hexano (kJ/h)

Transesterificación

Se emplearon las relaciones de hidróxido de potasio y metanol que maximizaron los rendimientos en la obtención de biodiésel a escala de laboratorio, es decir las relaciones: molar metanol/aceite y porcentaje peso/peso KOH y aceite.

Decantación

Una vez finalizada la transesterificación, el producto de la reacción se procedió a separar en glicerina y biodiésel, para lo cual se tomó como dato inicial la cantidad de esterificado en el embudo de separación y como datos de salida del proceso, las cantidades de éster y glicerina. Los datos obtenidos a nivel de laboratorio, en forma de porcentajes, de cada uno de los productos a la salida de la decantación, se utilizaron para el cálculo del balance de masa, para el diseño de la planta.

Lavado

El lavado del éster se realizó por tres ocasiones. Para el balance de masa de esta etapa se consideró la cantidad de agua destilada empleada para purificar el biodiésel. El volumen de agua destilada empleado fue igual al volumen del biodiésel a purificarse, es decir una relación 1:1.

Separación

Se realizaron tres separaciones, una por cada lavado realizado. Para el balance de masa se consideraron los datos obtenidos a escala de laboratorio del porcentaje de separación del biodiésel de la mezcla de agua y jabones.

Evaporación

Para realizar el balance de masa en esta etapa se tomó en consideración el dato obtenido a nivel de laboratorio del porcentaje de evaporación del alcohol y agua no eliminados del biodiésel.

Requerimiento de Vapor

Una vez que se obtuvo el Q (calor) o energía térmica requerida en kJ/h, este calor se dividió para 0,85 según Heldman y Singh (1997), que es la eficacia que se asume tiene un intercambiador de calor (85 % de eficacia) para transferir el calor del vapor hacia el hexano (p. 115).

Los valores de H_L y H_V se obtuvieron de la tabla de las propiedades de vapor saturado a 115 °C, elegida así para asegurar un gradiente mínimo de temperatura de 5 °C entre el vapor y el producto, los datos se observan en el Anexo IV (Heldman y Singh, 1997, p. 504).

La determinación de la entalpía para una calidad de vapor del 90 %, se determinó mediante la fórmula 2.16

$$H = (0.1)H_L + (0.9)H_V \quad [2.16]$$

Donde:

H : Entalpía para una calidad de vapor del 90 % (kJ/kg)

H_L : Entalpía de líquido (kJ/kg)

H_V : Entalpía de vapor saturado (kJ/kg)

Luego se obtuvo la energía térmica del condensado que deja el intercambiador, mediante la fórmula 2.17

$$H_C = (Cp_{agua}) * T \quad [2.17]$$

Donde:

H_c : contenido de energía térmica del condensado que abandona el cambiador o energía térmica del afrecho a la salida del proceso (kJ/kg)

C_p : calor específico del agua a 90 °C (kJ/kg °C)

T : Temperatura final del afrecho de café (°C)

El calor específico del agua se obtiene de la tabla relacionada a propiedades físicas del agua a la presión de saturación que se presenta en el Anexo V (Heldman y Singh, 1997, p. 502 - 503). Una vez que se obtuvo el calor (Q), la entalpía de calidad de vapor del 90 % (H) y el contenido de energía térmica del condensado que abandona el cambiador (H_c), se determinó la cantidad de vapor necesario que debe circular por el evaporador para ceder el calor latente de vaporación con la fórmula 2.17.

$$m = \frac{Q}{(H-H_c)} \quad [2.17]$$

Donde:

m : masa de vapor necesario (kg/h)

Q : calor requerido (kJ/h)

H : entalpía para una calidad de vapor del 90 % (kJ/kg)

H_c : contenido de energía térmica del condensado que abandona el cambiador (kJ/kg)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL AFRECHO DE CAFÉ

Los resultados del análisis de caracterización del afrecho de café se muestran en la Tabla 3.1. Los datos se presentan en el Anexo III. El resultado de extracto etéreo del 11 % refleja un contenido de aceite inferior al 15,2 y 17,9 % presentado por Fan y Soccol (2005); esta diferencia puede atribuirse a las distintas variedades de café. Sin embargo, es un valor que presenta buenas perspectivas para su extracción y posterior transesterificación para obtener biodiésel (p.92).

Tabla 3.1. Análisis proximal del afrecho de café

ANALITO	RESULTADOS (g/100 g)
Humedad	12,09
Cenizas	1,12
Extracto etéreo	11,00
Proteína	11,57
Carbohidratos totales por diferencia	64,22

De acuerdo con Anastopoulos, Deligiannis, Papazafeiropoulou y Zannikos (2011), si se realiza la extracción por el método de soxhlet y se realiza una transesterificación alcalina, con un contenido del 10 al 15 % de aceite y una conversión del 92 % a biodiésel, se obtendrían de 0,09 a 0,14 kg de biodiésel por kilogramo de afrecho. Si los residuos llegan a las 260 ton/mes, se obtendrían de 23,92 a 35,88 ton de biodiésel/mes.

3.2. CONDICIONES DE SECADO Y EXTRACCIÓN DE ACEITE A PARTIR DE AFRECHO DE CAFÉ

3.2.1. SECADO

En la Figura 3.1. se observan las curvas de secado obtenidas de los diferentes tratamientos del afrecho de café e indican los cambios de la humedad en base seca

(kg H₂O/kg afrecho) en función del tiempo (min) durante el tratamiento a 70, 90 y 110 °C. Los datos para la construcción de la Figura 3.1. se presentan en el Anexo VI.

De la Figura 3.1. se puede manifestar que el secado del afrecho no presenta un periodo de inducción o de estabilización del mecanismo de secado, porque el afrecho parte con una humedad inicial del 12 % en base seca. Para el tratamiento a 110 °C y a un tiempo 60 minutos se logra reducir la humedad hasta el 10,53 %. Para los tratamientos a 70 y 90 °C la reducción en la humedad se alcanza a los 195 y 135 minutos, respectivamente. Tal como era lo esperado, trabajar a 110 °C reduce el tiempo de secado.

Se puede decir que el tramo A – B que va desde a cero hasta los 15 minutos correspondería al período de deshidratación a velocidad constante, ya que a partir de los 15 minutos se presenta una eliminación de la humedad a velocidad decreciente.

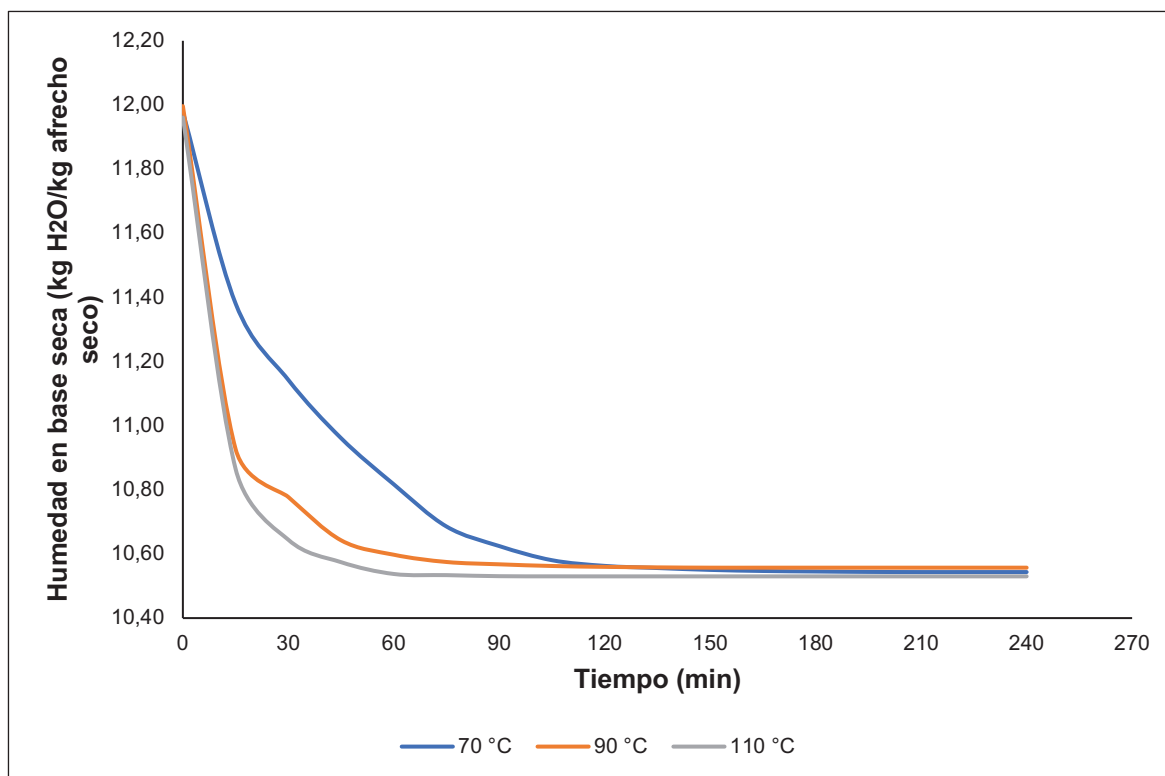


Figura 3.1. Cambios de la humedad en base seca del afrecho de café en función del tiempo, durante el tratamiento a 70, 90 y 110 °C

Se observa según la Figura 3.1. y Tabla 3.2., que a los 15 minutos el porcentaje de pérdida de agua del afrecho es del 76,59 % a 110 °C, 74,37 % y 41,67 % para los tratamientos a 90 y 70 °C respectivamente; no obstante, las curvas de secado a 90 y 110 °C presentan mínimas diferencias. Sin embargo, sí se presentan diferencias en las curvas de secado si se compara el tratamiento de secado a 70 °C con respecto de los tratamientos de secado a 90 y 110° C.

En la Figura 3.2. se presentan las segundas curvas de secado que muestran los cambios en la velocidad de secado ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg afrecho} \cdot \text{min}$) en función de la humedad libre ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{kg afrecho}$) para los 3 tratamientos de secado en estudio.

En el tramo B – C hay un cambio en la velocidad de secado, y es similar a 110 y 90 °C, pero sin embargo difiere a 70 °C. En este tramo, la velocidad de secado disminuye porque el agua ligada debe moverse desde el interior del afrecho hacia la superficie para evaporarse (Mujumdar, 1995, p. 21).

Los datos para la construcción de la Figura 3.2. se presentan en el Anexo VI.

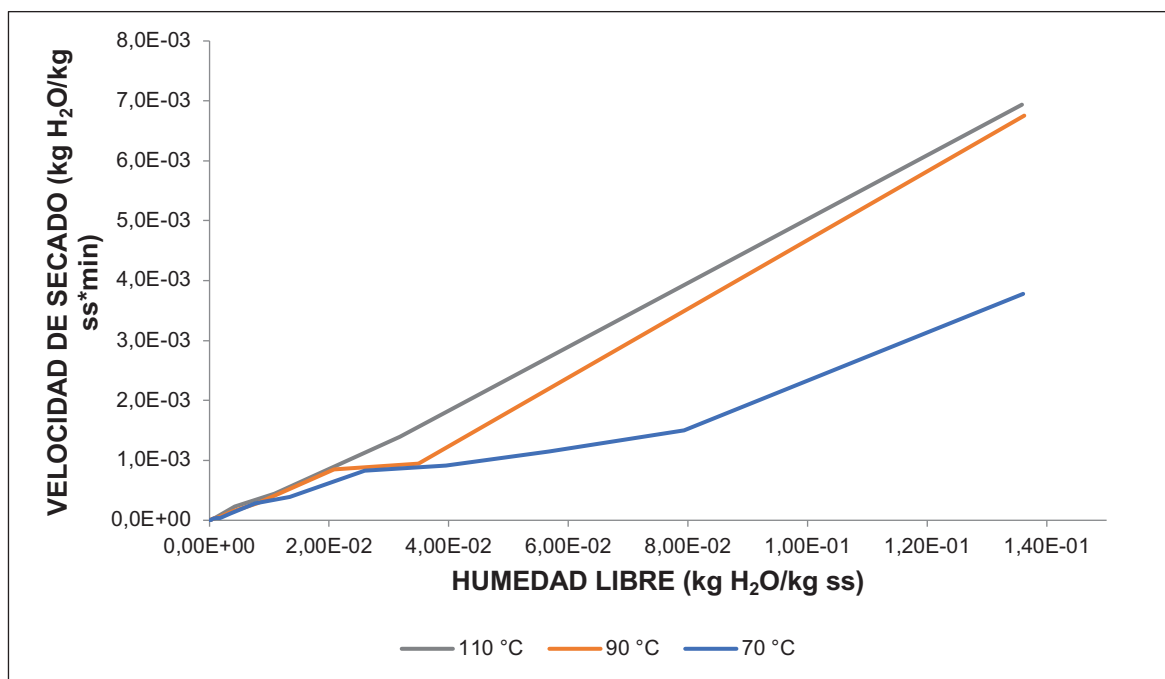


Figura 3.2. Cambios de velocidad con respecto a la humedad en base seca en cada período de secado del afrecho de café durante el tratamiento a 70, 90 y 110 °C

En la Tabla 3.2. se presentan los resultados de la variación de la humedad en base seca y la variación de la velocidad de secado del afrecho a 70, 90 y 110 °C. Los datos para la Tabla 3.2. se presentan en el Anexo VI. Se puede evidenciar que la mayor variación en la velocidad de secado es a 90 °C para un tiempo de 15 minutos y la menor variación de la velocidad de secado es a 110 °C para el intervalo de 45 a 105 minutos, de allí que el porcentaje en pérdida de humedad a 110 °C es de alrededor del 23,40 % a partir de los 15 minutos de secado.

Según Moss y Nonhebel (1979) al tener mayor temperatura de secado y menor humedad perdida, es menor el tiempo de secado; sin embargo, a 70 °C el efecto es el contrario, puesto que, la temperatura de secado es menor, la humedad es mayor y el tiempo que dura el secado del afrecho de café también es mayor (p. 74).

Cabe señalar que a partir de los 45 minutos de secado y a las temperaturas de 90 y 110 °C, el porcentaje de pérdida de humedad fue menor al 6 %, y prácticamente las velocidades de secado tienden a cero. Esto se debe a que la difusión desde el interior del afrecho hacia la superficie no suministra toda el agua que se evapora, el afrecho se endurece, y forma una capa exterior de baja permeabilidad y una capa interior húmeda de agua ligada (Moss y Nonhebel, 1979, p. 74).

Tabla 3.2. Variación de la humedad en base seca y velocidad de secado del afrecho de café a 70, 90 y 110 °C

Tiempo	Temperatura (°C)	Δ Humedad (kg H ₂ O/kg afrecho)	% Pérdida de humedad	Δ Velocidad (kg H ₂ O/kg afrecho*min)
0 - 15	70	-5,67E-02	41,669	-2,27E-03
	90	-1,01E-01	74,367	-5,81E-03
	110	-1,04E-01	76,599	-5,54E-03
15 - 45	70	-3,98E-02	29,262	-5,95E-04
	90	-2,69E-02	19,763	-6,59E-04
	110	-2,76E-02	20,316	-1,16E-03
45 - 195	70	-3,95E-02	29,070	-9,10E-04
45 - 150	90	-8,08E-03	5,869	-2,84E-04
45 - 105	110	-4,19E-03	3,085	-2,33E-04

Los intervalos de tiempo tomados a partir del minuto 45 difieren para cada tratamiento de secado, porque el tiempo necesario para alcanzar la humedad final del afrecho de café depende de la temperatura a la que fue expuesto.

En la Tabla 3.3. se presentan las humedades iniciales y de equilibrio para cada tratamiento. Los datos para la construcción de la Tabla 3.3. se presentan en el Anexo VI. La humedad inicial del afrecho de café fue de aproximadamente el 12 % para todas las temperaturas de secado.

Tabla 3.3. Humedad inicial del afrecho de café y humedad de equilibrio alcanzado luego del proceso de secado

Temperatura (°C)	Humedad Inicial (%)	Humedad de equilibrio (%)
70	11,98	10,56
90	12,00	10,56
110	11,96	10,53

A las tres temperaturas de secado se logra alcanzar aproximadamente la misma humedad de equilibrio difiriendo únicamente en el tiempo al cual se alcanzan esas humedades, siendo a 110 °C cuando más rápidamente se consigue la humedad de equilibrio del afrecho de café. Sin embargo, el incremento rápido de la temperatura ocasiona el endurecimiento del afrecho de café. Efecto que tiene lugar porque la evaporación se da en el interior del afrecho y lejos de la superficie, ello conlleva a que la capa externa sometida a una alta temperatura sea de baja permeabilidad.

3.2.2. EXTRACCIÓN DE ACEITE

A fin de comparar la influencia del secado en la extracción del aceite, en la Tabla 3.4. se presentan los resultados de extracción de aceite a partir de afrecho sin secar y en la Tabla 3.5. se presentan los resultados de extracción de aceite para el afrecho de café secado a diferentes temperaturas. Las tablas 3.4 y 3.5 fueron construidas con los datos que se presentan en el Anexo VII. Cuando se empleó afrecho sin secar, a los 10 minutos de extracción se obtuvo 0,312 g de aceite y a

los 30 minutos de extracción se obtuvo 0,543 g de aceite; es decir que el rendimiento de extracción de aceite es muy bajo puesto que apenas se obtuvo un 0,54 % de aceite de un total de 11 % de extracto etéreo.

Tabla 3.4. Promedio de aceite obtenido en el transcurso del tiempo de extracción para afrecho sin secado previo

Tiempo (min)	Aceite de café (%)	
	n	\bar{X}
10	3	0,312 ± 0,010
15	3	0,383 ± 0,011
20	3	0,400 ± 0,010
30	3	0,543 ± 0,009
45	3	0,543 ± 0,013

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

En la Tabla 3.5. se presentan los resultados del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C, en donde se aprecia que el mayor porcentaje de aceite de café obtenido durante la extracción fue cuando el pretratamiento de secado se realizó a 110 °C, cuyo valor final a los 45 minutos fue de 11,25 g/100 g de afrecho seco, seguido por los valores de 10,81 y 10,57 g/100 g a las temperaturas de secado de 90 y 70 °C respectivamente. En todos los casos, a los 30 minutos prácticamente se logra obtener la máxima extracción de aceite.

Tabla 3.5. Promedio de aceite de café (g/100 g afrecho seco) obtenido del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C durante cada intervalo de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos de extracción

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Aceite de café (%)	
		n	\bar{X}
70	10	3	3,952 ± 0,023
	15	3	7,898 ± 0,017
	20	3	9,874 ± 0,010
	30	3	10,564 ± 0,013
	45	3	10,567 ± 0,008

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla 3.5. Promedio de aceite de café (g/100 g afrecho seco) obtenido del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C durante cada intervalo de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos de extracción (continuación...)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Aceite de café (%)	
		n	\bar{X}
90	10	3	3,997 ± 0,007
	15	3	8,139 ± 0,050
	20	3	10,088 ± 0,015
	30	3	10,804 ± 0,015
	45	3	10,808 ± 0,014
110	10	3	4,348 ± 0,008
	15	3	8,579 ± 0,019
	20	3	10,445 ± 0,011
	30	3	11,228 ± 0,024
	45	3	11,247 ± 0,016

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

La Figura 3.3. fue realizada con los datos que se presentan en el Anexo VII, en esta se presenta el porcentaje de extracción de aceite de café en función del tiempo y la temperatura de secado. Se observa que el comportamiento de la extracción es similar para las tres temperaturas de secado empleadas en el proyecto; sin embargo, existe una ligera diferencia entre las tres temperaturas de secado, que está dada por la cantidad de aceite obtenido. A mayor temperatura de secado del afrecho de café, mayor la cantidad de aceite extraído. Este efecto se debe a que el afrecho sometido a una temperatura mayor genera una mayor cantidad de células rotas en el afrecho. Éstas son células que aportan una mayor cantidad de aceite.

El tramo inicial que va hasta los 10 minutos, supone el calentamiento y evaporación del hexano, su posterior paso a través de la muestra. Su condensación y percolación por gravedad sobre las partículas del afrecho de café. Dura hasta la obtención de las primeras cantidades de aceite.

En el tramo A – B que va hasta aproximadamente los 20 minutos, la extracción de aceite es creciente. En el período B – C, el porcentaje de extracción de aceite decrece y no varía considerablemente. En la sección C – D a partir de los 30

minutos, no se logra extraer más aceite. Por lo tanto, el tiempo de extracción debería ser mayor de 20 minutos e inferior a 30 minutos.

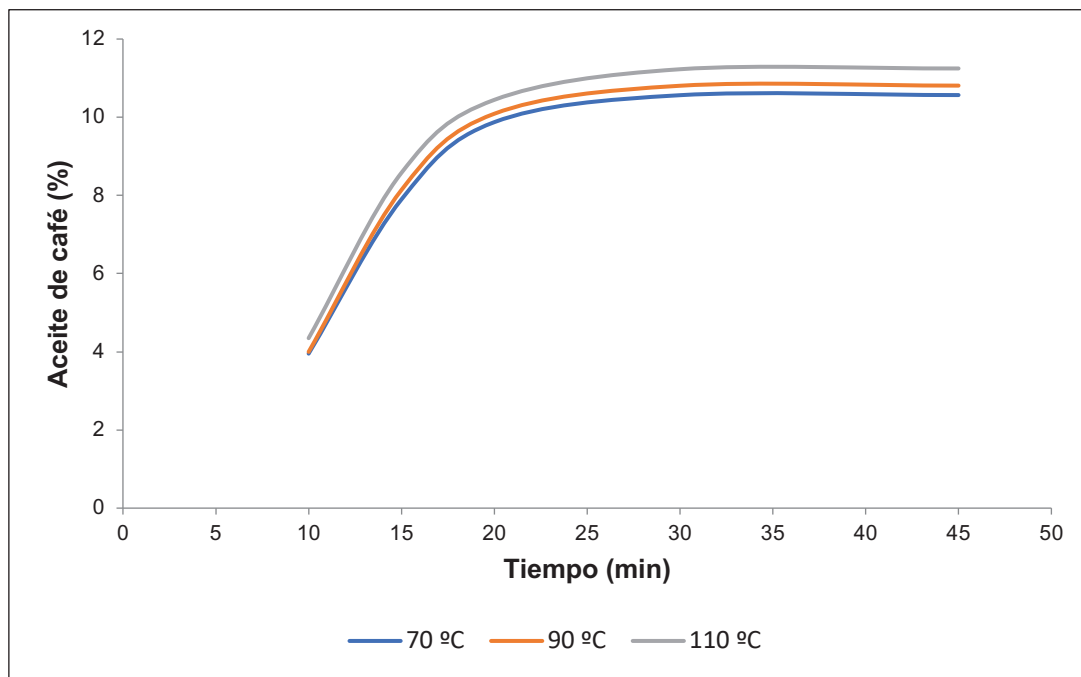


Figura 3.3. Porcentaje de aceite de café obtenido durante la extracción del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C

En la Tabla 3.6. construida a partir del Anexo VII, se presentan los resultados del aceite obtenido en cada período de extracción para cada una de las temperaturas de secado del afrecho. Se puede apreciar en el período A – B para todas las temperaturas de secado, que la cantidad de aceite extraído alcanza su máxima extracción, lo que corrobora el tiempo necesario de extracción de entre 20 y 30 minutos.

Tabla 3.6. Aceite (g) obtenido en los períodos de extracción del afrecho seco a 70, 90 y 110 °C

Períodos de extracción	Temperatura de secado (°C)		
	70	90	110
A - B	9,874	10,089	10,445
B - C	0,690	0,716	0,783
C - D	0,003	0,003	0,020

En la Tabla 3.7. se indica de la cantidad de aceite extraído en cada período de tiempo durante la extracción del afrecho secado a 110 °C. La Tabla 3.7. fue realizada con los datos que se presentan en el Anexo VII. En ella se puede identificar en primer lugar que existe un aumento entre las cantidades de aceite extraído a los 10 y 45 minutos en 6,89 g y en segundo lugar que en total existe una diferencia de 10,70 g de aceite con respecto a la extracción de aceite del afrecho sin secado previo que se muestra en la Tabla 3.4. Por lo tanto, se evidencia que el tiempo requerido para alcanzar la mayor extracción de aceite es a los 30 minutos. También que los tratamientos de secado influyen sobre la cantidad de aceite obtenido, debido a que facilitan el rompimiento de las células del afrecho. Además, estos tratamientos de secado ayudan en la reducción de la humedad, que como se observa en la Tabla 3.4., afecta la extracción del aceite. La humedad no permite un efectivo contacto entre el solvente y el aceite presente en el afrecho.

El efecto del mejor tratamiento de secado del afrecho sobre el aceite extraído es a 110 °C, esto debido a que el afrecho sometido a temperaturas de 90 y 70 °C aún presenta células enteras o rotas de forma parcial.

Tabla 3.7. Promedio de aceite de café obtenido frente al tiempo de extracción del afrecho secado a 110 °C

Tiempo (min)	Aceite de café (g/100 g)	
	n	\bar{X}
10	3	4,348 ± 0,008
15	3	8,579 ± 0,019
20	3	10,445 ± 0,011
30	3	11,228 ± 0,024
45	3	11,247 ± 0,016
$\bar{X} \pm \sigma (n = 3)$		

La Figura 3.4. presenta la relación entre el cambio en la velocidad de extracción (g/100 g afrecho seco*min) y el aceite obtenido (g/100 g) para el afrecho secado a 70, 90 y 110 °C. Las curvas exhiben un comportamiento similar de velocidad de extracción, que decrece homogéneamente en el tramo A – B, donde se extrajo la

mayor cantidad de aceite; mientras que en el tramo B – C, la velocidad de extracción decae. En el último tramo de C a D se llega casi a no obtener más aceite. El efecto en la reducción de la velocidad de extracción para los dos últimos tramos se debe: a que el afrecho es pobre en aceite y a que las últimas fracciones de aceite que se pueden recuperar son menos solubles en el solvente que aquellas fracciones iniciales. También a que la composición química del afrecho, a medida que transcurre la extracción, se encuentra formada en mayor parte por humedad, proteínas y carbohidratos, y en menor cantidad de aceite (Bailey, 1984, p. 451).

La Figura 3.4. fue realizada con los datos que se presentan en el Anexo VIII.

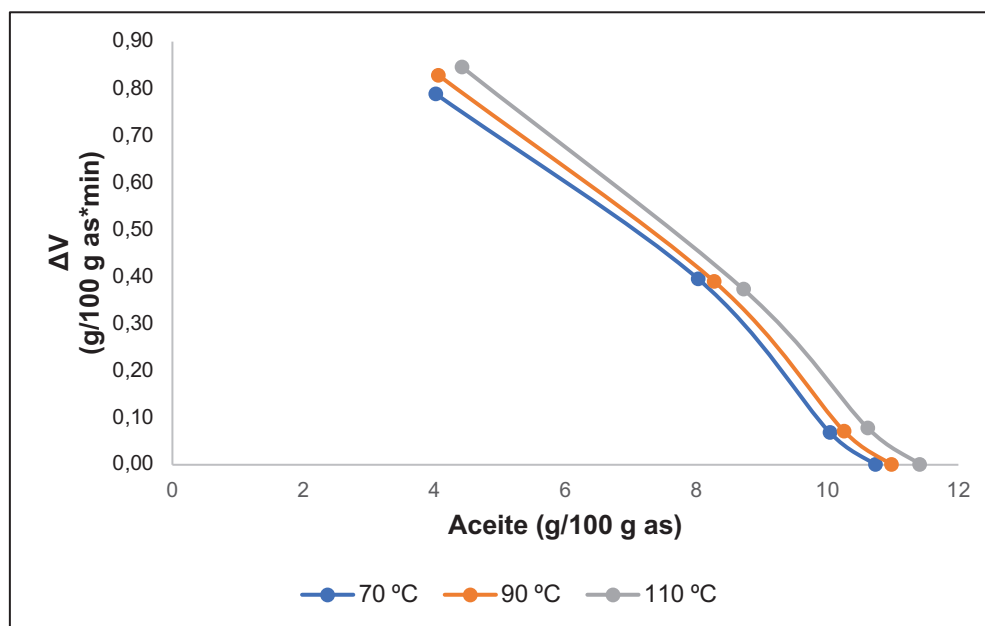


Figura 3.4. Comportamiento de la velocidad de extracción (g/100 g afrecho seco*min) en función del aceite de café obtenido (g/100 g afrecho seco) para las temperaturas de secado de 70, 90 y 110 °C

En la Tabla 3.8. se presentan los resultados de los cambios de la velocidad de extracción en la obtención del aceite para las tres temperaturas de secado del afrecho. Se puede establecer que la mayor cantidad de aceite se obtuvo en el período A – B para todas las temperaturas de secado del afrecho, esto debido al cambio de fase del aceite por el inmediato contacto con el solvente. Para el período de extracción de B – C, el cambio en la velocidad de extracción se reduce porque disminuye el paso del aceite presente en la superficie y dentro de los poros del

afrecho, hacia la masa de la solución solvente – aceite. En el período C – D, el cambio en la velocidad de extracción es menor a los períodos precedentes porque el afrecho es pobre en aceite y porque la solución solvente – aceite se encuentra saturada. La Tabla 3.8. fue realizada con los datos que se presentan en el Anexo VIII.

Tabla 3.8. Cambios de la velocidad de extracción (g aceite/100 g afrecho seco*min) en la obtención del aceite de café secado a 70, 90 y 110 °C

Períodos de extracción	Temperatura de secado (°C)		
	70	90	110
A - B	0,394	0,438	0,473
B - C	0,326	0,318	0,295
C - D	0,069	0,071	0,077

En la Figura 3.5. se presenta el contenido de aceite en el afrecho de café respecto de los contenidos de aceite de otros materiales destinados para su conversión a biodiésel.

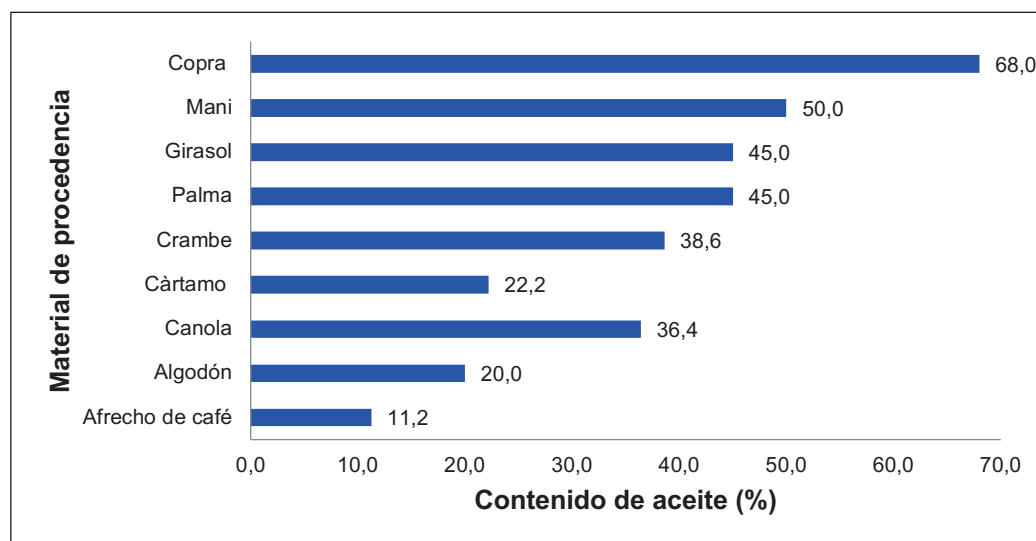


Figura 3.5. Comparación del contenido de aceite en el residuo de café frente al contenido más alto de aceite en otros materiales destinados a la producción de biodiésel (Bailey, 1984, p. 423; Centurion, 2015; Chakrabarty, 2009, p. 125; Franco, 2012, p. 1)

Al comparar el porcentaje más alto de aceite del afrecho de café, se tiene que es la cantidad más baja en relación al contenido de aceite de otros materiales, pero

que sin embargo, es significativa porque proviene de un material de desecho. De esa forma se consideraría apreciable su uso y transformación a biodiésel por cuanto todas las demás materias primas que se comparan, se destinan para la alimentación, en tanto que del presente estudio, el biodiésel proviene de los desechos de la industrialización del café soluble (Centurion, 2015 ;Chakrabarty, 2009, p. 125).

3.2.3. ANÁLISIS DEL ACEITE DE CAFÉ EXTRAÍDO

Se evaluó el aceite extraído a partir del afrecho de café secado a 110 °C, con base en los parámetros fijados en las normas INEN, donde se detallan las propiedades que se requieren para la producción de biodiésel. Los resultados obtenidos para cada propiedad evaluada se presentan en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9. Resultados obtenidos para cada propiedad evaluada en el aceite de café

Propiedad	Resultado
Densidad relativa d ₂₅	0,926 ± 0,001
Índice de acidez	6,34 ± 0,12 mg/g
Índice de saponificación	160,68 ± 1,40 mg KOH/g
Índice de yodo	108,32 ± 0,15 cg/g
Índice de peróxidos	10,79 ± 0,29 meq O ₂ /kg

La Tabla 3.9. fue construida a partir de los datos que se presentan en el Anexo IX.

Densidad relativa

El aceite sometido a análisis de densidad relativa reportó un resultado medio d₂₅ de 0,926 (valor adimensional), este resultado como se puede observar en la Figura 3.6., es similar a las densidades d₂₅ de aceites procedentes de materias primas derivadas para su transformación a biodiésel.

La d_{25} del afrecho de café es la más alta respecto a los aceites comparados, esto refleja un mayor grado de insaturación que provocaría que el biocombustible obtenido a partir del aceite extraído se oxide con rapidez y no permita su almacenamiento por períodos prolongados y a la vez se afecten sus propiedades de índice de acidez, yodo y viscosidad cinemática (Britton, 2015, p. 53; Chakrabarty, 2009, p. 50).

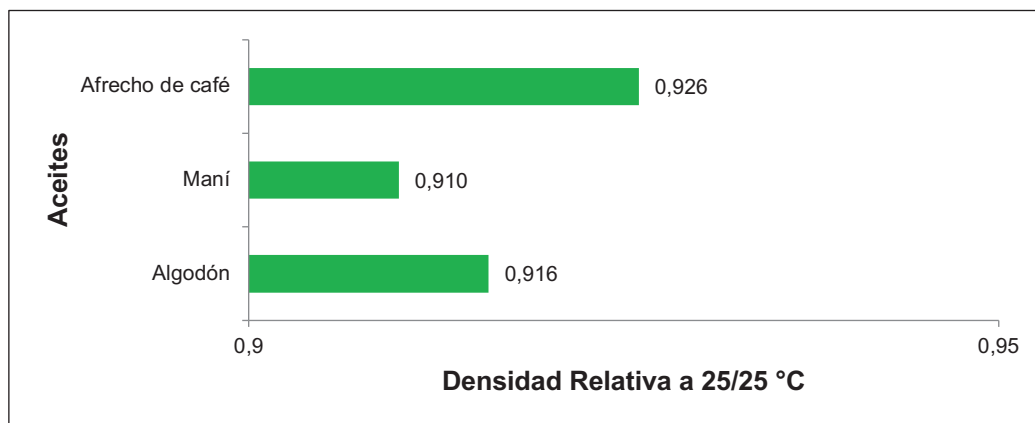


Figura 3.6. Densidad relativa a 25/25 °C del aceite del residuo de café en cotejo a las densidades de aceites destinados para biodiésel (Bailey, 1984, p. 124 - 140)

Índice de Acidez (I.A.)

El aceite presenta un I.A. de 6 mg/g o 3 % como porcentaje de ácido oleico; esta cantidad es ligeramente superior a la del aceite de coco y mucho mayor a la del resto de aceites típicos presentados en la Figura 3.7. Kasture, Mahadik, More y Wadodkar (2007) explican que un aceite recién extraído contiene una cantidad pequeña de ácidos grasos libres. Su presencia puede deberse a la naturaleza de la materia prima, por lo que el valor de I.A. del aceite de café que se utilizó puede deberse al material del cual fue extraído (p. 112).

El aceite del afrecho de café presenta un alto grado de insaturación en relación a otros aceites destinados a biodiésel. Esto corroborado por el índice de yodo, que comprueba la existencia de un mayor porcentaje de ácido oleico en su composición, el cual da lugar a un incremento en el I.A. (Kasture et al., 2007, p. 112).

Según Aracil (2015), un índice de acidez elevado afecta la calidad de biodiésel que se obtiene, debido a que los ácidos grasos libres que contiene el aceite se pueden neutralizar con el catalizador, y convertirse en jabones (p. 406).

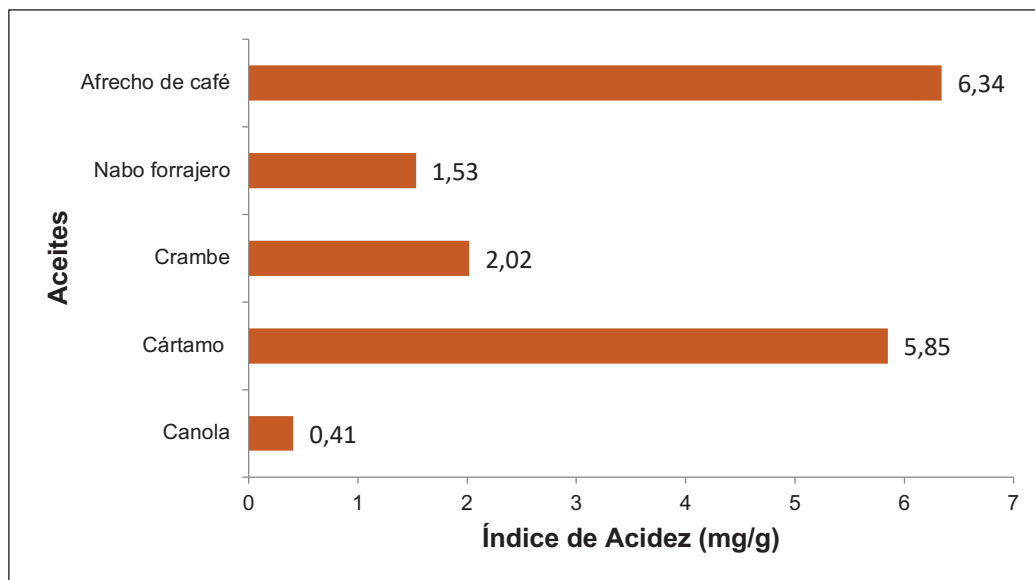


Figura 3.7. Comparativa del índice de Acidez (mg/g) de aceites destinados a biodiésel y del aceite proveniente del afrecho de café (Centurion, 2015)

La comparación del I. A. del aceite de café frente a los I. A. de otros aceites destinados a biodiésel se realizó conforme a información disponible en literatura.

Índice de Saponificación

El índice de saponificación del aceite de café fue de 160,68 mg KOH/g, este valor es bajo en comparación con los índices de varios aceites para biodiésel que se presentan en la Figura 3.8., pero que sin embargo se encuentra en el rango de 161 a 189 mg KOH/g de estos aceites característicos.

El índice de saponificación del aceite extraído respecto de los índices comparados refleja que es el aceite que menor cantidad de KOH necesita para formar jabones en la reacción de transesterificación. La formación de jabones afecta la obtención de buenos rendimientos de biodiésel (Agudelo, Benjumea y Ríos, 2009, p. 35).

El resultado obtenido para este índice refleja según Camprubí (2007) que cuanto más bajo es el índice de saponificación más puro es el aceite obtenido (p. 51).

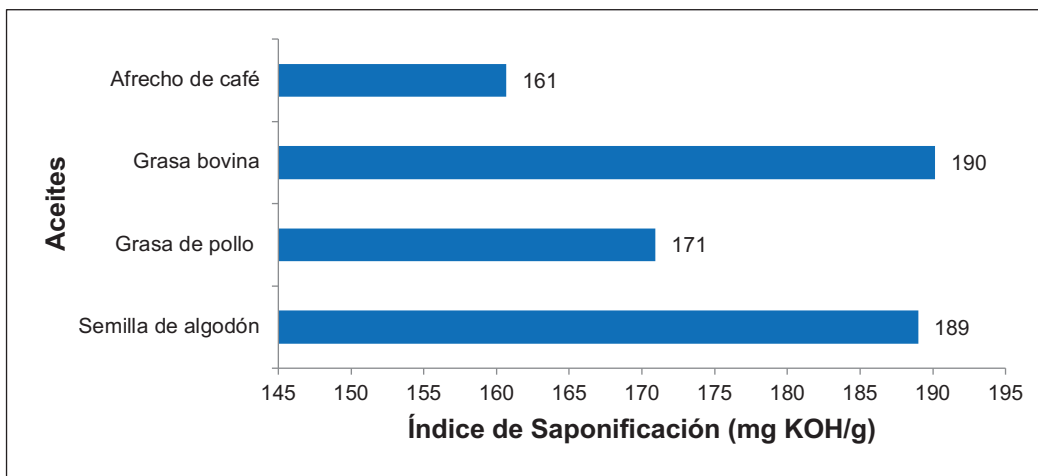


Figura 3.8. Índices de Saponificación (mg KOH/g) de aceites de diversas materias primas utilizadas para obtención de biodiésel y del aceite del residuo de café

Índice de Yodo (I.Y.)

El índice de yodo del aceite extraído es de 108,32 cg/g, valor que representa una medida del grado de insaturación y que según Agarkar, Fursule y Kulkarni (2006), al elevarse el índice de yodo también se incrementa directamente la cantidad de ácidos grasos insaturados (p.68).

Una mayor cantidad de ácidos grasos insaturados tendrían su efecto directo sobre las propiedades del biodiésel obtenido como son: bajo número de cetano, menor estabilidad y menor temperatura de congelación (Britton, 2015, p. 50)

Según la Figura 3.9., el aceite extraído está en el promedio de los aceites que se transforman a biodiésel en especial de aquellos con un alto grado de insaturación.

Los aceites no secos tienen un I.Y. < 100, secos > 130 y semi-secos entre 100 y 130, por lo que según el resultado de I.Y. obtenido, el aceite de residuo de café se comporta como un aceite semi-seco que es menos resistente a reacciones de oxidación por lo que un biodiésel derivado del aceite de afrecho de café que

presenta un alto grado de insaturación no puede permanecer almacenado por tiempos prolongados debido a que envejecerá rápidamente y se alterarán sus propiedades (Britton, 2015, p. 52 - 53; Chauan, 2008, p. 145).

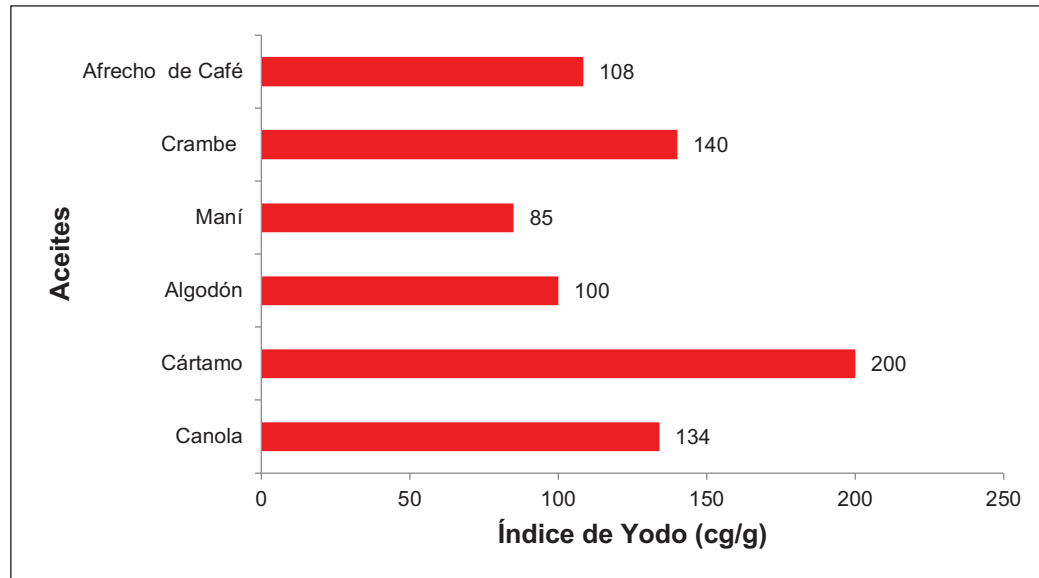


Figura 3.9. Comparativa de Índices de Yodo (cg/g) de aceites para biodiésel y del residuo de café
(Centurion, 2015)

Índice de Peróxidos (I.P.)

Como se indica en la Tabla 3.9, para el aceite de café se obtuvo un I.P. de 10,79 meq O₂/kg, cantidad acorde con el grado de insaturación. Según Agarkar, Fursule y Kulkarni (2006), el valor obtenido indica que el aceite extraído presenta rancidez, pero no es notable, y que la causa probable es la exposición del aceite a luz y calor o un almacenamiento no adecuado (p. 67).

Hay que tomar en cuenta que la degradación del biodiésel está relacionada con el índice de peróxidos del aceite del cual inició su conversión y si bien la rancidez no es notable, esto podría afectar la estabilidad del biocombustible. Esta afectación se debería a aumentos en la viscosidad y acidez del biodiésel. El aumento de estos dos parámetros generaría taponamientos de filtros y formación de depósitos en la cámara de combustión del motor que hace uso del biodiésel.

3.3. EFECTO DEL CATALIZADOR Y LA CONCENTRACIÓN DE ALCOHOL EN LA ETAPA DE TRANSESTERIFICACIÓN EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

La Tabla 3.10. se construyó a partir de los datos que se presentan en el Anexo X, y se presentan los resultados del rendimiento de biodiésel obtenidos para cada tratamiento. Se puede evidenciar que los resultados de los rendimientos de biodiésel indican aún en los niveles más bajos de 0,5 % de catalizador y a la relación 4:1 de alcohol/aceite la transformación del aceite del afrecho de café a biocombustible.

Tabla 3.10. Rendimiento de biodiésel obtenido en los ensayos realizados en la transesterificación del aceite para las diferentes relaciones de catalizador y alcohol

Ensayo	Catalizador (%)	Alcohol (alcohol/aceite)	Rendimiento (%)
1	0,5	4:1	26,032 ± 0,241
2	0,5	6:1	44,606 ± 0,081
3	0,5	8:1	61,144 ± 0,136
4	1	4:1	81,062 ± 0,153
5	1	6:1	43,482 ± 0,073
6	1	8:1	84,686 ± 0,102
7	1,5	4:1	76,277 ± 0,134
8	1,5	6:1	83,632 ± 0,080
9	1,5	8:1	97,463 ± 0,102

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

De la Tabla 3.10. y de los resultados del análisis estadístico que se presentan en el Anexo XI, se desprende para todas las relaciones de alcohol, existen diferencias estadísticamente significativas para las cantidades de catalizador.

Los resultados del análisis estadístico de varianza ANOVA a dos vías mostraron un valor de $p < 0,05$ para la interacción de ambos factores a un nivel de confianza del 95 %, y también se identificó que cada factor; catalizador y alcohol presentaba un valor de $p < 0,05$, lo cual significa que en el rendimiento del biodiésel influyó la

variación de cada factor y la interacción de ambos factores. En casi todos los casos el rendimiento se potenció a medida que cada uno de los factores aumentó de nivel.

En la Figura 3.10, se presenta el rendimiento de biodiésel para la relación más baja de alcohol/aceite y las tres relaciones de catalizador, se puede manifestar que si comparan los rendimientos obtenidos al utilizarse el catalizador en las relaciones de 1 y 1,5 % los rendimientos triplican el rendimiento obtenido con el catalizador al 0,5 %.

Al comparar únicamente los rendimientos de biodiésel para los catalizadores al 1 y 1,5 % el efecto sobre el rendimiento es contrario a lo que se espera, por cuanto existe una reducción en 4,79 %. Este efecto puede deberse a que el catalizador reaccionó con los ácidos libres del aceite dando lugar a la formación de una mayor cantidad de jabones (Pérez, 2013, p. 53).

La Figura 3.10. se construyó a partir de los datos que se presentan en el Anexo X.

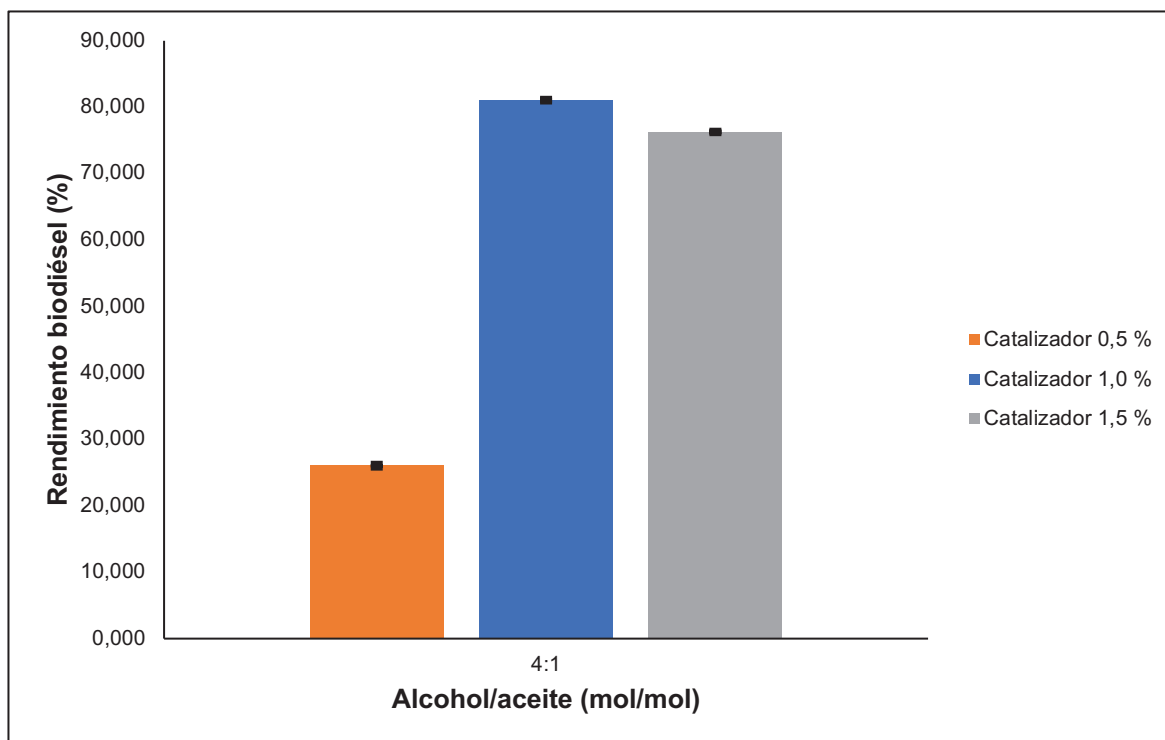


Figura 3.10. Rendimiento de biodiésel para la relación 4:1 alcohol/aceite y a las relaciones de catalizador de 0,5, 1,0 y 1,5 % de catalizador

En la Figura 3.11. se presenta la comparación de resultados de los rendimientos de biodiésel para la relación alcohol/aceite de 6:1 a las tres relaciones de catalizador. El rendimiento del biocombustible en una relación de catalizador del 1,5 % duplica los rendimientos de biodiésel al utilizar catalizadores al 0,5 y 1 %.

Entre las relaciones de catalizador del 0,5 y 1,0 % existe una diferencia estadísticamente significativa, por lo que se presentó un efecto adverso sobre el rendimiento del biodiésel, que resultó en una reducción del 1,12 %. Este efecto en la reducción del rendimiento pudo deberse a que una cantidad de catalizador se disolvió y consumió en la propia reacción de transesterificación, lo que ocasionó que formará sustancias de carácter básico difíciles de separar. (Pérez, 2016, p. 53).

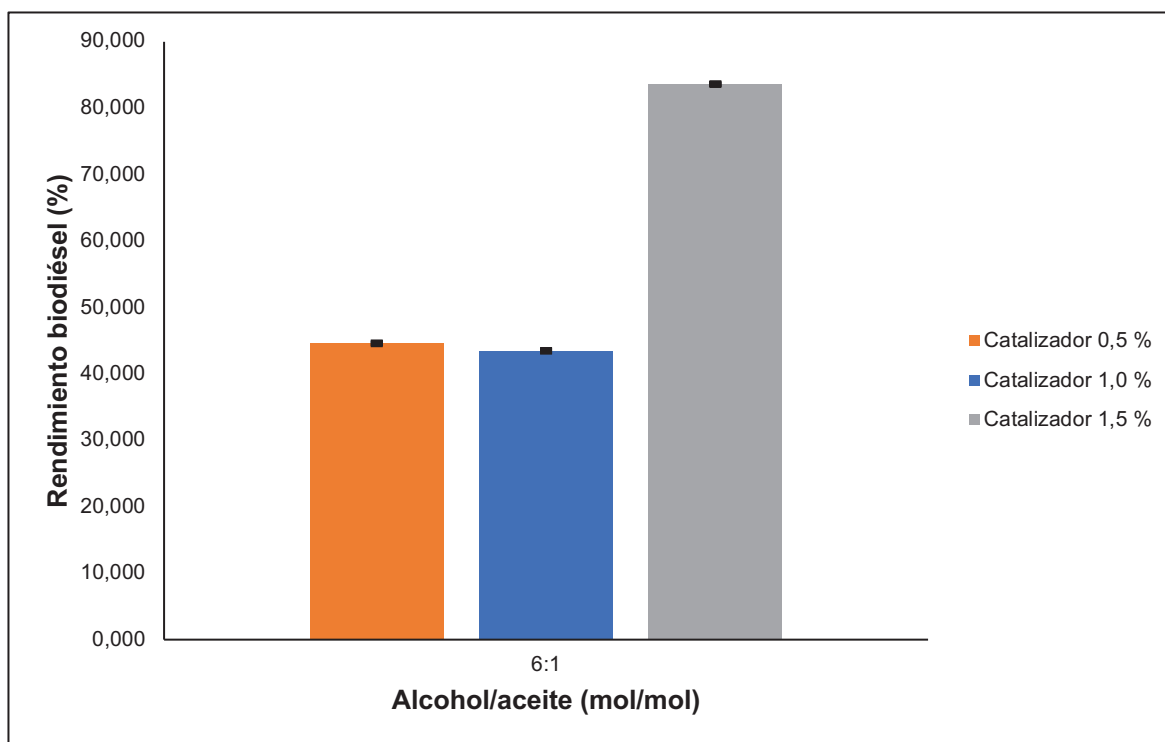


Figura 3.11. Rendimiento de biodiésel para la relación 6:1 alcohol/aceite y a las relaciones de catalizador de 0,5, 1,0 y 1,5 % de catalizador

Al aumentar el catalizador hasta el 1,5 % el efecto sobre el rendimiento permitió alcanzar el 83,63 % de biodiésel. Existe una diferencia estadísticamente significativa con relación a los otros niveles de catalizador. Esta diferencia se tradujo en la obtención de un rendimiento aproximadamente dos veces mayor que

los rendimientos alcanzados con los catalizadores del 0,5 y 1,0 %. La Figura 3.11. se construyó a partir de los datos que se presentan en el Anexo X.

En la Figura 3.12. construida partir de los datos del Anexo X, se muestran los resultados de los rendimientos de biodiésel para las tres proporciones de catalizador y a una relación de alcohol/aceite de 8:1. Se evidencia una tendencia hacia el aumento del rendimiento de biodiésel cuando se aumenta el porcentaje de catalizador. La diferencia de los rendimientos entre cada relación de catalizador es mayor al 10 %, sin embargo, no se llega a duplicar la diferencia entre el rendimiento más alto con respecto del más bajo.

Según García y García (2008), un valor alto de relación molar de alcohol/aceite afecta la separación de la glicerina debido al incremento de solubilidad, y si la glicerina se mantiene en la solución hace que la reacción se revierta con la consecuente disminución en el rendimiento del biodiésel. De allí que, si bien existe un aumento en el rendimiento de biodiésel obtenido; ese aumento es pequeño, porque al pasar del 1 al 1,5 % de catalizador el aumento es del 12,6 %, en tanto que al pasar del 0,5 al 1 % el aumento del rendimiento del biodiésel es del 23,5 % (p. 48).

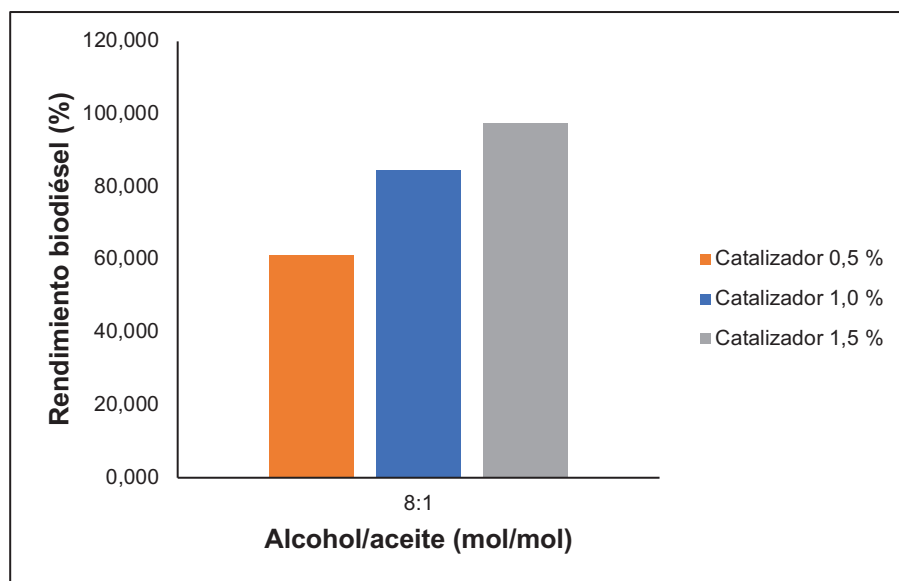


Figura 3.12. Rendimiento de biodiésel para la relación 8:1 alcohol/aceite y a las relaciones de catalizador de 0,5, 1,0 y 1,5 % de catalizador

Análisis del biodiésel

En la Tabla 3.11. se presentan los resultados de las propiedades principales que establecen la calidad del biocombustible, la misma que se elaboró con los datos que se presentan en el Anexo XII.

Tabla 3.11. Resultados de las propiedades valoradas en la calidad del biodiésel

Propiedad	Resultado
Viscosidad cinemática	6,88 cSt
Densidad	25,6 °api
Punto de inflamación	103,1 °C
Número de cetano	41,68
Contenido de agua	0,3 % V

Viscosidad cinemática

El biodiésel a partir del residuo de café tiene un valor de viscosidad cinemática a 37,8 °C de 6,88 cSt, valor que comparado con otros tipos de metil ésteres presentados en la Figura 3.13 se encuentra entre los más altos junto con el del cártamo; hay que resaltar que la viscosidad de los biocombustibles presentados tiene un rango entre 3 y 8 cSt, es decir, que la viscosidad cinemática del biodiésel de café se encuentra en el rango de viscosidades para un biodiésel, pero supera ligeramente el límite superior de la norma ASTM D445 que es de 6 mm²/s, lo que indicaría según ARPEL, Ganduglia y IICA (2009) la presencia de aceite que no reaccionó durante la transesterificación (p. 9).

De acuerdo con Capareda (2013) esa alta viscosidad no permitiría la circulación del combustible en el inyector y sistema de bombeo, con lo que también se acortaría la vida del motor (p. 183).

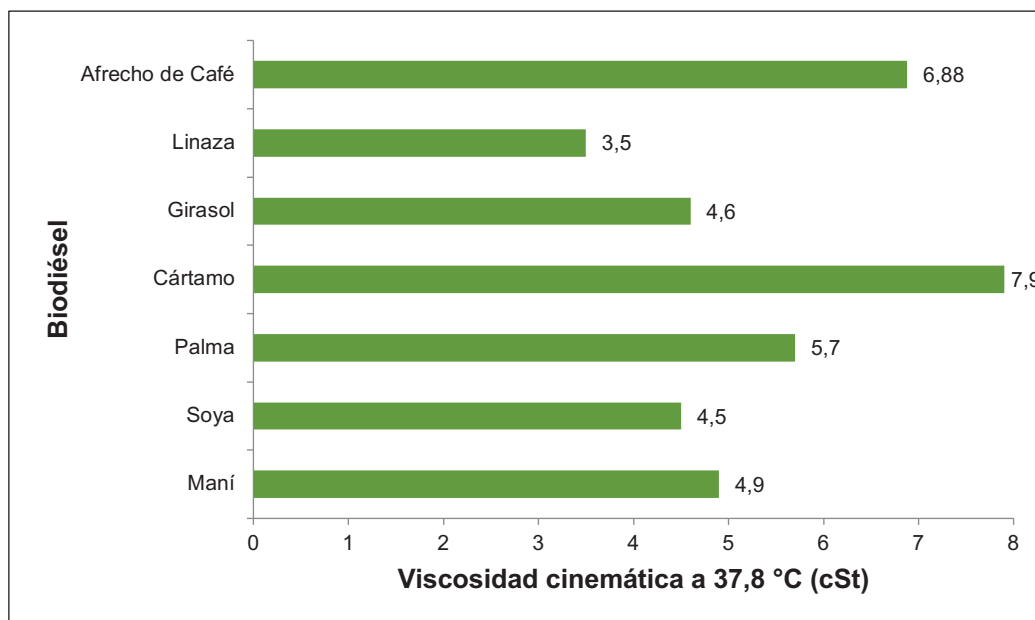


Figura 3.13. Comparación de la viscosidad cinemática a 37,8 °C (cSt) del biodiésel de café con varios tipos de biodiésel (Lal, 2005, p. 58)

Densidad API

La densidad obtenida fue de 25,6 grados API o 0,8989 mg/ml, valor esperado y muy cercano a los valores de densidad de los biocombustibles que se presentan en la Figura 3.14. y que son comúnmente producidos y utilizados. Este valor está dentro del rango de densidades de 0,85 a 0,90 mg/ml, aceptado en Europa, y países como Brasil, Argentina y Colombia. (ARPEL, Ganduglia y IICA, 2009, p. 37).

En ARPEL, Ganduglia e IICA (2009) los límites para la densidad en Europa y países como Brasil, Argentina, Colombia van de 0,85 – 0,90 mg/ml, por lo que según este rango la densidad obtenida está dentro de esos límites (p. 37).

Según Britton, Herrera, Lombana y Vega (2015) el valor de densidad del biodiésel de café obtenido indica una muy baja presencia de alcohol que queda como residuo del proceso de transesterificación (p. 53).

De acuerdo con Aracil et al. (2015) la densidad del biodiésel supone una limitación a la hora de mezclarse con diésel a partir de ciertos porcentajes porque supone una

reducción en el poder calorífico que a la postre deriva en un mayor consumo de combustible del motor (p. 407 - 408).

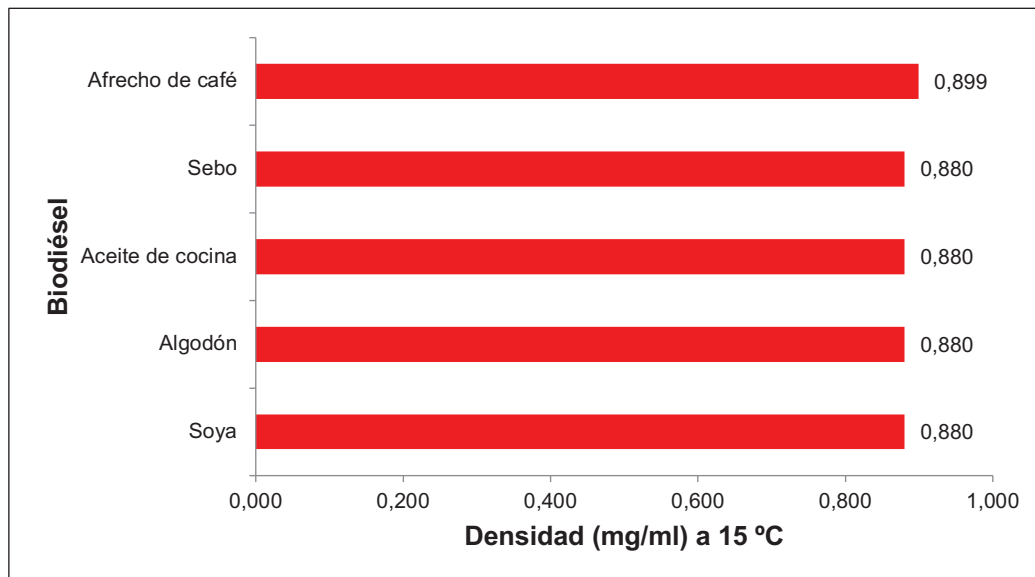
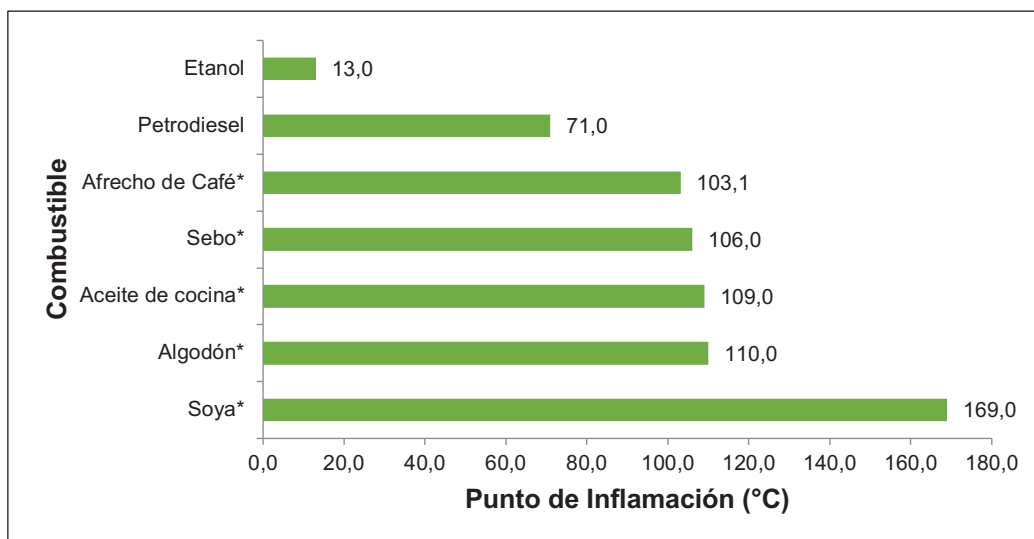


Figura 3.14. Comparativa de densidades (mg/ml) de tipos de biodiésel comunes y del biocombustible de residuo de café a la temperatura de 15 °C (Scragg, 2009, p. 158)

Punto de inflamación

El biodiésel obtenido arrojó como resultado un punto de inflamación de 103,1 °C. La Figura 3.15. muestra los diferentes valores de punto de inflamación que presentan diferentes tipos de biodiésel, petrodiesel y etanol, y en la cual cabe distinguir que el valor del biodiésel del residuo de café está por encima de los 100 °C, característica que comparte con el resto de biocombustibles y que según Rand (2003) estaría dentro del valor real mínimo de 100 °C (p.47).

De acuerdo con el resultado obtenido, y comparado con el petrodiesel y etanol, el biodiésel de café presenta un menor riesgo de inflamabilidad si se expone a flamas externas ya que según Karim (2012) altos valores de punto de inflamación originan un bajo riesgo de fuego (p. 164).



* (biodiésel)

Figura 3.15. Contraste de los puntos de inflamación (°C) de algunos combustibles y del biodiésel del afrecho de café

(El-Halwagi y Stuart, 2012, p. 619; Halford y Karp, 2011, p. 151; Scragg, 2009, p. 158)

Número de Cetano

El biodiésel objeto de este trabajo dio como resultado un número de cetano de 41,68, valor que comparado con los números de cetano del biodiésel de girasol, sebo, algodón y soya presentados en la Figura 3.16., es el más bajo, lo que sugiere que el contenido de metilésteres poliinsaturados en el biodiésel de café es mayor al 60 %, esto lo hace propenso a reacciones de oxidación. También indica la dificultad para autoinflamarse en un motor, generar depósitos y desgaste de pistones (Agudelo, Benjumea y Rios, 2009, p. 114; Aracil et al., 2015, p. 409).

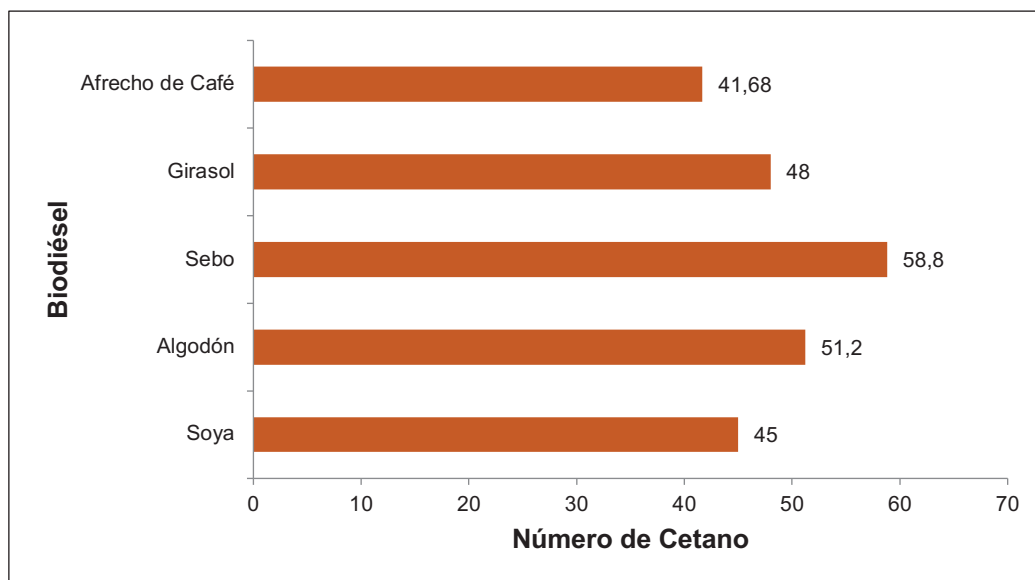


Figura 3.16. Número de cetano obtenido del biodiésel de residuo de café frente al número de cetano del biodiésel de girasol, sebo, algodón y soya
(Lal, 2013, p. 58; Scragg, 2009, p. 158)

Contenido de Agua

El contenido de agua fue del 0,3 % V, cantidad superior a la presentada en Sarin (2012), la cual está limitada a 0,05 % por volumen (p. 39).

El resultado obtenido y que se encuentra fuera del límite indica que el biodiésel del afrecho de café provocaría corrosión a los componentes del motor y un ambiente adecuado para la proliferación de microorganismos. A su vez también se generarían sedimentos con el consecuente aumento de la viscosidad y la obstrucción de filtros (ARPEL, Ganduglia e IICA, 2009, p. 9).

Luego de la eliminación de restos de catalizador, alcohol y jabones mediante el lavado sobrevino la separación del biodiésel del agua, el cual de acuerdo al presente análisis no fue eficiente y de acuerdo con Aracil et al. (2015) debe ser ajustado ya el contenido de agua depende única y exclusivamente de la evaporación durante del proceso de fabricación del biocombustible (p. 409).

3.4. DISEÑO BÁSICO DE LA PLANTA

3.4.1. CAPACIDAD DE LA PLANTA

La planta de biodiésel se diseñó para una carga de trabajo de 24 horas los 365 días del año, para lo cual los trabajadores operarán en tres turnos de ocho horas diarias.

Con base en la cantidad de afrecho de café de 260 ton/mes que se generan en las plantas industriales de la compañía de Elaborados El Café C.A., se obtuvo la cantidad de 0,36 ton/h de afrecho que se procesan a biodiésel,

En la Figura 3.17. se presenta el diagrama de bloques de la obtención de biodiésel del afrecho de café en la planta, y muestra la secuencia de cada uno de los materiales que intervienen; materia prima, hexano, metanol e hidróxido de potasio y los productos intermedios.

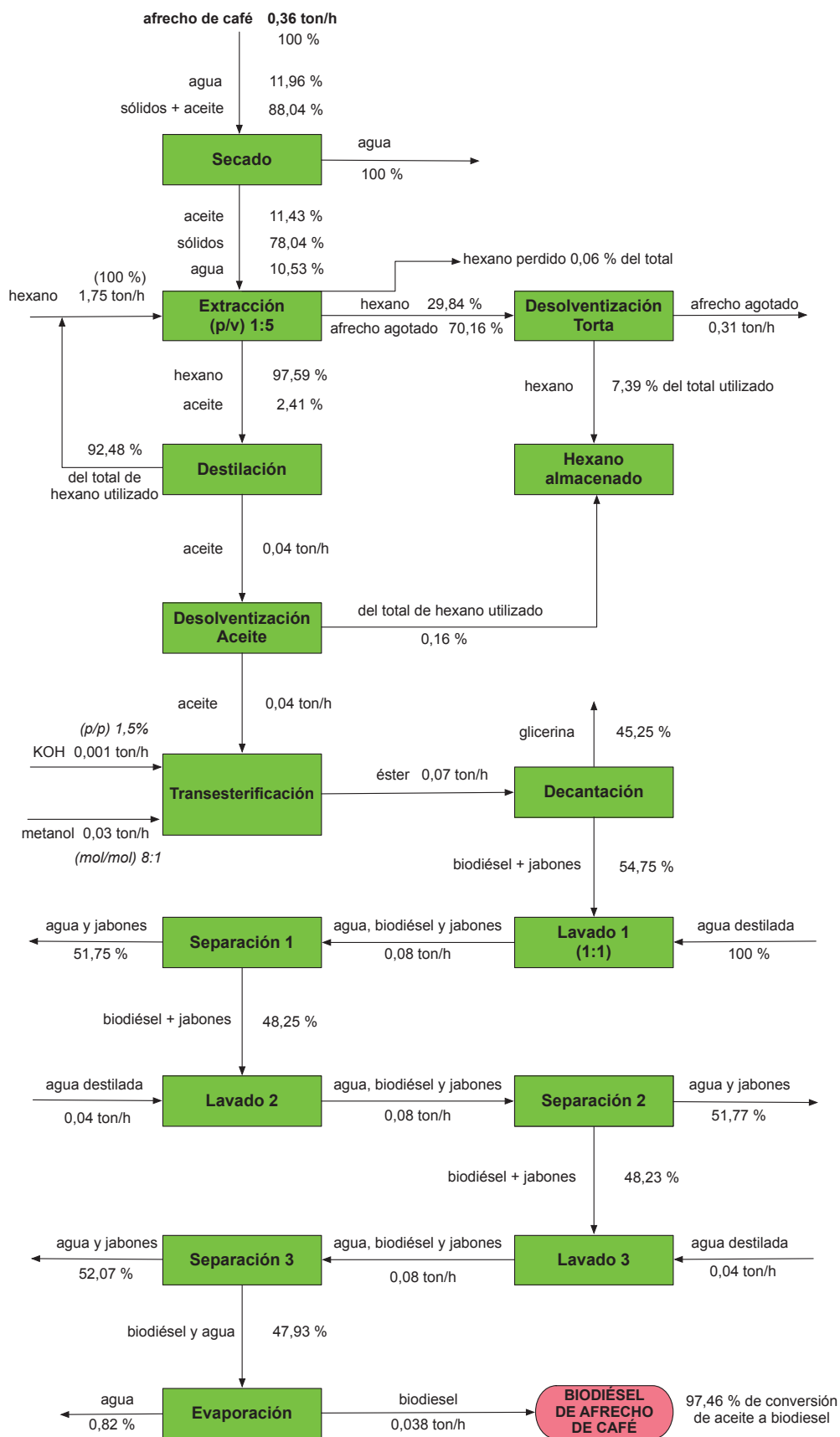


Figura 3.17. Diagrama de bloques del proceso de obtención del biodiésel a partir del afrecho de café en la planta

3.4.2. BALANCES DE MASA

En las Tablas 3.12. y 3.13. se presentan los flujos másicos para cada etapa del proceso. Los cálculos para cada etapa se presentan detalladamente en el Anexo XIII.

Tabla 3.12. Balance de materiales para cada proceso de la obtención de aceite de café en planta

Procesos	Materiales (ton/h)							
	Afrecho de café (HR=11,96 %)	Agua	Afrecho de café (HR=10,53 %)	Hexano	Miscela	Torta	Aceite de café	Afrecho agotado
Secado	E	0,36						
	S		0,01	0,35				
Extracción	E		0,35	1,75				
	S					1,66	0,44	
Destilación	E					1,66		
	S				1,62		0,04	
Desolventización torta	E							
	S				0,13			0,31
Desolventización aceite	E						0,04	
	S				0,00		0,04	

E: entradas; S: salidas

Tabla 3.13. Balance de materiales para cada proceso de la obtención de biodiésel de café en planta

Procesos	Materiales (ton/h)								
	Aceite de café	KOH	Metanol	Éster	Biodiesel	Glicerina	Agua destilada	Mezcla (agua, éster y jabones)	Agua y jabón
Transesterificación	E	0,04	0,001	0,03					
	S				0,07				
Decantación	E			0,07					
	S				0,04	0,03			

E: entradas; S: salidas

Tabla 3.13. Balance de materiales para cada proceso de la obtención de biodiésel de café en planta (continuación...)

Procesos	Materiales (ton/h)								
	Aceite de café	KOH	Metanol	Éster	Biodiesel	Glicerina	Agua destilada	Mezcla (agua, éster y jabones)	Agua y jabón
Lavado 1	E				0,04		0,04		
	S							0,08	
Separación 1	E							0,08	
	S				0,04				0,04
Lavado 2	E				0,04		0,04		
	S							0,08	
Separación 2	E							0,08	
	S				0,04				0,04
Lavado 3	E				0,04		0,04		
	S							0,08	
Separación 3	E							0,08	
	S				0,04				0,04
Evaporación	E				0,04				
	S				0,04				

E: entradas; S: salidas

3.4.3. BALANCE DE ENERGÍA

En la Tabla 3.14. se presentan los resultados de los calores de calentamiento y vaporización para cada etapa del proceso.

Tabla 3.14. Calor de calentamiento y calor de vaporización utilizado en cada etapa de proceso

Procesos	Masa (kg)	Calor específico (kJ/kg.°C)	ΔT (°C)	Calor de calentamiento (KJ)
Secado	356,16	1,79	85,00	54297,73
Extracción	1752,34	2,26	44,00	174252,60
Destilación	1660,38	2,25	44,00	164596,59
Desolventización torta	442,43	1,93	24,00	20522,47

Tabla 3.14. Calor de calentamiento y calor de vaporización utilizado en cada etapa de proceso (continuación...)

Procesos	Masa (kg)	Calor específico (kJ/kg.°C)	ΔT (°C)	Calor de calentamiento (KJ)
Desolventización aceite	40,06	1,99	24,00	1914,84
Total calor de calentamiento				415584,23
Procesos	Masa (kg)	λ (kJ/kg)	Calor latente de vaporización (KJ)	
Extracción	1752,34	334,72	586542,95	
Destilación	1620,32	334,72	542352,68	
Desolventización torta	132,02	334,72	44190,27	
Desolventización aceite	3,00	334,72	1005,61	
Total calor latente de vaporización				1174091,51
Total calor				1589675,74

Requerimiento de vapor

El vapor requerido es de 902,54 kg/h.

3.4.4. DIMENSIONAMIENTO Y ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS

Se seleccionaron los equipos principales con sus respectivas especificaciones consultadas en catálogo y de acuerdo a las capacidades requeridas para cada etapa del proceso. Se determinó cada capacidad requerida de acuerdo a los flujos másicos totales al ingreso de cada etapa de obtención del biodiésel. Los flujos másicos se obtuvieron de la realización de los balances de masa que se presentan en el Anexo XIII.

En la Tabla 3.15. se presentan las capacidades requeridas y seleccionadas por equipo para cada etapa del proceso. La elaboración de la Tabla 3.15 se realizó con los datos que se presentan en el Anexo XIII y la información del Anexo XIV.

Tabla 3.15. Capacidades requeridas y capacidades seleccionadas por equipo para cada etapa del proceso de obtención de biodiésel

Etapa	Equipo seleccionado	Capacidad de procesamiento requerida (ton/h)	Capacidad de procesamiento del equipo (ton/h)
Secado	Elevador - transportador	0,36	0,50
	Secador rotatorio	0,36	0,20 - 0,50
Extracción	Elevador de cangilones hermético	0,35	0,50
	Extractor percolador	0,35	1,00
Destilación	Columna de destilación	1,66	1,00 – 3,00
Desolventización	Desolventizador - tostador	0,48	1,00
Transesterificación	Precalentador de aceite	0,04	0,30
	Mini reactor de metóxido	0,03	0,01 - 0,05
	Reactor	0,07	0,03 - 0,10
Decantación	Tanques de decantación	0,08	0,05 - 0,01
	Máquina destiladora de agua	0,12	0,20
-	Caldero	0,90	0,60 - 1,00

En la Tabla 3.16. están descritos las dimensiones y cantidad requerida de los equipos principales seleccionados por catálogo para cada etapa del proceso de obtención de biodiésel. La Tabla 3.16. se elaboró de con base en la información de las especificaciones de cada equipo que se presenta en el Anexo XIV.

Tabla 3.16. Dimensiones y cantidad de los equipos principales seleccionados para la obtención de biodiésel del afrecho de café

Equipos	Dimensiones (m)				Cantidad
	Largo	Ancho	Altura total	Diámetro	
Elevador - transportador	2,20	0,50	3,60	-	1
Secador rotatorio	3,00	-	-	1,00	1
Elevador de cangilones hermético	4,20	0,50	3,60	-	1
Extractor percolador	4,00	1,20	2,80	-	1
Columna de destilación	-	-	3,50	1,20	1
Desolventizador - tostador	-	-	3,80	2,20	1
Precalentador de aceite	-	-	1,91	0,60	1
Mini reactor de metóxido	-	-	1,31	0,50	1

Tabla 3.16. Dimensiones y cantidad de los equipos principales seleccionados para la obtención de biodiésel del afrecho de café (continuación...)

Equipos	Dimensiones (m)				Cantidad
	Largo	Ancho	Altura total	Diámetro	
Reactor	-	-	2,10	0,60	1
Tanques de decantación	-	-	2,00	0,80	4
Máquina destiladora de agua	2,00	0,85	2,80	-	1
Caldero	3,00	1,50	1,50	-	1

3.5. LAY- OUT

Para el diseño y la distribución de los equipos principales y áreas de la planta se emplearon los criterios de buenas prácticas de manufactura (BPM). En los planos del Anexo XV se presenta la distribución física de equipos en planta con los planos y sus respectivos cortes.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El mayor porcentaje de pérdida de agua en el afrecho se dio a los 15 minutos para las tres temperaturas de secado. Los porcentajes de pérdida de humedad fueron: 41,67 % a 70 °C, 74,36 % a 90 °C y 76, 59 % a 110 °C.
- La extracción de aceite de café de afrecho sin secar permitió obtener hasta el 0,54 % de aceite, mientras que la disminución de la humedad en el afrecho hasta el 10,53 % con un tratamiento de secado de 110 °C facilitó la extracción hasta en un 11,25 %, es decir existió un efecto del secado en la obtención del aceite.
- El efecto del 1,5 % (p/p) del hidróxido de potasio y de la relación 1:8 (mol/mol) aceite – metanol en la reacción de transesterificación permitió obtener el mayor rendimiento de biodiésel hasta en un 97, 46 %.
- La calidad del aceite de café medida como densidad d25 (0,926), índice de acidez (6 mg/g), índice de saponificación (160,68 mg KOH/g), índice de yodo (108,32 cg/g) e índice de peróxidos (10,79 meq O₂/kg) reflejan que el aceite presenta un alto grado de insaturación que afectó las propiedades de de índice de acidez, viscosidad cinemática, densidad y número de cetano del biodiésel obtenido.
- La calidad del biodiésel medida como viscosidad (6,88 cSt), densidad (25,6 °API), punto de inflamación (103,1 °C), número de cetano (41,68) y contenido de agua (0,3 % V), indican que es un biodiésel propenso a reacciones de oxidación y formación de sedimentos.

RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio sobre el aprovechamiento de torta generada luego de la extracción, y también del glicerol formado de la etapa de transesterificación.
- Estudiar el rendimiento de biodiésel a partir de afrecho de café mediante transesterificación ácida.
- Adaptar el estudio objeto del proyecto y diseño de la planta industrial a la cantidad de afrecho generado en la producción nacional de café que se industrializa.

BIBLIOGRAFÍA

1. Acevedo, F., Cancino, B., Garcés, M., Inostroza, K., Rubilar, M., Scheuermann, E., Shene, C. y Uquiche, E. (2013). *Bioactive Compounds of Spent Coffee Grounds, a Coffee Industrial Residue*. III Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management, Sao Pedro, Brasil. Recuperado de http://www.sbera.org.br/3sigera/obras/in_sis_02_FraniscaAcevedo.PDF (Septiembre, 2013)
2. Acosta, F., Castro, P. y Cortijo, E. (2008). *Manual de construcción y uso de reactor para producción de biodiésel a pequeña escala* (1ra.ed.). Lima, Perú: Soluciones Prácticas – ITDG.
3. Acuña, F. (2006). *Química Orgánica* (1ra. ed.). San José, Costa Rica: EUNED
4. Agarkar, P., Fursule, R. y Kulkarni, J. (2006). *Biochemistry: Basic and Applied* (3ra. ed.). Pune, India: Nirali Prakashan.
5. Agudelo, J., Benjumea, P. y Rios, L. (2009). *Biodiésel: Producción, calidad y caracterización* (1ra. ed.). Medellín, Colombia: Editorial Universidad de Antioquia.
6. Allinger, N., Cava, M., Jongh, D., Level, N. y Stevens, C. (1984). *Química Orgánica*. (2da. ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté.
7. Alvarado, M. y Rojas, C. (2007). *El cultivo y beneficiado del Café* (1ra.ed.). San José, Costa Rica: EUNED.
8. Anastopoulos, G., Deligiannis, A., Papazafeiropoulou, A. y Zannikos, F. (2011). Waste Coffe Grounds as an Energy Feedstok. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Fanourios_Zannikos/publication/258121575_Waste_Coffee_Grounds_as_an_Energy_Feedstock/links/004

63527118e6775dd000000/Waste-Coffee-Grounds-as-an-Energy-Feedstock.pdf (Noviembre, 2017)

9. ANECAFE. (2015). *Exportación de café del Ecuador por calidad: Años - 1992 - 2015*. Recuperado de <http://www.anecafe.org.ec/wpcontent/uploads/2015/03/Acumulado-porcalidad-anio-1992-2015-1.pdf> (Marzo, 2015)
10. ANECAFE. (2015). *Exportación de café del Ecuador por Exportador: Enero/Diciembre-2014*. Recuperado de <http://www.anecafe.org.ec/wp-content/uploads/2014/03/ACUMULADO-EXPORTADORES-2014.pdf> (Marzo, 2015)
11. ANECAFE. (2015). *Exportación de café del Ecuador: Resumen por exportador/calidad enero – diciembre 2015*. Recuperado de <http://www.anecafe.org.ec/wp-content/uploads/2015/03/Acumulado-exportador-por-calidad-anio-2015-1.pdf> (Marzo, 2105)
12. AOAC. (2005). *Oficial Methods of Analysis of AOAC International*. (18th. ed.). Gaithersbueg, United States of América.
13. Aracil, J., Bahillo, R., Ballesteros, M., Fernández, J., González, P., Gutiérrez, F., Rodríguez, L., Sánchez, J., San Miguel, G., y Vázquez, J., (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. (1ra. ed.). Madrid, España: Ediciones Mundi – Prensa.
14. ARPEL, Ganduglia, F. y IICA. (2009). *Manual de Biocombustibles*. Recuperado de http://www.olade.org/sites/default/files/CIDA/IICA/Manual_Biocombustibles_ARPEL_IICA.pdf (Junio, 2012)
15. ASTM. (2000). *D-287 Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum Products (Hydrometer Method)*. Recuperado de <http://file.yizimg.com/175706/2011090810373176.pdf> (Junio, 2013)

16. ASTM. (2003). *D-93 Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester*. Recuperado de <http://www.shxf17.com/pdf/ASTMD93-02a.pdf> (Junio 2013)
17. ASTM. (2006). *D-445 Standard Test Method for Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (Kinematic and Dynamic Viscosity)*. Recuperado de <http://www.chemyiqi.com/pdf/astmd445-2006.pdf> (Junio 2013)
18. ASTM. (2007). *D-976 Standard Test Method for Calculate Cetane Index of Distillate Fuels*. Recuperado de <http://docslide.net/documents/designation-d976-06-standard-test-method-for-calculated-cetane-indexof.html> (Junio 2013)
19. ASTM. (2011). *D-4006 Standard Test Method for Water in Crude Oil by Distillation*. Recuperado de <http://docslide.us/documents/astm-d4006-standard-test-method-for-water-in-crude-oil-by-distillation.html> (Junio 2013).
20. Bailey, A. (1984). *Aceites y Grasas Industriales*. (2da. ed.). Madrid, España: Editorial Reverté, S. A.
21. Béjar, M. (2014). *Obtención de aceites de orujo de oliva: INAK0109*. (1ra. ed.). Antequera, España: IC Editorial.
22. Bolaños, N., Herrera, C. y Lutz, G. (2003). *Química de los alimentos: Manual de Laboratorio*. (1ra. ed.). San José, Costa Rica: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
23. Britton, E., Herrera, S., Lombana, J., y Vega, J. (2015). *Análisis del sector biodiésel en Colombia y su cadena de suministro*. (1ra. ed.). Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte.

24. Camprubí, A. (2007). *Electro – Erosión: Fundamentos de su Física y su Técnica*. (1ra. ed.). México D. F., México: Marcombo Ediciones Técnicas.
25. Capareda, S. (2013). *Introduction to Biomass Energy Conversions*. (1ra. ed.). Boca Raton, United States of America: CRC Press.
26. Castillo, A., Cuartas, P. y Velásquez, J. (2011). Obtención de Biodiésel a Partir de Aceite de *jatropha curcas L* por Transesterificación Etanólica. *Revista de Investigaciones Aplicadas*, 5(1), 34-41.
27. Castillo, L., Castro, P. y Coello, J. (2007). *Opciones para la producción y uso del Biodiésel en el Perú*. (1ra. ed.). Lima, Perú: Soluciones Prácticas ITDG.
28. CENICAFE. (2010). *Los Subproductos del Café: Fuente de Energía Renovable*. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/publications/avt039_3.pdf (Octubre, 2015)
29. Centurion, F. (2015). Biocombustibles: biodiésel y sus materias primas más viables. Recuperado de <https://www.cetapar.com.py/biodiesel-y-sus-materias-primas-mas-viables/> (Agosto, 2016)
30. Chakrabarty, M. (2009). *Chemistry and Technology of Oils and Fats*. (1ra. ed.). New Delhi, India: Allied Publishers Pvt. Ltd.
31. Chauhan, B. (2008). *Principles of Biochemistry and Biophysics*. (1ra. ed.). New Delhi, India: University Science Press.
32. Ching, H. y Jui-Fu, S. (2008). *Biocatalysis and Bioenergy*. (1ra. ed.). New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
33. Costa, J., Cervera, S., Cunill, F., Esplugas, S., Mans, C. y Mata, J. (2004). *Curso de ingeniería química: introducción a los procesos y los*

fenómenos de transporte. (1ra. ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté.

34. Coulson, J. y Richardson, J. (1981). *Ingeniería química: operaciones básicas Vol II*. (3ra. ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté.
35. Crocker, M. (2010). *Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals*. doi: 10.1039/9781849732260
36. Demirbas, A. (2008). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. doi: 10.1007/978-1-84628-995-8
37. Dufey, A. (2006). *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas*. Recuperado de http://pubs.iied.org/pdfs/15504_SIIED.pdf? (Septiembre, 2103)
38. Dutta, B. (2007). *Principles of mass transfer and separation processes* (1ra.ed.). New Delhi, India: Prentice Hall of India Private Limited.
39. El-Halwagi, M. y Stuart, P. (2012). *Integrated Biorefineries: Design, Analysis, and Optimization* (1ra.ed.). Boca Raton, United States of America: CRC Press.
40. Envirotech. (2005). *Reducción de emisiones y economía de combustible*. Recuperado de <http://envirotech-la.com/sites/default/files/RFolletoVitalizer.pdf> (Febrero, 2014)
41. Fan, L. y Soccol C. (2005). *Coffee Residues: Shiitake Cultivation*. Recuperado de <http://www.alohamedicinals.com/book2/chapter-4-02-02.pdf> (Agosto, 2013)

42. FEDAPAL. (2015). *Exportaciones de Aceite de Palma, por Producto. Estadísticas Internacionales*. Recuperado de <http://fedepal.com/web/index.php/joomla/estadisticas-nacionales> (Noviembre, 2015)
43. Figueroa, J. (2011). El potencial uso de los residuos del café. Recuperado de <http://www.revistaelagro.com/el-potencial-uso-de-los-residuos-del-cafe/> (Mayo, 2014)
44. Franco, D. (2012). *Aceite de Salvado de Arroz*. Recuperado de http://www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/sectores/aceites/productos/AceiteArroz_06Jun.pdf
45. Fukuda, H., Kondo, A. y Noda, H. (2001). Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92(5), 405-416.
46. García, J. A. y García, J. M. (2006). *Biocarburantes Líquidos: Biodiésel y Bioetanol*. Recuperado de http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt4_biocarburantes_liquidos_biodiesel_y_bioetanol.pdf (Mayo, 2012)
47. Gómez, A. y Valcárcel, M. (1988). *Técnicas analíticas de separación*. (1ra. ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté.
48. Gunstone, F. (2004). *The Chemistry of Oils and Fats: Sources, Composition, Properties and Uses* (1ra.ed.). Oxford, United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd.
49. Halford, N. y Karp, A. (2011). *Energy Crops*. doi: 10.1039/9781849732-204-8
50. Harrison, W. (1935). *All about Coffee* (2da.ed.). New York, United States of América: The Tea & Coffee Trade Journal Company.

51. Hartel, R. y Heldman, D. (1999). *Principles of Food Processing*. New York, United States: Aspen Publishers, Inc.
52. Helman, R. y Singh, R. (1997). *Introducción a la ingeniería de alimentos*. (2da. ed.). Zaragoza, España: Acribia S. A.
53. IICA. (2007). *Preguntas y Respuestas más Frecuentes sobre Biocombustibles*. Recuperado de <http://www.iica.int/Esp/organización/LTGC/agroenergia/Documentos%20Agroenerga%20y%20Biocombustibles/Preguntas%20y%20respuestas%20más%20frecuentes%20sobre%20biocombustibles.pdf> (Mayo, 2012).
54. IICA. (2010). *Atlas de la Agroenergía y los Biocombustibles en las Américas: II Biodiésel*. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=-PGOXsgc9uEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (Mayo, 2012)
55. INEN. (2001a). *NTE 0035:73 Determinación de la Densidad Relativa*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/35.pdf> (Julio, 2012)
56. INEN. (2001b). *NTE 0038:73 Determinación de la Acidez*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/38.pdf> (Julio, 2012)
57. INEN. (2001c). *NTE 0040:73 Determinación del Índice de Saponificación*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/40.pdf> (Julio, 2012)
58. INEN. (2001d). *NTE 0037:73 Determinación del Índice de Yodo*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/37.pdf> (Julio, 2012)

59. INEN. (2001e). *NTE 0277:78 Determinación del Índice de Peróxido*. Recuperado de <http://www.inen.gob.ec/images/pdf/nte/277.pdf> (Julio, 2012)
60. International Coffee Organization. (2005). *Posibles usos alternativos de los residuos y subproductos del café*. Recuperado de <http://www.ico.org/documents/ed1967c.pdf> (Agosto, 2013)
61. ICAFE. (2012). *Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica*. En XLI Congreso Nacional Cafetalero Ordinario, San José, Costa Rica. Recuperado de http://www.icafe.go.cr/sector_cafetalero/estadsticas/infor_activ_cafetal/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera%202012.pdf (Septiembre, 2013)
62. Kafarov, V., Moreno, N. y Plata., V. (2009). Desarrollo de una Metodología de Transesterificación de Aceite en la cadena de Producción de Biodiésel a partir de Microalgas. *Prospect*, 7(2), 35-00.
63. Kango, N. (2010). *Textbook of Microbiology*. (1ra. ed.). New Delhi, India: I. K. International Publishing House Pvt. Ltd.
64. Karim, G. (2012). *Fuels, Energy and Environment*. (1ra. ed.). Boca Raton, United States of America: CRC Press.
65. Kasture, A., Mahadik, K., More, H. y Wadodkar, S. (2007). *Pharmaceutical Analysis: volumen I*. (3ra. ed.). Pune, India: Nirali Prakashan
66. King, A. (2010). Research Advances: Fill'er up on Chicken, Shrimp, and Coffee. *American Chemical Society and Division of Chemical Education*, 87(3), 243-244.
67. Lal, B. (2005). *Wealth from waste: trends and technologies*. (2da. ed.). New Delhi, India: Rajkamal Electric Press.

68. Larosa, R. J. (2000). *Proceso para la producción de Biodiésel, Refinación de Glicerina*. Recuperado de <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf> (Junio, 2012)
69. Luthria, D. (2004). *Oil Extraction and Analysis: Critical Issues and Comparative Studies*. (1ra. ed.). Kansas City, United States of America: AOCS Press.
70. Moreira, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiésel: la influencia del contenido y concentración de los ácidos grasos. *Ingenium*. Vol 1(25), 53 – 61.
71. Moser, B. (2009). Biodiesel Production, Properties, and Feedstocks. *The Society for In Vitro Biology*, 45(1), 229-266. doi: 10.1007/s11627-009-9204-z
72. Moss, A. y Nonhebel. (1979). *El secado de sólidos en la industria química*. (1ra. ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
73. Mujumdar, A. (1995). *Handbook of Industrial Drying*. (2da. ed.). Québec, Canada: CRC Press.
74. National Renewable Energy Laboratory. (2008). *Biodiesel Handling and Use Guide*. Recuperado de <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/pdfs/43672.pdf> (Agosto, 2013)
75. Nimcevic, D., Puntigam, R., Wörgetter, M. y Gapes, J. (2000). Preparation of Rapeseed oil Esters of Lower Aliphatic Alcohols. *JAACS*, 77(3), 275-280.
76. Pahl, G. (2008). *Biodiesel: Growing a New Energy Economy*. (2da. ed.). White River Junction, United States of America: Chelsea Green Publishing.

77. Pérez, J. (2016). *Biocombustibles*. (1ra. ed.). Ciudad de México, México: Fondo de Cultura Económica.
78. Primo, E., (1995). *Química orgánica básica y aplicada: De la molécula a la industria (Tomo 2)* (1ra. ed.). Barcelona, España: Editorial Reverté.
79. PRO ECUADOR. (2013). *Análisis sectorial del Café*. Recuperado de http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2013/05/PROEC_AS_2013_CAFE.pdf (Agosto, 2013)
80. Rand, S. (2003). *Significance of Tests for Petroleum Products* (7ma.ed.). Bridgeport, United States of América: ASTM International.
81. Ravicumar, P. y Sivaramakrishnan, K. (2012). Determination of Cetane Number of Biodiesel and it's Influence on Physical Properties. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7(2), 205-211
82. Romano, S. y Sorichetti, P. (2010). *Dielectric Spectroscopy in Biodiesel Production and Characterization*. doi: 10.1007/978-1-84996-519-4
83. Sarin, A. (2012). *Biodiesel: Production and Properties* (1ra.ed.). Dorchester, United Kingdom: Henry Ling Limited.
84. Scragg, A. (2009). *Biofuels: Production, Application and Development* (1ra.ed.). Cambridge, United Kingdom: CABI.
85. Tojo, G. y Ocón, J. (1980). *Problemas de Ingeniería Química, Operaciones Básicas: Tomo II* (1ra.ed.). Madrid, España: Aguilar S. A. Ediciones.
86. Torossi, F. (2006). Reacciones en contexto: la Transesterificación en la producción de Biodiésel a partir de Aceite de fritura usado. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 102(3), 43-00

87. USDA. (2013). *Coffee: worlds markets and trade*. Recuperado de <http://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf> (Agosto,2013)
88. U. S. Department of Energy. (2011). *Vehicle technologies program*. Recuperado de <http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/47504.pdf> (Febrero, 2013)
89. Valencia, N. (2000). *Manejo de Residuos en la Agroindustria Cafetera*. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxx.pdf> (Febrero, 2012)
90. Vanaclocha, A. (2005). *Diseño de industrias agroalimentarias*. Madrid, España: Ediciones Mundi-prensa
91. Villa, M. (2007). *Manual de prácticas: química General*. (2da. ed.). Medellín, Colombia: Sello Editorial Universidad de Medellín.
92. Wagner, R. (2003). *Historia del Café en Guatemala* (1ra.ed.). Bogotá, Colombia: Benjamín Villegas & Asociados.
93. WaterAid. (2016). *El agua: ¿A qué precio?. Estado mundial del agua 2016*. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiupPud5qDVAhVBWxoKHVi6Bj8QFggiMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.wateraid.org%2Fuk%2F~%2Fmedia%2FPublications%2Fel_agua_a_que_precio.pdf%3Fla%3Den-GB&usg=AFQjCNHphhD6G5m5d1N1i5p7hTEJML9mKw (Enero, 2017)
94. Wauquier, J. (2004). *El refino del Petróleo: Petróleo crudo, productos petrolíferos, esquemas de fabricación* (1ra.ed.). Madrid, España: Ediciones Díaz Santos.

ANEXOS

ANEXO I

UNIDAD DE EXTRACCIÓN



Figura AI.1. Unidad en laboratorio para la extracción de aceite del afrecho de café

ANEXO II

UNIDAD DE TRANSESTERIFICACIÓN

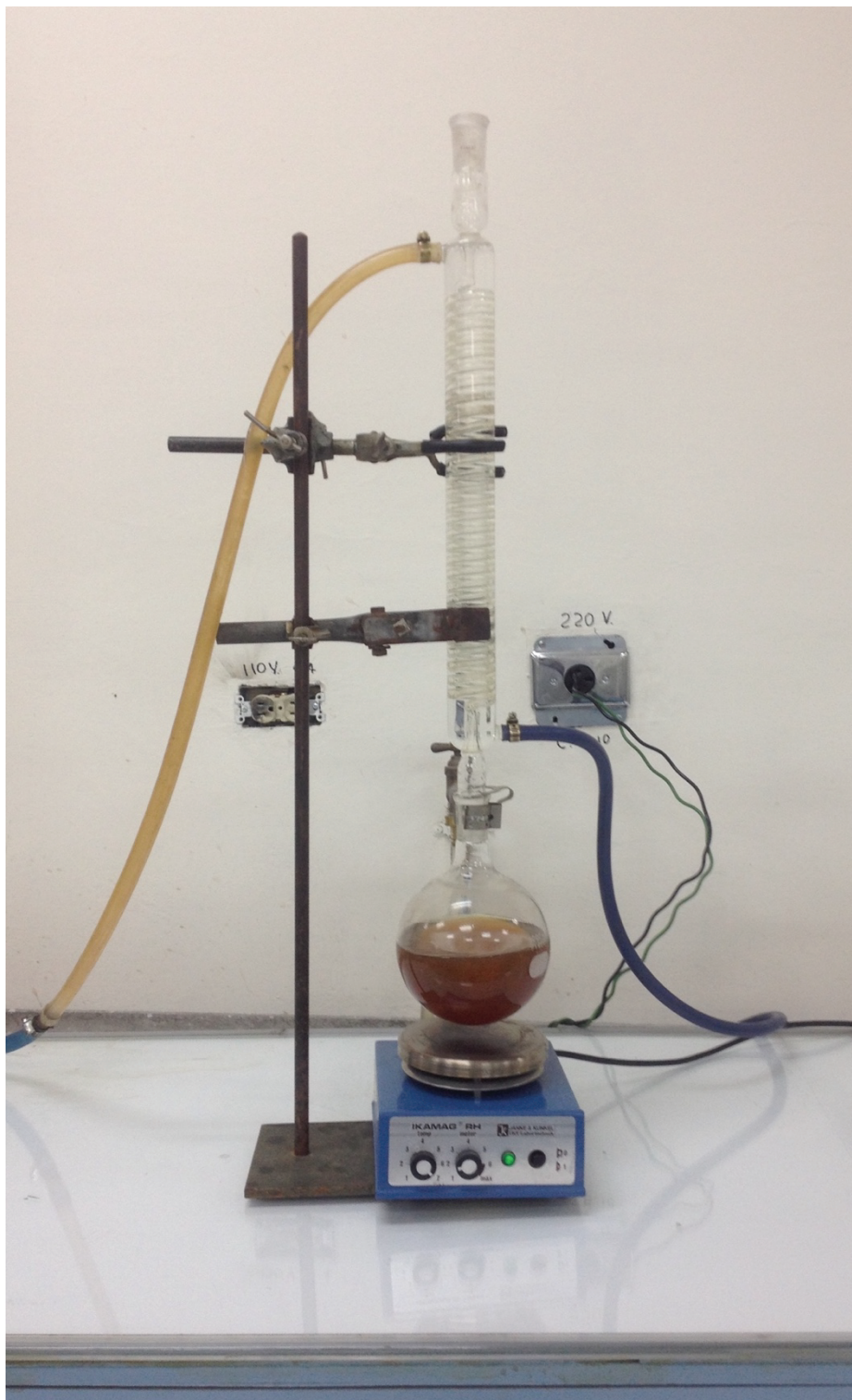




Figura AII.1. Unidad preparada en laboratorio para la reacción de transesterificación

ANEXO III

INFORME DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS PROXIMAL DEL AFRECHO DE CAFÉ



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA (DECAB)
 Campus Politécnico José Rubén Orellana Ricaurte
 Direc.: Pasaje Andalucía E12-A y Alfredo Mena Caamaño . Telf.: 2976-300
 Personas de Contacto: Ing. Silvia Oleas. Telf. : 2976300 ext. 4236 e-mail: silvia.oleas@epn.edu.ec
 Tlga. Elisabeth Venegas . Telf.: 2976300 ext. 2122 . e-mail: elisabeth.venegas@epn.edu.ec
 Quito- Ecuador



INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS O TRABAJO

ORDEN: DC-OTI0110-2016

SOLICITANTE: FERNANDO GUERRÓN- Estudio de las condiciones de proceso para la obtención de biodiesel a partir de afrecho de café – Ing. Neyda Espín.

IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) Y SERVICIO (S)

Descripción de la muestra:	Código de la muestra
AFRECHO DE CAFÉ	DC-OTI0110-201

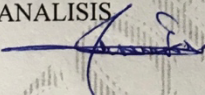
RESULTADOS

Muestra	Analito	Unidades	Resultados	Método
AFRECHO DE CAFÉ	Humedad	% (g/100g)	12,09	AOAC 934.01
	Cenizas		1,12	AOAC 923.03
	Extracto Etéreo		11,0	AOAC 920.39 y VELP SCIENTIFICA SER 148
	Proteína		11,57	AOAC 2001.11
	Carbohidratos totales por diferencia		64,22	FAO

COMENTARIOS:

1.- Se reporta la media de dos determinaciones de cada analito.

PROFESIONAL RESPONSABLE DEL ANALISIS



 Dra. Susana Fuertes

QUEJAS Y SUGERENCIAS

El cliente puede canalizar las quejas sobre los resultados de los análisis, sobre el tiempo de entrega del informe, u otro aspecto, a través del Jefe del DECAB, o de la persona Encargada de Recepción de Muestra y Atención al Cliente, ya sea en forma verbal o en forma escrita hasta 8 días después de la entrega del informe. En el DECAB se mantiene un registro de quejas y sugerencias con el fin de mejorar el Servicio al Cliente.

El laboratorio no se responsabiliza por el muestreo realizado antes de la entrega de las muestras al DECAB, pero si se responsabiliza de las muestras recibidas, tal como se las entrega.

Página 1 de 1

ANEXO IV

PROPIEDADES DE VAPOR SATURADO

TABLA A.4.2
Propiedades del vapor saturado.

Temperatura (°C)	Presión de vapor (kPa)	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg · K)	
		Líquido	Vapor saturado	Líquido (H _l)	Vapor saturado (H _g)	Líquido	Vapor saturado
0.01	0.6113	0.0010002	206.136	0.00	2501.4	0.0000	9.1562
3	0.7577	0.0010001	168.132	12.57	2506.9	0.0457	9.0773
6	0.9349	0.0010001	137.734	25.20	2512.4	0.0912	9.0003
9	1.1477	0.0010003	113.386	37.80	2517.9	0.1362	8.9253
12	1.4022	0.0010005	93.784	50.41	2523.4	0.1806	8.8524
15	1.7051	0.0010009	77.926	62.99	2528.9	0.2245	8.7814
18	2.0640	0.0010014	65.038	75.58	2534.4	0.2679	8.7123
21	2.487	0.0010020	54.514	88.14	2539.9	0.3109	8.6450
24	2.985	0.0010027	45.883	100.70	2545.4	0.3534	8.5794
27	3.567	0.0010035	38.774	113.25	2550.8	0.3954	8.5156
30	4.246	0.0010043	32.894	125.79	2556.3	0.4369	8.4533
33	5.031	0.0010053	28.011	138.33	2561.7	0.4781	8.3927
36	5.917	0.0010063	23.940	150.86	2567.1	0.5188	8.3336
40	7.384	0.0010078	19.523	167.57	2574.3	0.5725	8.2570
45	9.593	0.0010099	15.258	188.45	2583.2	0.6387	8.1648
50	12.349	0.0010121	12.032	209.33	2592.1	0.7038	8.0763
55	15.758	0.0010146	9.568	230.23	2600.9	0.7679	7.9913
60	19.940	0.0010172	7.671	251.13	2609.6	0.8312	7.9096
65	25.03	0.0010199	6.197	272.06	2618.3	0.8935	7.8310
70	31.19	0.0010228	5.042	292.98	2626.8	0.9549	7.7553
75	38.58	0.0010259	4.131	313.93	2635.3	1.0155	7.6821
80	47.39	0.0010291	3.407	334.91	2643.7	1.0753	7.6122
85	57.83	0.0010325	2.828	355.90	2651.9	1.1343	7.5445
90	70.14	0.0010360	2.361	376.92	2660.1	1.1925	7.4791
95	84.55	0.0010397	1.9819	397.96	2668.1	1.2500	7.4159
100	101.35	0.0010435	1.6729	419.04	2676.1	1.3069	7.3549
105	120.82	0.0010475	1.4194	440.15	2683.8	1.3630	7.2958
110	143.27	0.0010516	1.2102	461.30	2691.5	1.4185	7.2387
115	169.06	0.0010559	1.0366	482.48	2699.0	1.4734	7.1833
120	198.53	0.0010603	0.8919	503.71	2706.3	1.5276	7.1296
125	232.1	0.0010649	0.7706	524.99	2713.5	1.5813	7.0775
130	270.1	0.0010697	0.6685	546.31	2720.5	1.6341	7.0269
135	313.0	0.0010746	0.5822	567.69	2727.3	1.6870	6.9777
140	361.3	0.0010797	0.5089	589.13	2733.9	1.7391	6.9299
145	415.4	0.0010850	0.4463	610.63	2740.3	1.7907	6.8833
150	475.8	0.0010905	0.3928	632.20	2746.5	1.8418	6.8379
155	543.1	0.0010961	0.3468	653.84	2752.4	1.8925	6.7935
160	617.8	0.0011020	0.3071	675.55	2758.1	1.9427	6.7502
165	700.5	0.0011080	0.2727	697.34	2763.5	1.9925	6.7078
170	791.7	0.0011143	0.2428	719.21	2768.7	2.0419	6.6663
175	892.0	0.0011207	0.2168	741.17	2773.6	2.0909	6.6256
180	1002.1	0.0011274	0.19405	763.22	2778.2	2.1396	6.5857
190	1254.4	0.0011414	0.15654	807.62	2786.4	2.2359	6.5079
200	1553.8	0.0011565	0.12736	852.45	2793.2	2.3309	6.4323
225	2548	0.0011992	0.07849	966.78	2803.3	2.5639	6.2503
250	3973	0.0012512	0.05013	1085.36	2801.5	2.7927	6.0730
275	5942	0.0013168	0.03279	1210.07	2785.0	3.0208	5.8938
300	8581	0.0010436	0.02167	1344.0	2749.0	3.2534	5.7045

Fuente: Abreviado de Keenan *et al.* (1969) Copyright © 1969 John Wiley and Sons. Impreso con permiso de John Wiley and Sons, Inc.

ANEXO V

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA A LA PRESIÓN DE SATURACIÓN

A.4 Propiedades físicas del agua y del aire

TABLA A.4.1

Propiedades físicas del agua a la presión de saturación.

Temperatura <i>t</i>	<i>T</i>	Densidad ρ	Coeficiente de expansión térmica volumétrica β	Calor específico c_p	Conductividad térmica <i>k</i>	Difusividad térmica α	Viscosidad absoluta μ	Viscosidad cinemática ν	Número de Prandtl Pr
0	273.15	999.9	-0.7	4.226	0.558	0.131	1793.636	1.789	13.7
5	278.15	1000.0	—	4.206	0.568	0.135	1534.741	1.535	11.4
10	283.15	999.7	0.95	4.195	0.577	0.137	1296.439	1.300	9.5
15	288.15	999.1	—	4.187	0.587	0.141	1135.610	1.146	8.1
20	293.15	998.2	2.1	4.182	0.597	0.143	993.414	1.006	7.0
25	298.15	997.1	—	4.178	0.606	0.146	880.637	0.884	6.1
30	303.15	995.7	3.0	4.176	0.615	0.149	792.377	0.805	5.4
35	308.15	994.1	—	4.175	0.624	0.150	719.808	0.725	4.8
40	313.15	992.2	3.9	4.175	0.633	0.151	658.026	0.658	4.3
45	318.15	990.2	—	4.176	0.640	0.155	605.070	0.611	3.9
50	323.15	988.1	4.6	4.178	0.647	0.157	555.056	0.556	3.55
55	328.15	985.7	—	4.179	0.652	0.158	509.946	0.517	3.27
60	333.15	983.2	5.3	4.181	0.658	0.159	471.650	0.478	3.00
65	338.15	980.6	—	4.184	0.663	0.161	435.415	0.444	2.76
70	343.15	977.8	5.8	4.187	0.668	0.163	404.034	0.415	2.55
75	348.15	974.9	—	4.190	0.671	0.164	376.575	0.366	2.23
80	353.15	971.8	6.3	4.194	0.673	0.165	352.059	0.364	2.25
85	358.15	968.7	—	4.198	0.676	0.166	328.523	0.339	2.04
90	363.15	965.3	7.0	4.202	0.678	0.167	308.909	0.326	1.95
95	368.15	961.9	—	4.206	0.680	0.168	292.238	0.310	1.84
100	373.15	958.4	7.5	4.211	0.682	0.169	277.528	0.294	1.75
110	383.15	951.0	8.0	4.224	0.684	0.170	254.973	0.268	1.57
120	393.15	943.5	8.5	4.232	0.685	0.171	235.360	0.244	1.43
130	403.15	934.8	9.1	4.250	0.686	0.172	211.824	0.226	1.32
140	413.15	926.3	9.7	4.257	0.684	0.172	201.036	0.212	1.23
150	423.15	916.9	10.3	4.270	0.684	0.173	185.346	0.201	1.17
160	433.15	907.6	10.8	4.285	0.680	0.173	171.616	0.191	1.10
170	443.15	897.3	11.5	4.396	0.679	0.172	162.290	0.181	1.05
180	453.15	886.6	12.1	4.396	0.673	0.172	152.003	0.173	1.01
190	463.15	876.0	12.8	4.480	0.670	0.171	145.138	0.166	0.97
200	473.15	862.8	13.5	4.501	0.665	0.170	139.254	0.160	0.95
210	483.15	852.8	14.5	4.560	0.655	0.168	131.409	0.154	0.92
220	493.15	837.0	15.2	4.605	0.652	0.167	124.544	0.149	0.90
230	503.15	827.3	16.2	4.690	0.637	0.164	119.641	0.145	0.88
240	513.15	809.0	17.2	4.731	0.634	0.162	113.757	0.141	0.86
250	523.15	799.2	18.0	4.857	0.618	0.160	109.834	0.137	0.86

Fuente: Adaptado de Raznjevic (1978).

ANEXO VI
DATOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE SECADO A 70, 90 Y
110 °C

Tabla AVI.1. Datos experimentales del proceso de secado del afrecho de café a 70 °C

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Pérdida de peso (g)			\bar{X} (g)	Hbs (kg H ₂ O/kg ss)	HL (kg H ₂ O/kg ss) Hbs - Heq*	V (kg H ₂ O/kg as*min)
		1	2	3				
70	0	100,000	100,000	100,000	100,000 ± 0,000	1,361E-01	1,360E-01	-
	15	95,010	95,009	95,012	95,010 ± 0,002	7,940E-02	7,936E-02	3,779E-01
	30	93,023	93,025	93,020	93,023 ± 0,003	5,682E-02	5,677E-02	1,505E-01
	45	91,501	91,510	91,508	91,506 ± 0,005	3,959E-02	3,955E-02	1,148E-01
	60	90,303	90,311	90,300	90,305 ± 0,006	2,594E-02	2,590E-02	9,101E-02
	75	89,207	89,207	89,205	89,206 ± 0,001	1,346E-02	1,342E-02	8,319E-02
	90	88,700	88,697	88,697	88,698 ± 0,002	7,684E-03	7,642E-03	3,850E-02
	105	88,329	88,330	88,331	88,330 ± 0,001	3,503E-03	3,461E-03	2,787E-02
	120	88,180	88,185	88,182	88,182 ± 0,003	1,825E-03	1,784E-03	1,118E-02
	135	88,127	88,127	88,126	88,127 ± 0,001	1,193E-03	1,151E-03	4,216E-03
	150	88,078	88,078	88,078	88,078 ± 0,000	6,400E-04	5,983E-04	3,686E-03
	165	88,049	88,051	88,049	88,050 ± 0,001	3,181E-04	2,764E-04	2,146E-03
	180	88,037	88,035	88,037	88,036 ± 0,001	1,666E-04	1,250E-04	1,010E-03
	195	88,026	88,026	88,024	88,025 ± 0,001	4,166E-05*	0,000E+00	8,331E-04
	210	88,022	88,022	88,021	88,022 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	225	88,022	88,022	88,021	88,022 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
240	88,022	88,022	88,021	88,022 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Hbs: humedad en base seca

HL: humedad libre

V: velocidad de secado

Heq*: humedad de equilibrio

Tabla AVI.2. Datos experimentales del proceso de secado del afrocho de café a 90 °C

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Pérdida de peso (g)			\bar{X} (g)	Hbs (kg H ₂ O/kg ss)	HL (kg H ₂ O/kg ss) Hbs - Heq*	V (kg H ₂ O/kg as*min)
		1	2	3				
90	0	100,000	100,000	100,000	100,000 ± 0,000	1,363E-01	1,362E-01	-
	15	91,081	91,050	91,122	91,084 ± 0,036	3,501E-02	3,492E-02	6,754E-01
	30	89,733	89,883	89,901	89,839 ± 0,092	2,086E-02	2,077E-02	9,434E-02
	45	88,452	88,700	88,993	88,715 ± 0,271	8,083E-03	7,996E-03	8,515E-02
	60	88,302	88,309	88,409	88,340 ± 0,060	3,822E-03	3,735E-03	2,841E-02
	75	88,108	88,147	88,199	88,151 ± 0,046	1,678E-03	1,591E-03	1,429E-02
	90	88,088	88,085	88,100	88,091 ± 0,008	9,924E-04	9,053E-04	4,571E-03
	105	88,047	88,044	88,051	88,047 ± 0,004	4,962E-04	4,091E-04	3,308E-03
	120	88,025	88,028	88,021	88,025 ± 0,004	2,386E-04	1,515E-04	1,717E-03
	135	88,011	88,012	88,011	88,011 ± 0,001	8,712E-05*	0,000E+00	1,010E-03
	150	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	5,808E-04
	165	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	0,000E+00
	180	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	0,000E+00
	195	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	0,000E+00
	210	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	0,000E+00
	225	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	0,000E+00
	240	88,004	88,004	88,003	88,004 ± 0,001	0,000E+00	-8,712E-05	0,000E+00
240	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Hbs: humedad en base seca

HL: humedad libre

V: velocidad de secado

Heq*: humedad de equilibrio

Tabla AVI.3. Datos experimentales del proceso de secado del afrecho de café a 110 °C

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Pérdida de peso (g)			\bar{X} (g)	Hbs (kg H ₂ O/kg ss)	HL (kg H ₂ O/kg ss) Hbs - Heq*	V (kg H ₂ O/kg as*min)
		1	2	3				
	0	100,000	100,000	100,000	100,000 ± 0,000	1,359E-01	1,358E-01	-
	15	90,860	90,854	90,803	90,839 ± 0,031	3,180E-02	3,179E-02	6,937E-01
	30	88,980	88,994	89,008	88,994 ± 0,014	1,084E-02	1,083E-02	1,397E-01
	45	88,432	88,401	88,395	88,409 ± 0,020	4,203E-03	4,191E-03	4,427E-02
	60	88,104	88,119	88,082	88,102 ± 0,019	7,080E-04	6,967E-04	2,330E-02
	75	88,076	88,079	88,060	88,072 ± 0,010	3,673E-04	3,559E-04	2,272E-03
	90	88,030	88,044	88,059	88,044 ± 0,015	5,679E-05	4,543E-05	2,070E-03
	105	88,039	88,041	88,041	88,040 ± 0,001	1,136E-05*	0,000E+00	3,029E-04
110	120	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	135	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	150	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	165	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	180	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	195	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	210	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	225	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
	240	88,038	88,040	88,040	88,039 ± 0,001	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Hbs: humedad en base seca

HL: humedad libre

V: velocidad de secado

Heq*: humedad de equilibrio

Ejemplo de cálculo para una temperatura de 70 °C y tiempo de 120 minutos:

$$\text{Promedio de la pérdida de peso} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}$$

$$\text{Promedio de la pérdida de peso} = \frac{88,180 \text{ gr} + 88,185 \text{ gr} + 88,182 \text{ gr}}{3} = 88,182 \text{ gr}$$

$$\text{Humedad en base seca (H}_{bs}) = \frac{\text{Agua perdida (kg)}}{\text{Afrecho seco (kg)}}$$

El agua perdida es igual al promedio de la pérdida de peso a 70 °C menos el promedio de la pérdida de peso cuando se alcanza la humedad de equilibrio. El afrecho seco fue el afrecho del cual ya no se puede reducir la humedad y su valor en kg permaneció constante. El valor del afrecho seco se presentó a los 210 minutos y fue igual a 88,022 kg

$$\text{Agua perdida (kg)} = 88,182 \text{ kg} - 88,122 \text{ kg} = 0,161 \text{ kg}$$

Se reemplazaron los valores de agua perdida y afrecho seco en la fórmula de la humedad en base seca.

$$\text{Humedad en base seca (H}_{bs}) = \frac{0,161 \text{ kg}}{88,022 \text{ kg}} = 0,00183 \text{ kgH}_2\text{O} / \text{kg afrecho seco}$$

La humedad libre es igual a la humedad en base seca a los 120 minutos menos la humedad de equilibrio. La humedad de equilibrio se presentó a los 195 minutos y fue igual a 4,166E-05 kg H₂O/kg afrecho seco.

$$\text{Humedad libre} = 0,00183 - 0,00004 = 1,783\text{E}-03 \text{ kgH}_2\text{O} / \text{kg afrecho seco}$$

La velocidad de secado es igual al cociente entre la diferencia de las humedades libres a 105 y 120 minutos, y la diferencia de tiempo para ese mismo intervalo. La humedad libre a los 105 minutos fue igual a 3,461E-03 kg H₂O/kg afrecho seco.

$$\text{Velocidad de secado} = \frac{0,03 - 0,02}{120 - 105} = 1,18\text{-E}02 \text{ kgH}_2\text{O} / \text{kg afrecho seco} * \text{min}$$

Tabla AVI.4. Datos experimentales de la pérdida de humedad del afrecho de café a 70, 90 y 110 °C

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso promedio (g)	Humedad del producto (%)
70	0	100,000 ± 0,000	11,978 ± 0,001
	15	95,010 ± 0,002	11,381 ± 0,001
	30	93,023 ± 0,003	11,143 ± 0,000
	45	91,506 ± 0,005	10,961 ± 0,001
	60	90,305 ± 0,006	10,817 ± 0,000
	75	89,206 ± 0,001	10,685 ± 0,000
	90	88,698 ± 0,002	10,625 ± 0,000
	105	88,330 ± 0,001	10,580 ± 0,001
	120	88,182 ± 0,003	10,563 ± 0,001
	135	88,127 ± 0,001	10,556 ± 0,000
	150	88,078 ± 0,000	10,550 ± 0,001
	165	88,050 ± 0,001	10,547 ± 0,000
	180	88,036 ± 0,001	10,545 ± 0,001
	195	88,025 ± 0,001	10,544 ± 0,000
	210	88,022 ± 0,001	10,544 ± 0,000
90	0	100,000 ± 0,000	11,996 ± 0,001
	15	91,084 ± 0,036	10,927 ± 0,005
	30	89,839 ± 0,092	10,777 ± 0,011
	45	88,715 ± 0,271	10,643 ± 0,033
	60	88,340 ± 0,060	10,598 ± 0,008
	75	88,151 ± 0,046	10,575 ± 0,006
	90	88,091 ± 0,008	10,568 ± 0,001
	105	88,047 ± 0,004	10,562 ± 0,001
	120	88,025 ± 0,004	10,560 ± 0,000
	135	88,011 ± 0,001	10,558 ± 0,000
	150	88,004 ± 0,001	10,557 ± 0,000
	165	88,004 ± 0,001	10,557 ± 0,000
	180	88,004 ± 0,001	10,557 ± 0,000
	195	88,004 ± 0,001	10,557 ± 0,000
	210	88,004 ± 0,001	10,557 ± 0,000

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla AVI.4. Datos experimentales de la pérdida de humedad del afrecho de café a 70, 90 y 110 °C (continuación...)

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Peso promedio (g)	Humedad del producto (%)
110	0	100,000 ± 0,000	11,961 ± 0,001
	15	90,839 ± 0,031	10,865 ± 0,004
	30	88,994 ± 0,014	10,644 ± 0,001
	45	88,409 ± 0,020	10,574 ± 0,003
	60	88,102 ± 0,019	10,538 ± 0,003
	75	88,072 ± 0,010	10,534 ± 0,002
	90	88,044 ± 0,015	10,531 ± 0,001
	105	88,040 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	120	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	135	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	150	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	165	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	180	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	195	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	210	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
	225	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001
240	88,039 ± 0,001	10,530 ± 0,001	

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Ejemplo de cálculo para una temperatura de 70 °C y tiempo de 120 minutos:

$$\text{Peso promedio} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3}$$

$$\text{Peso promedio} = \frac{88,180 \text{ gr} + 88,185 \text{ gr} + 88,182 \text{ gr}}{3} = 88,182 \text{ gr}$$

La humedad del producto es igual al cociente entre el peso promedio del producto a 70 °C multiplicado por la humedad del producto del tiempo precedente (105 min), y el peso promedio para ese mismo tiempo de 105 min. La humedad del producto a 105 minutos fue 10,580 % y el peso promedio fue 88,330 g.

$$\text{Humedad del producto a } 70^{\circ}\text{C} = \frac{88,182 * 10,580}{88,330} = 10,563 \%$$

ANEXO VII

DATOS EXPERIMENTALES DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN

Tabla AVII.1. Datos experimentales del proceso de extracción del aceite de café a partir del afrecho húmedo (H=11,96 %) en tiempos de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos

Sólido	n	Tiempo	Muestra (g)	Aceite (g)	Aceite (%)
Húmedo	1	10	20,012	0,063	0,315
		15	20,010	0,076	0,380
		20	20,010	0,080	0,400
		30	20,020	0,108	0,540
		45	20,010	0,110	0,550
	2	10	20,020	0,064	0,320
		15	20,020	0,079	0,395
		20	20,020	0,082	0,410
		30	20,000	0,107	0,536
		45	20,100	0,111	0,550
	3	10	20,010	0,060	0,300
		15	20,140	0,075	0,374
		20	20,011	0,078	0,390
		30	20,010	0,111	0,554
		45	20,020	0,106	0,528

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Ejemplo de cálculo para la obtención del porcentaje de aceite para la segunda repetición y a un tiempo de 20 minutos:

$$\text{Aceite (\%)} = \frac{\text{Aceite (gr)} * 100}{\text{Muestra de afrecho (gr)}}$$

$$\text{Aceite} = \frac{0,082 * 100}{20,020} = 0,410 \%$$

Ejemplo de cálculo para obtener el promedio del porcentaje de aceite del afrecho húmedo para un tiempo de 45 minutos:

El promedio del porcentaje de aceite es igual a la suma de los porcentajes de cada repetición a 45 minutos, dividido para el número de repeticiones.

$$\textit{Promedio del aceite del afrecho de café} = \frac{0,550 + 0,550 + 0,528}{3} = 0,543 \%$$

Tabla AVII.2. Datos experimentales del proceso de extracción del aceite de café a partir del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C en tiempos de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos

Temperatura (°C)	n	Tiempo (min)	Muestra (g)	Aceite (g)	Aceite (%)
70	1	10	20,015	0,789	3,943
		15	20,013	1,577	7,881
		20	20,010	1,974	9,864
		30	20,003	2,114	10,566
		45	20,014	2,116	10,570
	2	10	20,003	0,787	3,935
		15	20,016	1,584	7,915
		20	20,011	1,976	9,874
		30	20,007	2,111	10,549
		45	20,010	2,113	10,558
	3	10	20,033	0,797	3,979
		15	20,010	1,580	7,897
		20	20,010	1,978	9,884
		30	20,004	2,116	10,576
		45	20,010	2,116	10,572
90	1	10	20,008	0,789	3,993
		15	20,004	0,789	8,081
		20	20,004	0,789	10,073
		30	20,010	0,789	10,798
		45	20,014	0,789	10,801
	2	10	20,018	0,789	4,006
		15	20,020	0,789	8,173
		20	20,005	0,789	10,087
		30	20,010	0,789	10,793
		45	20,001	0,789	10,798
	3	10	20,010	0,789	3,993
		15	20,011	0,789	8,162
		20	20,012	0,789	10,104
		30	20,003	0,789	10,821
		45	20,007	0,789	10,824

Tabla AVII.2. Datos experimentales del proceso de extracción del aceite de café a partir del afrecho secado a 70, 90 y 110 °C en tiempos de 10, 15, 20, 30 y 45 minutos (continuación...)

Temperatura (°C)	n	Tiempo (min)	Muestra (g)	Aceite (g)	Aceite (%)
110	1	10	20,010	0,872	4,357
		15	20,010	1,712	8,557
		20	20,020	2,092	10,450
		30	20,000	2,243	11,213
		45	20,150	2,264	11,237
	2	10	20,010	0,869	4,342
		15	20,014	1,719	8,589
		20	20,110	2,102	10,452
		30	20,014	2,245	11,215
		45	20,110	2,260	11,239
3	10	20,040	0,871	4,346	
	15	20,010	1,719	8,591	
	20	20,100	2,097	10,432	
	30	20,020	2,253	11,256	
	45	20,010	2,254	11,266	

Ejemplo de cálculo para la obtención del porcentaje de aceite a 110 °C para la tercera repetición y a un tiempo de 20 minutos:

$$\text{Aceite} = \frac{\text{Aceite (gr)} * 100}{\text{Muestra de afrecho (gr)}} = \frac{2,097 * 100}{20,100} = 10,432 \%$$

Ejemplo de cálculo para obtener el promedio del porcentaje de aceite para una temperatura de 110 °C a un tiempo de 45 minutos:

El promedio del porcentaje de aceite es igual a la suma de los porcentajes de cada repetición a 110 °C, dividido para el número de repeticiones.

$$\text{Promedio del aceite del afrecho de café} = \frac{11,237 + 11,239 + 11,266}{3} = 11,247 \%$$

ANEXO VIII

DATOS EXPERIMENTALES DE LA VELOCIDAD DE EXTRACCIÓN

Tabla AVIII.1. Datos experimentales del promedio del porcentaje de aceite de afrecho de café obtenido y velocidad de extracción a 10, 15, 20, 30 y 45 minutos para el afrecho seco a 70 °C

Tiempo (min)	Aceite obtenido (%)			\bar{X}	Velocidad de extracción (g aceite/100 g afrecho seco*min)
	1	2	3		
10	3,943	3,935	3,979	3,952 ± 0,023	
15	7,881	7,915	7,897	7,898 ± 0,017	0,789
20	9,864	9,874	9,884	9,874 ± 0,010	0,395
30	10,566	10,549	10,576	10,564 ± 0,013	0,069
45	10,570	10,558	10,572	10,567 ± 0,008	0,000

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla AVIII.2. Datos experimentales del promedio del porcentaje de aceite de afrecho de café obtenido y velocidad de extracción a 10, 15, 20, 30 y 45 minutos para el afrecho seco a 90 °C

Tiempo (min)	Aceite obtenido (%)			\bar{X}	Velocidad de extracción (g aceite/100 g afrecho seco*min)
	1	2	3		
10	3,993	4,006	3,993	3,998 ± 0,007	
15	8,082	8,174	8,163	8,140 ± 0,050	0,828
20	10,074	10,088	10,105	10,089 ± 0,015	0,390
30	10,799	10,794	10,822	10,805 ± 0,015	0,072
45	10,802	10,799	10,825	10,809 ± 0,014	0,000

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla AVIII.3. Datos experimentales del promedio del porcentaje de aceite de afrecho de café obtenido y velocidad de extracción a 10, 15, 20, 30 y 45 minutos para el afrecho seco a 110 °C

Tiempo (min)	Aceite obtenido (%)			\bar{X}	Velocidad de extracción (g aceite/100 g afrecho seco*min)
	1	2	3		
10	4,357	4,342	4,346	4,348 ± 0,008	
15	8,557	8,589	8,591	8,579 ± 0,019	0,846
20	10,450	10,452	10,432	10,445 ± 0,011	0,373
30	11,213	11,215	11,256	11,228 ± 0,024	0,078
45	11,237	11,239	11,266	11,247 ± 0,016	0,001

$\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Ejemplo de cálculo para la velocidad de extracción del aceite de afrecho a 110 °C y a 30 minutos:

La velocidad de extracción se calculó por el cociente entre el resultado de la diferencia de los promedios de aceite a 30 y 20 minutos, y la diferencia en minutos para ese mismo intervalo de tiempo.

$$\text{Velocidad de extracción} = \frac{11,228 - 10,445}{30 - 20} = 0,078 \frac{\text{gr aceite}}{100 \text{ gr afrecho seco} \cdot \text{min}}$$

Ejemplo de cálculo para la variación de la velocidad de extracción a 110 °C para el período de extracción C – D que se presenta en la Tabla 3.8.:

La variación de la velocidad de extracción de aceite se calculó por la diferencia entre las velocidades de extracción para los tiempos de 30 y 45 minutos (C – D).

$$\text{Variación de la velocidad de extracción} = 0,078 - 0,001$$

$$\text{Variación de la velocidad de extracción} = 0,077 \frac{\text{gr aceite}}{100 \text{ gr afrecho seco} \cdot \text{min}}$$

ANEXO IX

PRUEBAS INEN PARA LA CALIDAD DEL ACEITE DE CAFÉ

Tabla AIX.1. Resultados de la prueba de densidad relativa

n	m ₁	m	m ₂	d ₂₅
1	33,980	22,970	33,170	0,926
2	33,980	22,970	33,150	0,925
			\bar{X}	0,926 ± 0,001

 $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla AIX.2. Resultados de la prueba de índice de acidez

n	Masa (g)	V NaOH (ml)	Ácido oleico (g)	NaOH (mg/ml)	Acidez	
					% A.O.	mg/g A.O.
1	5,02	5,75	282,00	0,10	3	6
2	5,02	5,60	282,00	0,10	3	6
					\bar{X}	6,34 ± 0,12

 $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla AIX.3. Resultados de la prueba de índice de saponificación

n	Peso muestra (g)	Gasto HCl (ml)		Índice de Saponificación (mg KOH/g)
		Muestra	Blanco	
1	2,02	7,75	19,25	159,69
2	2,03	7,70	19,40	161,67
			\bar{X}	160,68 ± 1,40

 $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

Tabla AIX.4. Resultados de la prueba de índice de yodo

n	m (g)	B1 (ml)	B2 (ml)	X B (ml)	V (ml)	Na₂S₂O₃ (N)	I.Y. (cg/g)
1	0,18	26,25	26,15	26,20	10,85	0,10	108
2	0,18	26,40	26,20	26,30	10,92	0,10	108
						\bar{X}	108,32 ± 0,15

 $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)**Tabla AIX.5.** Resultados de la prueba de índice de peróxidos

n	m (g)	Na₂S₂O₃ B	Na₂S₂O₃ (N)	N	I.P. (meq O₂/kg)
1	5,00	0,01	0,56	0,10	11,00
2	5,10	0,01	0,55	0,10	10,59
				\bar{X}	10,79 ± 0,29

 $\bar{X} \pm \sigma$ (n = 3)

ANEXO X

BIODIÉSEL OBTENIDO A PARTIR DEL AFRECHO DE CAFÉ

Tabla AX.1. Biodiésel obtenido para cada interacción de catalizador y alcohol

Ensayo	Repetición	Catalizador (% p/p)	Alcohol (mol/mol)	Biodiésel (g)
1	1	0,50	1:4	38,751
	2	0,50	1:4	39,450
	3	0,50	1:4	38,944
2	1	0,50	1:6	67,050
	2	0,50	1:6	66,852
	3	0,50	1:6	66,827
3	1	0,50	1:8	91,950
	2	0,50	1:8	91,592
	3	0,50	1:8	91,604
4	1	1,00	1:4	121,789
	2	1,00	1:4	121,650
	3	1,00	1:4	121,340
5	1	1,00	1:6	65,250
	2	1,00	1:6	65,102
	3	1,00	1:6	65,315
6	1	1,00	1:8	127,200
	2	1,00	1:8	126,903
	3	1,00	1:8	126,986
7	1	1,50	1:4	114,444
	2	1,50	1:4	114,600
	3	1,50	1:4	114,201
8	1	1,50	1:6	125,429
	2	1,50	1:6	125,575
	3	1,50	1:6	125,338
9	1	1,50	1:8	146,100
	2	1,50	1:8	146,370
	3	1,50	1:8	146,113

Ejemplo de cálculo del rendimiento de biodiésel para el ensayo 9:

El cálculo del rendimiento del biodiésel se obtuvo del cociente entre el promedio de las cantidades de biodiésel obtenido de las tres repeticiones y de la cantidad de aceite que intervino en la transesterificación. Al resultado obtenido se multiplicó por 100. La cantidad de aceite fue de 150 g para todos los ensayos.

$$\textit{Promedio de biodiesel} = \frac{146,100 + 146,370 + 146,113}{3} = 146,194 \textit{ g}$$

$$\textit{Rendimiento de biodiesel} = \frac{146,194}{150} * 100 = 97,463 \%$$

ANEXO XI

RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL RENDIMIENTO DEL BIODIÉSEL

Tabla A.XI.1. Análisis de varianza ANOVA a dos vías para el rendimiento del biodiésel en unidades adimensionales

Fuente	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES				
A: Catalizador	8 029,480	4 014,740	230 261,190	0,000
B: Alcohol	2 949,700	1 474.85	84 588,560	0,000
INTERACCIONES				
AB	2 719,100	679,775	38 987,800	0,000


Tabla A.XI.2. Pruebas de Múltiples Rangos para el rendimiento del biodiésel respecto del catalizador

Catalizador (%)	Media LS	Sigma LS
0,5	43,9273	0,044
1,0	69,7432	0,044
1,5	85,7904	0,044


Contraste catalizador	Significancia	Diferencia	+/- Límites
0,5 - 1,0	*	-25,8159	0,1307
0,5 - 1,5	*	-41,8631	0,1307
1,0 - 1,5	*	-16,0472	0,1307

ANEXO XII

INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL BIODIÉSEL



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
PETROLEO

Referencia: OT: 13-10-11-P
Atención: Sr. Fernando Guerrón
Empresa: PARTICULAR
Dirección: Cuenca y Esmeraldas
Tipo de ensayos: Análisis Físicoquímicos
Tipo de muestra: Biodiesel
Identificación de la muestra: BIODIESEL RESIDUO DE CAFÉ 18-10-2013
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Fecha de ingreso de la muestra: 2013-10-17
Código de muestra: OE-13-10-11-P-1
Fecha de realización de ensayos: 2013-10-21 / 2013-10-24

Informe N° 13-10-11-P-1
 Fecha 2013-11-14

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
Punto de Inflamación ⁽¹⁾	°C	PNE/DPEC/P/ASTM D-93	103,1
Índice de Cetano calculado	-	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	41,68
Viscosidad Cinemática a 37,8°C	cSt	PNE/DPEC/P/ASTM D-445	6,88
Densidad API a 60°F ⁽²⁾	°API	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	25,6
Agua por destilación ⁽³⁾	%V	PNE/DPEC/P/ASTM D-4006	0,3


Nota.- Laboratorio de ensayo acreditado por el OAE con acreditación N° OAE LE 2C 06-010
Nota.- Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del OAE

Observaciones: No se pudo determinar Turbidez, el rango del equipo no cubre el valor de la muestra, sale fuera de rango.

(1) Incertidumbre asociada a la medida de Punto de Inflamación, $U = \pm 20,0$ °C (K=2)
 (2) Incertidumbre asociada a la medida de la Densidad API, $U = \pm 2,0$ °API (K=2)
 (3) Incertidumbre asociada a la medida de Agua por Destilación, $U = \pm 25$ %V (K=2)

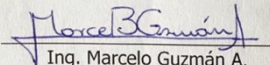
Condiciones Ambientales.- Presión 544,7 mmHg; Temperatura: 20,5 °C

Realizado por: JNH




LABORATORIO DE ENSAYOS
 N° OAE LE 2C 06-010

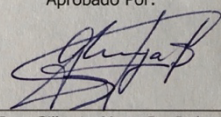
Revisado Por:



Ing. Marcelo Guzmán A.
 RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado Por:



Ing. Gilberto Moya D., Dpl.
 DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

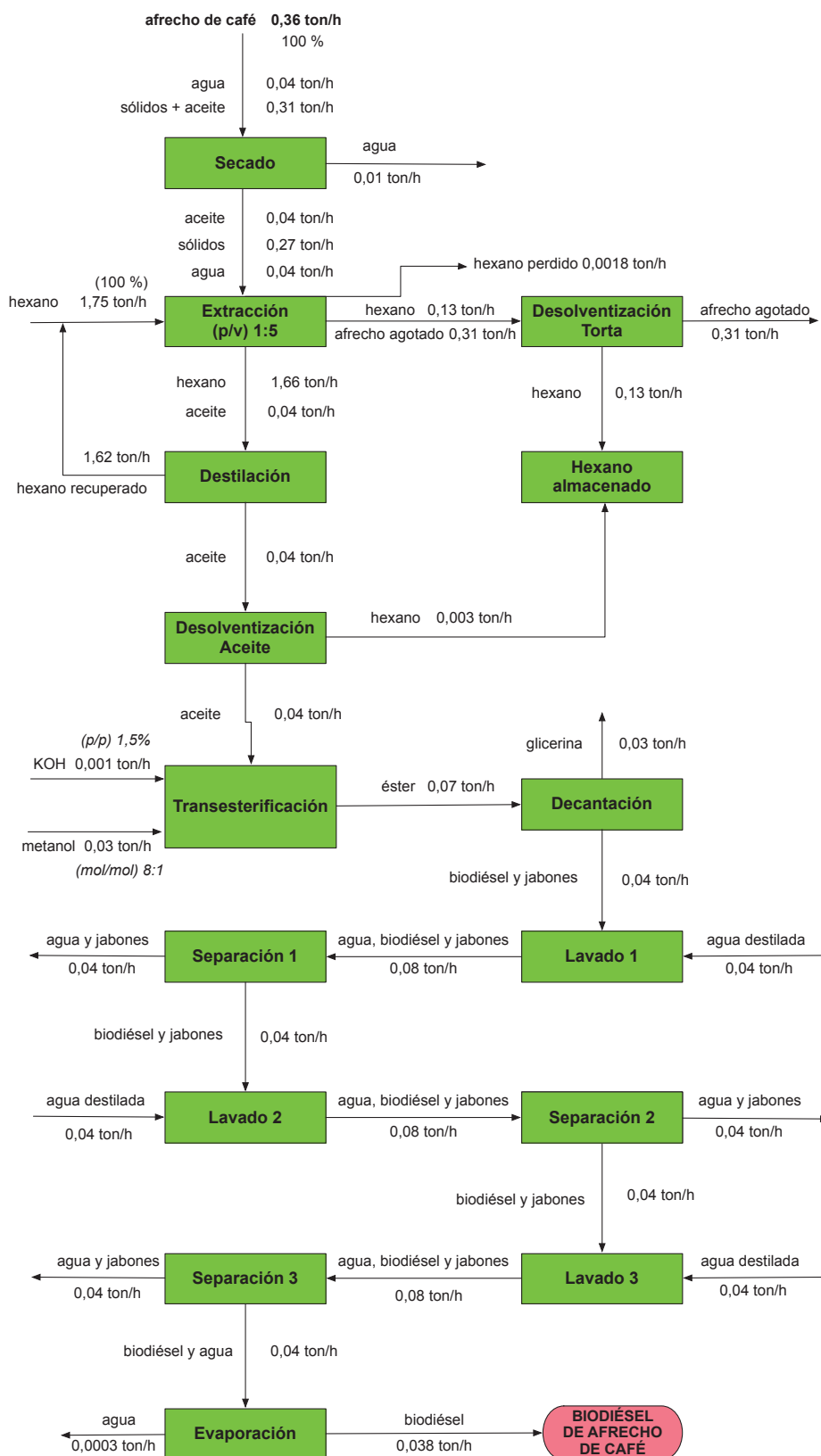
ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Francisco Viteri s/n y Gilberto Gato Sobral Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26 Fax: 2529676 E-mail: dpec@fing.uce.edu.ec
 QUITO - ECUADOR

MC2201-P01-5
Hoja 1 de 1

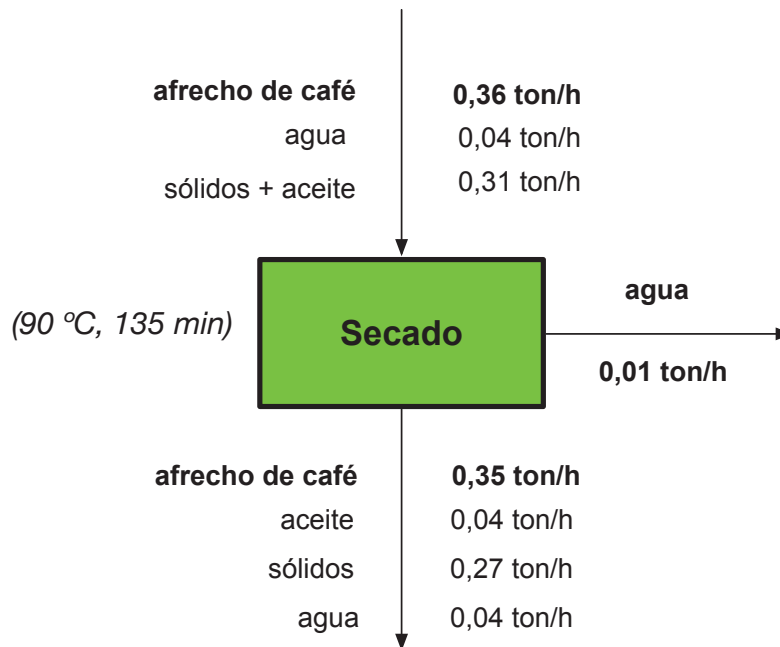
ANEXO XIII

DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS BALANCES DE MASA Y ENERGÍA



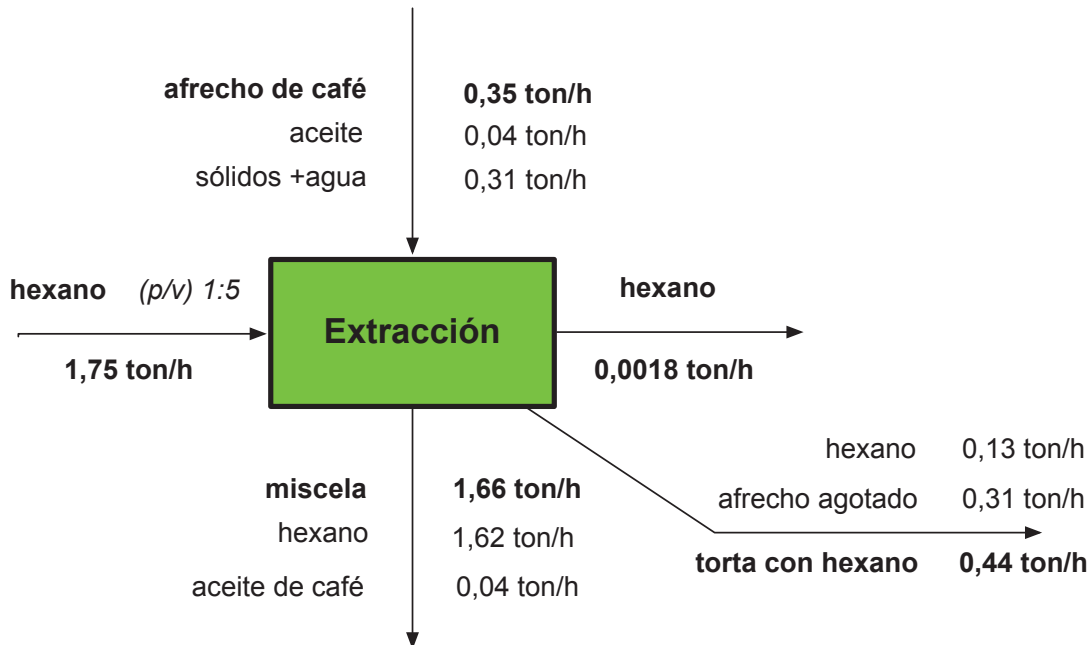
Balance de masa en el secado

Las condiciones del afrecho de café fueron 90 °C por 135 minutos. La capacidad de procesar de la planta es de 260 ton/mes de afrecho, que representa el 100 % de materia prima.



Balance de masa en la extracción

Se consideró el dato experimental de rendimiento de aceite de café (11,247 %), también la relación de extracción afrecho/hexano en una proporción (p/v) 1:5. La pérdida del hexano en esta etapa del proceso es de 0,0018 ton/h obtenido experimentalmente.



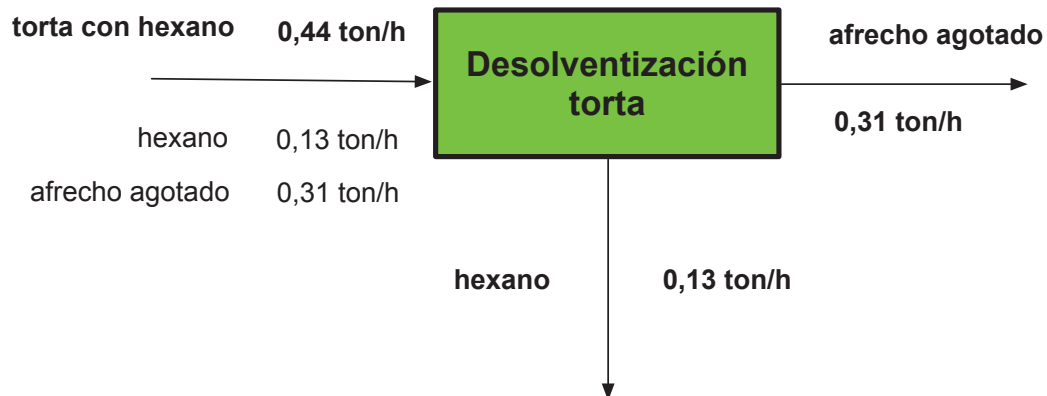
Balance de masa en la destilación

En la etapa de destilación se recuperó el aceite y hexano y para ello se utilizaron los resultados de la fase experimental, en la entrada se tiene miscela con una composición de 97,59 % de hexano y 2,41 % de aceite de café. En la salida se tiene hexano recuperado que representa el 92,48 % del hexano usado en la extracción.



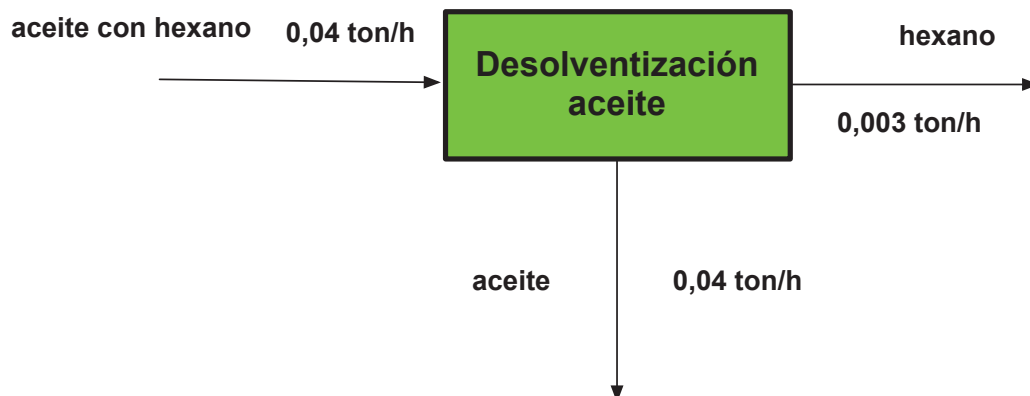
Balance de masa en la desolventización de la torta

En la etapa de desolventización de la torta (afrecho de café agotado) se obtuvo como resultado experimental a la entrada 29,84 % de hexano y 70,16 % de sólidos como afrecho de café del que no se puede extraer más aceite, en las salidas se obtuvo el 7,39 % del hexano total utilizado.



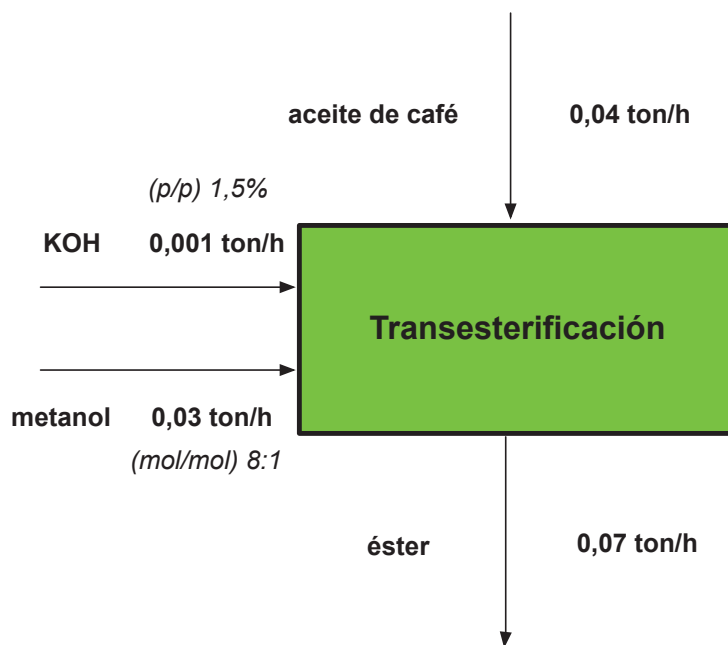
Balance de masa en la desolventización del aceite

Se toma en cuenta el dato experimental de pérdida de hexano del 7,5 %.



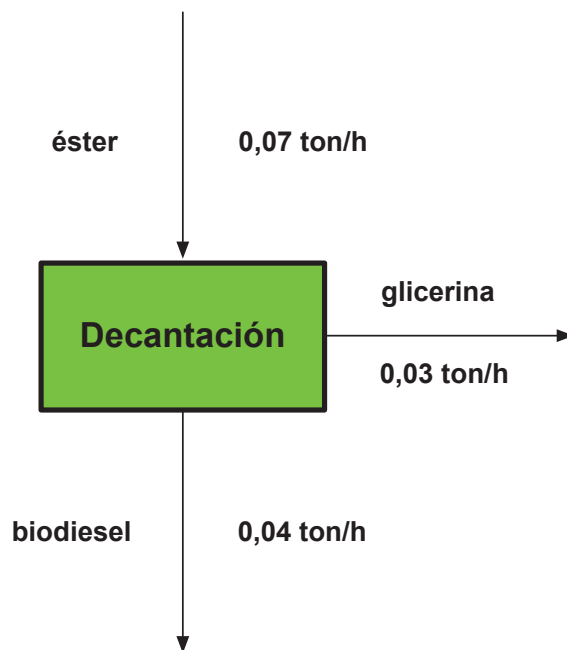
Balance de masa en la transesterificación

Los datos experimentales corresponden al 1,5 % p/p de KOH/aceite y la relación 8:1 mol/mol metanol/aceite.



Balance de masa en la decantación

Los datos experimentales son: 45,25 % del total del éster que se transformó en glicerina y 54,75 % del total del éster que se convirtió en biodiésel.

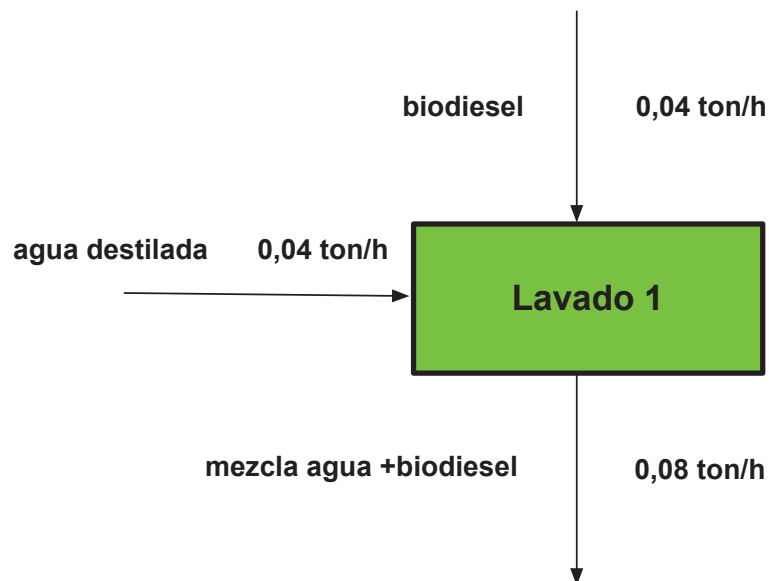


Balances de masa en los lavados y separación

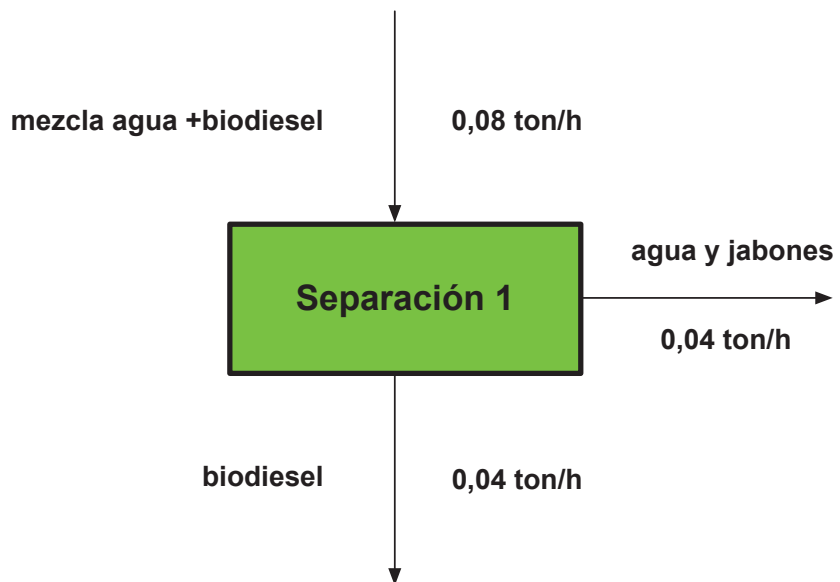
Se utilizó la relación 1:1 (biodiésel/agua destilada) para todos los lavados.

Se tomaron como datos experimentales los porcentajes de separación de la mezcla: biodiésel y agua con impurezas. Los datos son: 51,75; 51,77 y 52,07 % de agua e impurezas para la primera, segunda y tercera separación respectivamente.

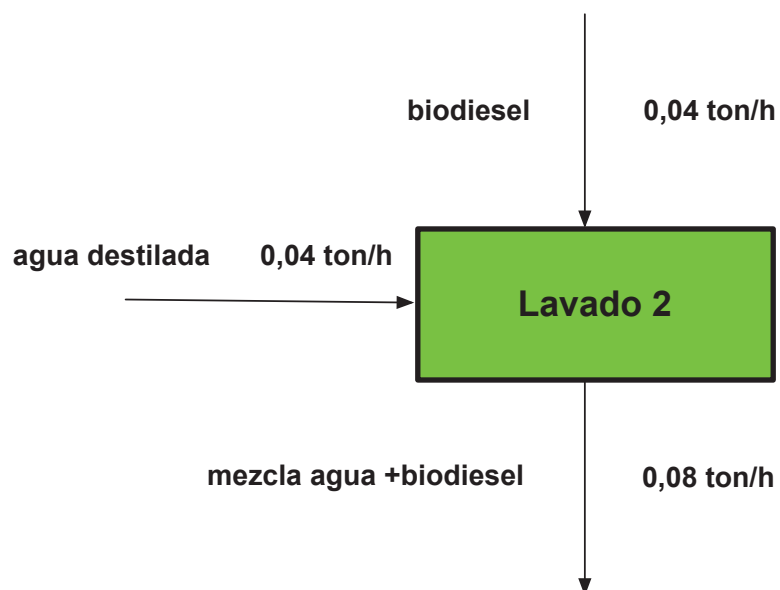
Balance de masa en el lavado 1



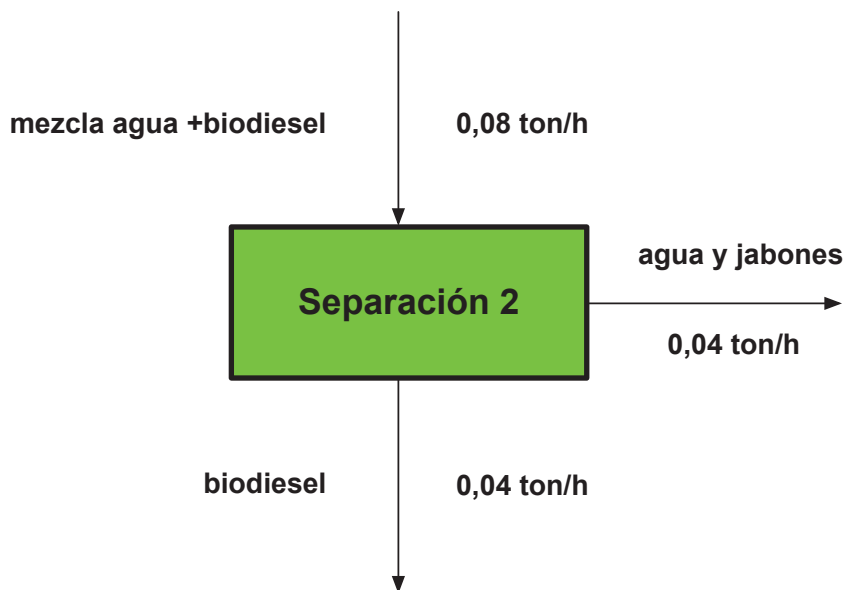
Balance de masa en la separación 1



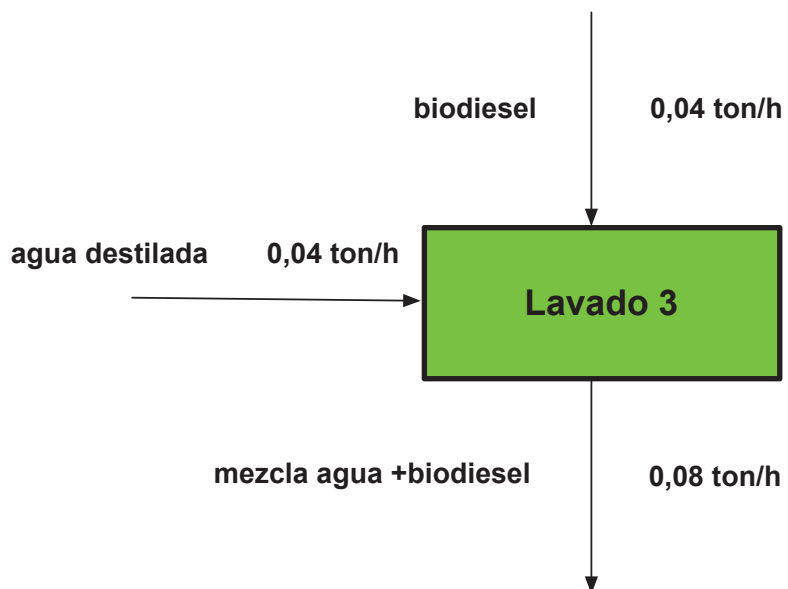
Balance de masa en el lavado 2



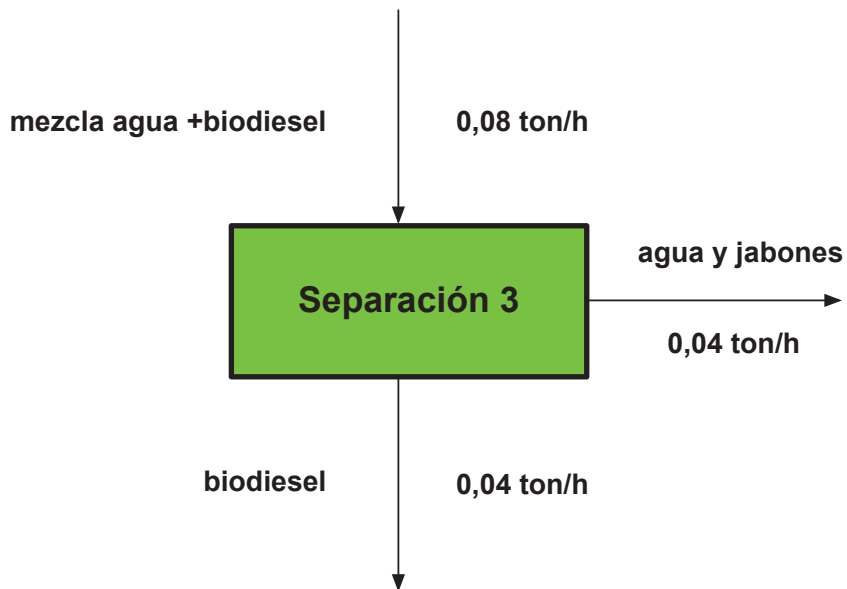
Balance de masa en la separación 2



Balance de masa en el lavado 3

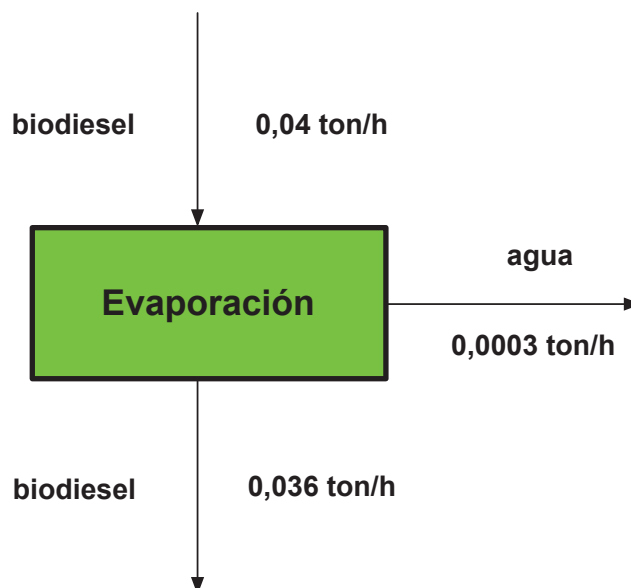


Balance de masa en la separación 3



Balance de masa en la evaporación

Se toma como dato experimental el porcentaje de evaporación del agua, el cual fue del 0,815 %.



ANEXO XIV

DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS PRINCIPALES PARA LA PLANTA INDUSTRIAL DE OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL

Secador de afrecho de café

La selección del secador se realizó por catálogo con base a la capacidad de procesamiento de afrecho a secar. Esta capacidad se encuentra representada por el flujo másico de afrecho de 0,36 ton/h al ingreso de la etapa de secado. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.1.


Tabla AXIV.1. Hoja de especificación del secador de afrecho

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 1			
Nombre del equipo:	Secador rotatorio		
Fabricante	Henan Zhengzhou Mining Machinery Co., Ltd.	Material:	Acero Inoxidable
Origen	Chino	Identificación en planta:	SR
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Largo:	3	0,2 – 0,5 ton/h	
Diámetro:	1		
Esquema del equipo:			
			

Extractor

Se seleccionó un extractor con base en la capacidad de procesamiento de afrecho seco. Esta capacidad se encuentra constituida por el flujo másico de afrecho seco de 0,35 ton/h al ingreso de la etapa de extracción. También para el dimensionamiento del equipo se tomó en cuenta el flujo de ingreso de hexano a la etapa de extracción. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.2.


Tabla AXIV.2. Hoja de especificación del extractor

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 2			
Nombre del equipo:	Equipo de extracción Crown Model III		
Fabricante	Crown Iron Works Company	Material:	Acero Inoxidable
Origen	Estados Unidos	Identificación en planta:	EX
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Largo:	4	1 ton/h	
Ancho:	1,20		
Altura:	2,80		
Esquema del equipo:			
			

Destilador

De acuerdo con el flujo másico proveniente de la extracción, se concibe como necesaria la separación de la miscela en aceite y hexano. Para lo cual se consideró la adopción de una columna de destilación cuyo rango de capacidad de procesamiento cubra la cantidad de miscela calculada en los balances de masa para la etapa de destilación. La capacidad requerida de procesamiento de miscela es de 1,66 ton/h al ingreso de la etapa de destilación. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.3.

Tabla AXIV.3. Hoja de especificación del destilador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 3			
Nombre del equipo:	Columna de destilación		
Fabricante	Jinxin	Material:	Acero Inoxidable
Origen	Chino	Identificación en planta:	CD
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Altura:	3,5	1 - 3 ton/h	
Diámetro:	1,20		
Esquema del equipo:			
			

Desolventizador

Se seleccionó un desolventizador – tostador con capacidad de separar el hexano tanto de la torta como del aceite. Esta capacidad se encuentra conformada por los flujos másicos de ingreso de la torta con hexano y del aceite con hexano en las etapas de desolventización. Estos flujos másicos son 0,44 y 0,40 ton/h de torta con hexano y aceite con hexano, respectivamente. Por lo tanto, la capacidad requerida de procesamiento es de 0,48 ton/h. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.4.

Tabla AXIV.4. Hoja de especificación del desolventizador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 4			
Nombre del equipo:	Desolventizador – tostador vertical		
Fabricante	Crown - Schumacher	Material:	Acero Inoxidable
Origen	Estados Unidos	Identificación en planta:	DT
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Altura:	3,80	1 ton/h	
Diámetro:	2,20		
Esquema del equipo:			
<p>CROWN/SCHUMACHER DESOLVENTIZER-TOASTER</p>			

Pre calentador de aceite

Para la elección del pre calentador se optó por un equipo que caliente los 0,04 ton/h de aceite que salen de la etapa de desolventización. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.5.


Tabla AXIV.5. Hoja de especificación del Pre calentador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 5			
Nombre del equipo:	Pre calentador de aceite		
Fabricante	Bioenergy	Material:	Acero Inoxidable
Origen	Argentina	Identificación en planta:	PA
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Altura:	1,91	0,3 ton/h	
Diámetro:	0,6		
Esquema del equipo:			
			

Mini reactor de metóxido

El mini reactor para la formación de metóxido se seleccionó a partir de las cantidades de alcohol y catalizador que maximizaron la conversión de aceite a biodiesel. Estas cantidades fueron: 0,001 y 0,03 ton/h de catalizador y alcohol respectivamente. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.6.


Tabla AXIV.6. Hoja de especificación del mini reactor

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 6			
Nombre del equipo:	Mini reactor de metóxido		
Fabricante	Bioenergy	Material:	Acero Inoxidable
Origen	Argentina	Identificación en planta:	MX
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Altura:	1,31	0,01 – 0,05 ton/h	
Diámetro:	0,5		
Esquema del equipo:			
			

Reactor de transesterificación

La selección del reactor se realizó por catálogo con base a la capacidad de procesamiento de aceite a transformar en biodiésel. Esta capacidad se encuentra representada por el flujo másico de aceite y metóxido al ingreso de la etapa de transesterificación. La capacidad requerida de procesamiento conforme al balance de masa fue de 0,07 ton/h. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.7.


Tabla AXIV.7. Hoja de especificación del reactor de transesterificación

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 7			
Nombre del equipo:	Reactor Bio - 300		
Fabricante	Bioenergy	Material:	Acero al carbono
Origen	Argentina	Identificación en planta:	RX
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Altura:	2,1	0,03 – 0,10 ton/h	
Diámetro:	0,6		
Esquema del equipo:			
			

Máquina destiladora de agua

Su diseño y elección se realizó con base a la cantidad total requerida de agua destilada de 0,12 ton/h, para las 3 etapas de lavado. Los flujos máxicos de agua destilada para cada etapa de lavado se obtuvieron de los balances de masa. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.8.

Tabla AXIV.8. Hoja de especificación de la máquina destiladora de agua

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 8			
Nombre del equipo:	Destiladora de agua JD JND-1500-RO		
Fabricante	Shen-Zhen	Material:	Acero Inoxidable
Origen	China	Identificación en planta:	DA
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Largo:	2	0,2 ton/h	
Ancho:	0,85		
Altura:	2,80		
Esquema del equipo:			
			

Tanque de decantación

Luego de la transesterificación el éster producido se separó en glicerol y biodiesel y esa la primera decantación que se realizó. Posterior a esta etapa se realizaron tres lavados e igual número de separaciones, el resultado final es el uso de cuatro tanques de decantación. En el primer tanque ingresa un flujo másico de alimentación de 0,07 ton/n de éster y para el resto de tanques el flujo de alimentación de cada uno es de 0,08 ton/h. Por tanto, se tomó como referencia a esta última cantidad como capacidad de procesamiento requerida por tanque para cada decantación. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.9.


Tabla AXIV.9. Hoja de especificación del decantador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 9			
Nombre del equipo:	Tanque de decantación		
Fabricante	Bioenergy	Material:	Chapa de acero al carbono
Origen	Argentina	Identificación en planta:	DC
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Altura:	2	0,05 – 0,01 ton/h	
Diámetro:	0,8		
Esquema del equipo:			
			

Caldero

Se optó por elección en catálogo de un caldero que abastece los 902,54 kg/h ó 0,90 ton/h de vapor requerido para los procesos de secado, extracción, destilación, desolventización de torta y aceite. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.10.

Tabla AXIV.10. Hoja de especificación del caldero

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 10			
Nombre del equipo:	Caldero RL-600		
Fabricante	ATTSU	Material:	Acero Inoxidable
Origen	España	Identificación en planta:	CC
Dimensiones (m):		Capacidad de suministro:	
Largo:	3	Hasta 0,6 – 1,0 ton/h de vapor	
Ancho:	1,5		
Altura:	1,5		
Esquema del equipo:			
			

Elevador - transportador

Se eligió un elevador transportador inclinado de banda en acero inoxidable que facilite la carga continua de las 0,36 ton/h de afrecho de café hacia el secador. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.11.


Tabla AXIV.11. Hoja de especificación del Elevador - transportador

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 11			
Nombre del equipo:	Elevador – transportador inclinado de banda		
Fabricante	DTS	Material:	Acero Inoxidable
Origen	China	Identificación en planta:	ET
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Largo:	2,20	0,5 ton/h	
Ancho:	0,50		
Altura:	1,70		
Esquema del equipo:			
			

Elevador de cangilones hermético

Se seleccionó un elevador de cangilones hermético para transportar las 0,35 ton/h de afrecho de café hacia el equipo de extracción. La información de las dimensiones del equipo seleccionado se presenta en la Tabla AXIV.11.

Tabla AXIV.12. Hoja de especificación del Elevador de cangilones hermético

HOJA DE ESPECIFICACIÓN No. 12			
Nombre del equipo:	Elevador de cangilones hermético		
Fabricante	Equipenvas	Material:	Acero Inoxidable
Origen	México	Identificación en planta:	EC
Dimensiones (m):		Capacidad de procesamiento:	
Largo:	4,2	0,5 ton/h	
Ancho:	0,8		
Altura:	3,6		
Esquema del equipo:			
			

ANEXO XV

LAY-OUT DE ÁREAS Y EQUIPOS DE LA PLANTA INDUSTRIAL

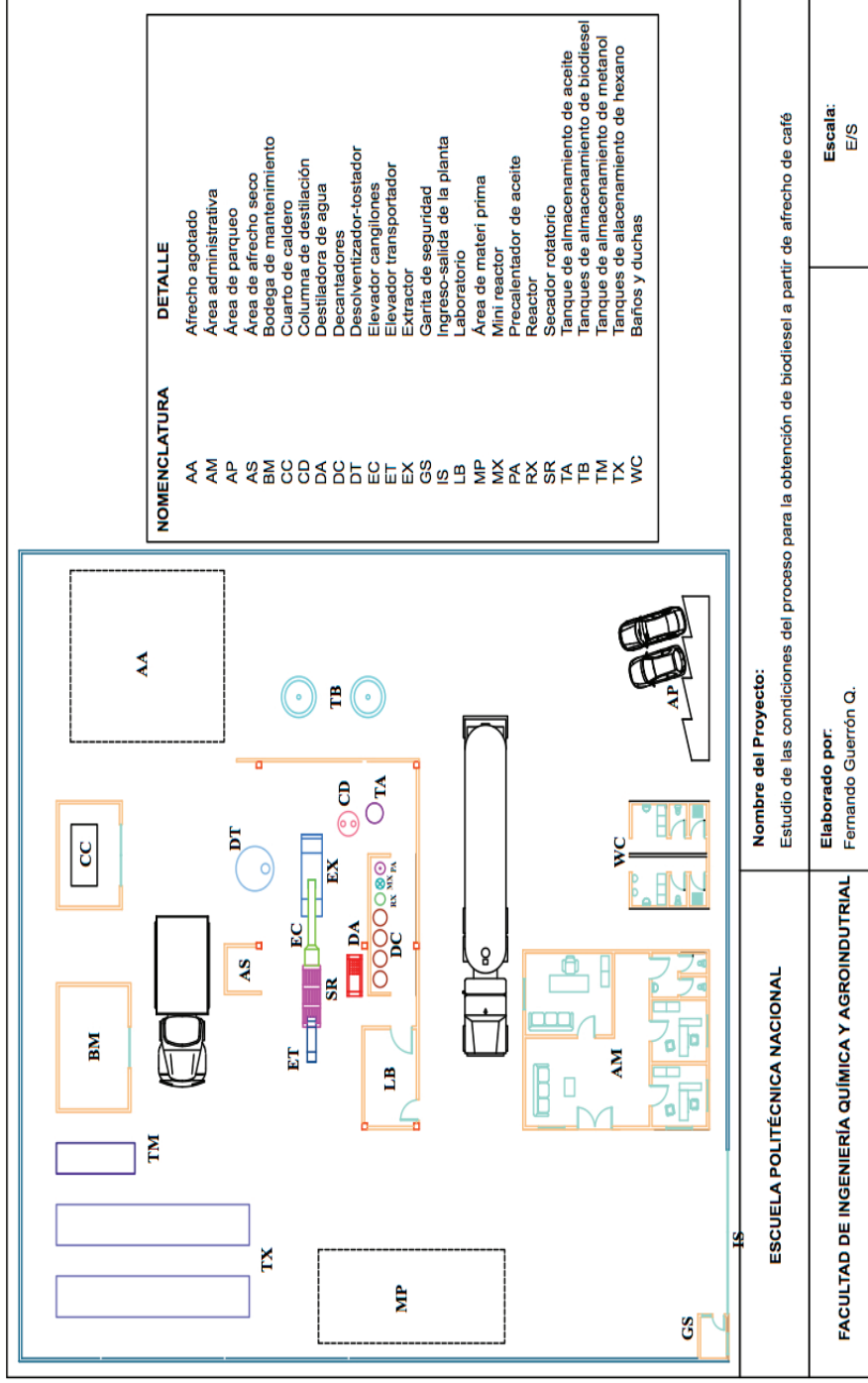


Figura AXV.1. Plano vista superior de los equipos y áreas de la planta

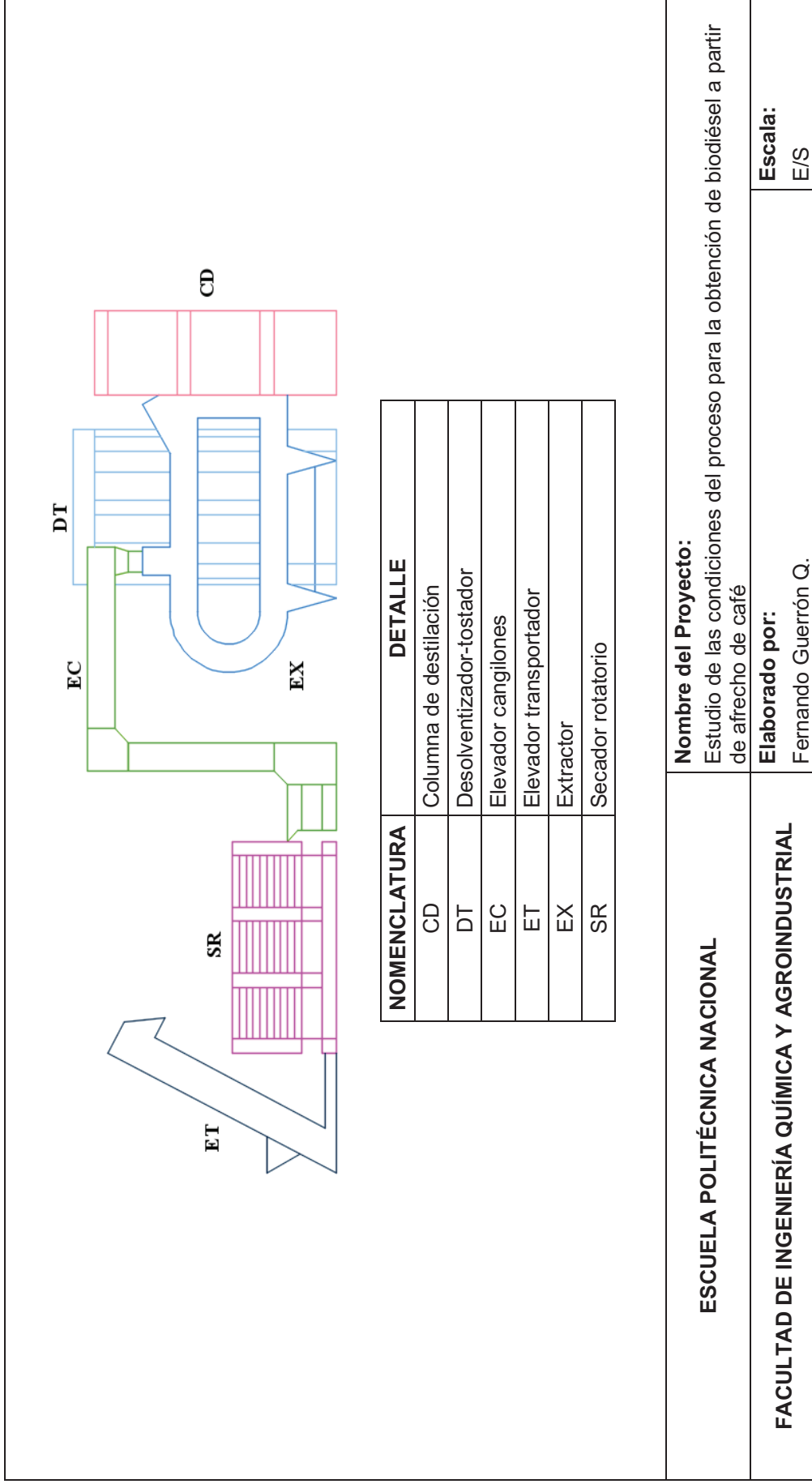


Figura AXV.2. Lay-out de equipos para la producción de aceite de café

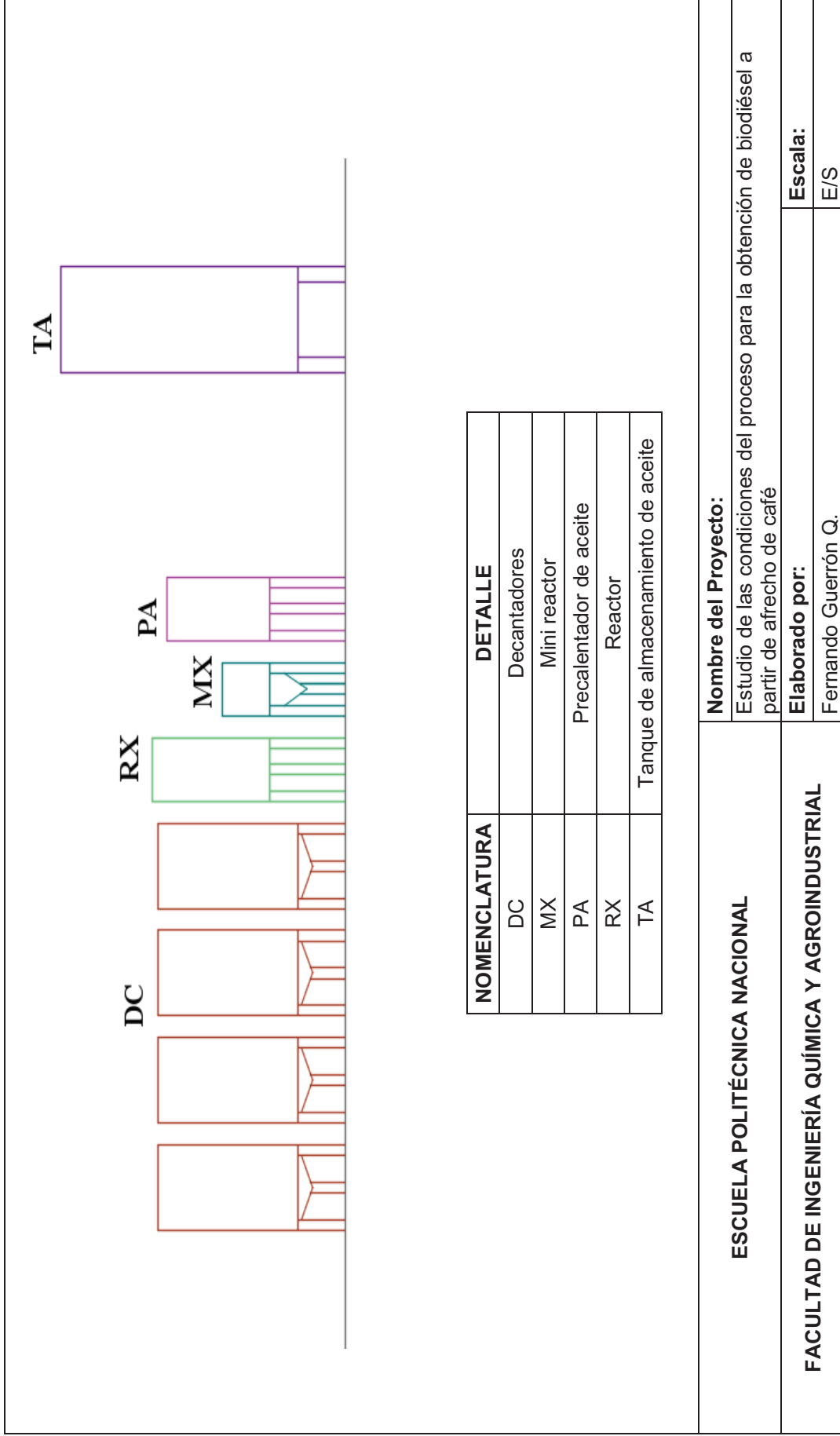


Figura AXV.3. Lay-out de equipos para la producción de biodiésel