

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE SECADO SOLAR TERMICO PARA BIOMASA
DE CAFÉ TIPO BORRA EN LA PLANTA DE BUGALAGRANDE DE NESTLE S.A.

LAURA ANGÉLICA PINZÓN LONDOÑO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2016

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE SECADO SOLAR TERMICO PARA BIOMASA
DE CAFÉ TIPO BORRA EN LA PLANTA DE BUGALAGRANDE DE NESTLE S.A.

LAURA ANGÉLICA PINZÓN LONDOÑO

Proyecto integral de grado de grado para optar el título de
INGENIERA QUÍMICA

Director

Jorge Alberto Osuna Díaz
Ingeniero Eléctrico

Asesor

Edgar Fernando Moreno Torres
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA D.C
2016

Nota de Aceptación

Ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres
Presidente del Jurado

Ingeniera Jeyny Muñoz
Jurado

Bogotá D.C. Agosto de 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismedi

Director Departamento de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

A Dios, que es la luz que me guía.

Quiero dedicar este proyecto a mis padres, gracias a ellos, desde el inicio hasta el final, agarrada de su mano, todo fue posible.

A mi hermano, que como Ingeniero, me apoyo incondicionalmente.

A mi familia, quienes siempre celebran mis triunfos y son apoyo incondicional en las dificultades.

A mis amigos, quienes fueron esa voz de aliento siempre.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Gestión e Innovación Energética S.A.S GIE, por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto y brindarme todas las herramientas necesarias para su desarrollo. Al Ingeniero Jorge Alberto Osuna, por la asignación de este proyecto y sus enseñanzas a lo largo del desarrollo del mismo.

Agradezco al Centro Nacional de Investigación del Café CENICAFÉ por contribuir al desarrollo de este proyecto brindándome la posibilidad de usar sus instalaciones responder todas mis dudas, para el desarrollo experimental de este proyecto.

Un agradecimiento muy especial al ingeniero Edgar Fernando Moreno Torres, quien asumiendo en último momento, me brindó toda la orientación para la realización de este proyecto, su seguimiento y asesoría.

A Dios y mi Familia que siempre están conmigo.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS	19
1. MARCO TEÓRICO	20
1.1 PROCESO DEL CAFÉ LIOFILIZADO	20
1.1.1 Cultivo	21
1.1.2 Recolección	21
1.1.3 Despulpado	21
1.1.4 Desmucilaginado	22
1.1.5 Secado	22
1.1.6 Tostado	22
1.1.7 Molienda	23
1.1.8 Extracción	23
1.1.9 Clarificación	23
1.1.10 Secado	23
1.1.11 Liofilización	24
1.1.12 Empaque	24
1.2 BORRA DEL CAFÉ	24
1.2.1 Como combustible directo	25
1.2.2 Producción de biogás	25
1.2.3 Producción de bioetanol	25
1.2.4 Producción de biodiesel	25
1.3 DIAGNOSTICO DEL PROCESO DE APROVECHAMIENTO DE BORRA DE CAFÉ	25
1.3.1 Composición química	26
1.3.2 Potencia calorífica	26
1.3.3 Punto de inflamación	27
1.3.4 Cenizas.	27
1.4 OBTENCIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ	27
1.4.1 Proceso de combustión	28
2. SECADO	32
2.1. PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS	32
2.1.1 Secador solar tipo túnel	32
2.2 VARIABLES DE OPERACIÓN DE SECADO	36
2.2.1 Temperatura	36
2.2.2 Tiempo de residencia	38

3.	RESULTADOS	39
3.1	SECADO EN SECADOR SOLAR PARABÓLICO TIPO TÚNEL	39
3.1.1	Cálculo de cantidad de agua evaporada	41
3.3.2.	Cálculo de cantidad de agua retirada por muestra de secado	42
3.3.2.1	Cálculo de cantidad de agua retirada en muestra de lote 1	42
3.3.2.2	Cálculo de cantidad de agua retirada en muestra de lote 2	42
3.2	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	42
3.2.1	Humedad Total	43
3.2.2	Cenizas	44
3.2.3	Azufre	44
3.2.4	Poder calorífico	44
3.3	BALANCE DE MASA	45
3.3.1	Cálculo del flujo de aire	46
3.3.2	Cálculo de la fracción de aire	47
3.4	BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE SECADO	47
3.4.1	Cálculo del Calor de entrada	49
3.4.2	Cálculo de calor de radiación	49
3.4.3	Cálculo de calor de evaporación	51
3.4.4	Cálculo de evaporización total	51
3.4.5	Cálculo del calor de salida	53
3.4.6	Cálculo del calor de pérdidas	53
3.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
4.	ANÁLISIS COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	56
4.1	COSTOS DE ACTIVOS	56
4.2	COSTOS DE MANO DE OBRA	57
4.3	COSTOS DE SERVICIOS	58
4.4	COSTOS DE MATERIA PRIMA	58
4.5	COSTO TOTAL DE INVERSIÓN	58
5.	CONCLUSIONES	60
6.	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA	62
	ANEXOS	64

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Datos de secado en secador solar parabolico	34
Tabla 2. Humedad removida.	36
Tabla 3 Registro de temperatura ambiental	37
Tabla 4. Resultados de laboratorio para borra lote 1	43
Tabla 5. Resultados de laboratorio para borra lote 2	43
Tabla 6. Datos de borra	45
Tabla 7. Datos de secador solar	45
Tabla 8. Condiciones de radiación.	50
Tabla 9. Intervalos de experimentación	52
Tabla 10. Costos de Activos según distribuidor.	56
Tabla 11. Costos de Activos según CENICAFÉ	57
Tabla 12. Costo de mano de obra	58

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Proceso de café liofilizado.	20
Figura 2. Despulpadora de café.	21
Figura 3. Desmucilaginado del café.	22
Figura 4. Secado solar.	22
Figura 5. Tostado del café	23
Figura 6. Equipos de extracción de sólidos solubles para el café.	23
Figura 7. Liofilizador	24
Figura 8. Borra de café.	26
Figura 9. Composición orgánica de la borra.	26
Figura 10. Diagrama de obtención de borra.	27
Figura 11. Diagrama de proceso de combustión de borra.	28
Figura 12. Caldera acuatubular para generación de vapor.	29
Figura 13. Silo de alimentación de borra (cisco).	30
Figura 14. Tornillos alimentadores de borra.	30
Figura 15. Ficha de operación de la caldera	31
Figura 16. Secador solar.	33
Figura 17. Borra húmeda.	34
Figura 18. Borra seca.	35
Figura 19. Diagrama de proceso de secado.	41
Figura 20. Diagrama balance de masa global	45
Figura 21. Esquema de flujo de calor.	48

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comparación de masa entre lote 1 y 2	39
Gráfica 2. Masa vs humedad removida para lote 1.	40
Gráfica 3. Masa vs humedad removida para lote 2	40

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Condiciones de borra húmeda	69
Anexo B. Borra seca lote 1	66
Anexo C. Borra seca lote 2	67
Anexo D. Condiciones Ambientales. Estación: Cenicafé (Manizales Caldas)	68
Anexo E. Secador solar parabólico mejorado.	69
Anexo F. Subproductos del café.	70
Anexo G. Cotización distribuidor.	71
Anexo H. Sistema de Secado solar para industria.	72

LISTA DE SIGLAS

Q: calor.

Qs: calor de salida del proceso.

m: masa.

bh: borra húmeda.

pc: poder calorífico.

Mi: masa inicial.

Hi: humedad inicial.

Mf: masa final.

Hf: humedad final.

Be: cantidad de borra a la entrada del proceso.

Bs: cantidad de borra a la salida del proceso.

Ca: cantidad de agua evaporada en el proceso de secado.

Qe: calor de entrada.

Qrad: calor de radiación.

Qperd: calor de pérdidas.

Qevap: calor de evaporación.

Qs: calor de salida.

χ : entalpia de evaporación.

GLOSARIO

BIOMASA: es un material biológico de origen animal o vegetal para la generación de energía a través de su transformación.

BORRA DE CAFÉ: residuo que se genera en las fábricas de café soluble y corresponde a la fracción insoluble del grano tostado. Representa cerca del 10% del peso del fruto fresco.

COMBUSTIÓN: es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una cantidad de puntos en forma de calor y luz, manifestándose visualmente gracias al fuego u otros.

ENERGÍA SOLAR: es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

HUMEDAD: Cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire.

PODER CALORÍFICO: es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible. Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo o un metro cúbico de combustible al oxidarse en forma completa.

SECADO: operación que permite la eliminación de la humedad de una sustancia por medio térmico.

RESUMEN

La alternativa de secado propuesta en este proyecto funcionó para el objetivo puntual de reducción de humedad en la borra de café, puesto que se determinó por medio de balances de masa y energía que la humedad se redujo en un 70% y el poder calorífico de la muestra aumentó en más de 1.400 kilocalorías, lo cual demuestra que mejoraron las condiciones de la borra para su combustión.

Adicional a eso, se evaluó la viabilidad de implementación de este sistema de secado solar por medio de un análisis del costo de la inversión para la instalación de este sistema mostrando dos alternativas y de acuerdo a los resultados, se determinó que CENICAFÉ propone la alternativa más económica para la implementación.

Finalmente se lograron cumplir los objetivos propuestos en este proyecto. Su desarrollo inició con el diagnóstico de las características de la borra para así conocer su estado actual y determinar las condiciones para el proceso de secado propuesto así como el aprovechamiento de este residuo por parte de Nestlé y por qué la necesidad de mejorar sus condiciones para que sea empleado como combustible directo en la caldera acuatubular para la generación de vapor.

Posteriormente se evaluaron las variables del proceso, las cuales son humedad, temperatura y espesor de lecho con el fin de establecer las condiciones requeridas y de acuerdo a estas, se determinaron las especificaciones técnicas del proceso mediante análisis de balance de masa y energía para determinar la humedad retirada por medio del sistema propuesto y el aumento del poder calorífico de la borra.

Finalmente se analizó la viabilidad de la implementación de este sistema de acuerdo a los costos de inversión siendo CENICAFÉ la opción elegida por su bajo costo.

INTRODUCCIÓN

En el mundo el café colombiano es reconocido como un producto de calidad superior que se ha convertido en un referente mundial. Detrás del café de Colombia existe una organización de productores única en el mundo dedicada a mejorar la calidad de vida de las comunidades productoras de café con ambiciosos programas de sostenibilidad en acción, que busca garantizar la calidad, autenticidad y consistencia del producto, y que se esfuerza en proveer a clientes y consumidores una garantía de origen.

En cuanto al secado de borra, el aprovechamiento de este residuo como combustible directo en calderas genera vapor como fuente de energía que puede ser utilizada en procesos de producción. Como valor agregado reduce el impacto ambiental generado por este tipo de proceso.

La planta de café liofilizado de Nestlé ubicada en Bugalagrande, Colombia; genera diariamente alrededor de 18.000 kilogramos de borra de café por hora de producción. Actualmente cuenta con un sistema de aprovechamiento de este residuo.

Nestlé de Colombia se considera una empresa comprometida con el desarrollo sostenible del país y de cada eslabón de su cadena de valor, desde el suministro de materias primas hasta el producto final, con prácticas y procedimientos enfocados a minimizar el uso de recursos naturales como agua y energía, a la prevención de la contaminación y el soporte en la aplicación de técnicas amigables con el medio ambiente.

Este proceso de combustión actualmente genera un gasto excesivo de energía, debido a que la borra, como residuo del proceso de café liofilizado, trae consigo un alto contenido de humedad, lo cual genera que su combustión requiera un consumo elevado de combustible necesario para eliminar el contenido de humedad para el proceso de generación de vapor.

A raíz de esta problemática surgió la idea de proponer un sistema de secado para la borra y así, reducir el contenido de humedad y por ende mejorar su condición energética y disminuir el gasto adicional de combustible.

El objetivo fue evitar el uso de combustibles fósiles, para ello se propuso un sistema de secado solar térmico, el cual se alimenta únicamente de la energía proveniente del sol, lo cual contribuye con la premisa de evitar que se genere un alto costo por el consumo de estos, como lo presenta actualmente Nestlé.

Para iniciar con dicho proceso, se solicitó a CENICAFÉ, el uso del secador solar térmico parabólico tipo túnel para así, realizar el secado de borra y poder determinar si era o no viable la propuesta de este sistema para la reducción de la humedad y mejoramiento de sus condiciones, como poder calorífico, para ser empleada como combustible en la caldera y así, disminuir el consumo de combustible convencional. El modelo de secado propuesto se realizó para 70 kilogramos de borra.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer una alternativa de secado para biomasa de café tipo borra con un sistema solar térmico en la planta de Bugalagrande de Nestlé de Colombia S.A

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar el proceso de aprovechamiento actual de la borra de café.
2. Evaluar las variables de operación de secado de borra usando un sistema solar térmico.
3. Determinar las especificaciones técnicas del proceso.
4. Analizar los costos de implementación del sistema de secado.

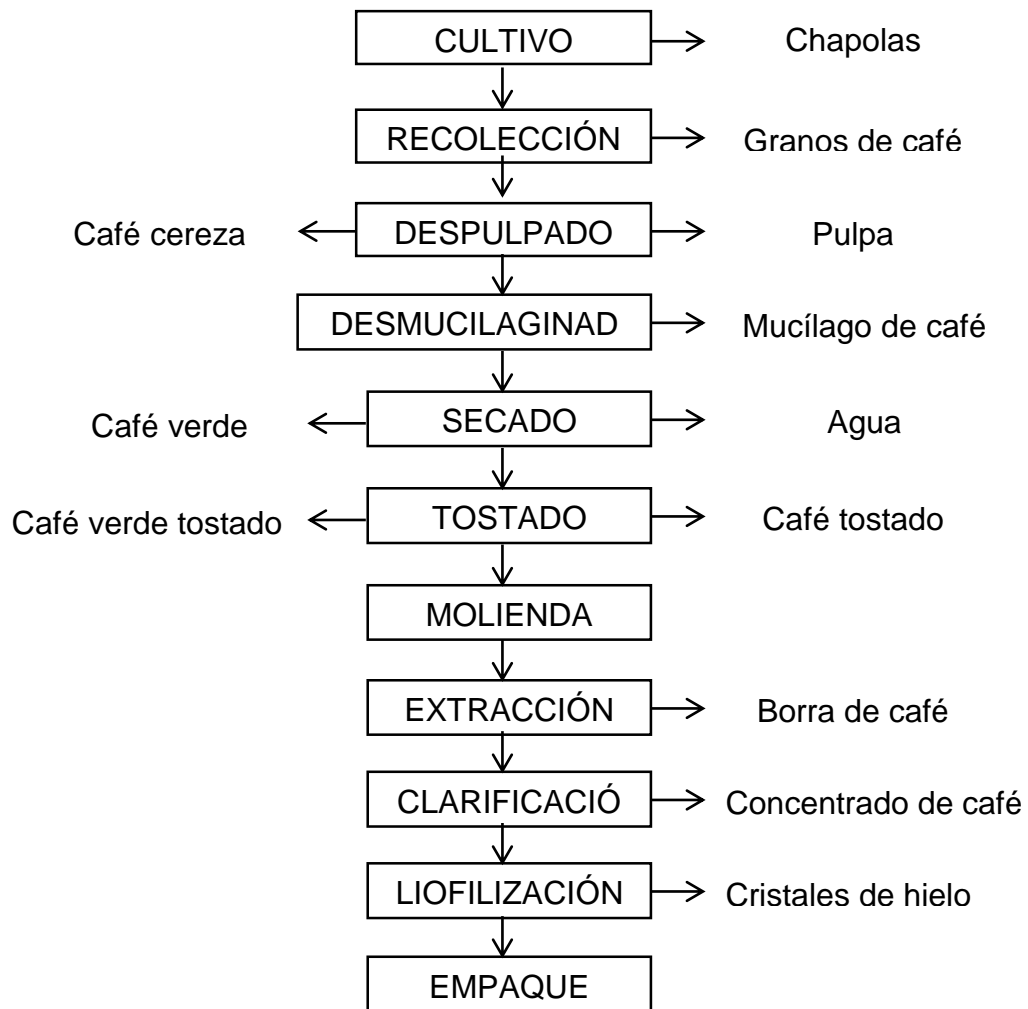
1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se referencia el marco teórico a partir de los términos, conceptos básicos y fundamentales para el desarrollo del proceso de secado y la puesta en marcha del proyecto.

1.1 PROCESO DEL CAFÉ LIOFILIZADO

En la figura 1 se muestra el proceso de producción del café liofilizado y de qué etapa del proceso se obtiene el residuo borra de café.

Figura 1. Proceso de café liofilizado.



El café liofilizado es el polvo granulado de café soluble que al entrar en contacto con el agua recupera sus características; éste se produce a partir de la misma planta del café tostado, que en nuestro país es de tipo arábico. Los pasos para el proceso de producción del café liofilizado son: cultivo, recolección, despulpado, desmucilaginado, secado, tostado, molienda, extracción, clarificación, secado, liofilización y empaque.

1.1.1 Cultivo. Se siembran los frutos del café en germinadores, que son lugares donde las semillas germinan y se obtienen las chapolas, que se dejan crecer por dos meses; luego estas chapolas se llevan al almácigo donde se disponen, una a una, en bolsas llenas de una mezcla de suelo y materia orgánica que cumplen la función de nutrir las plantas durante un tiempo aproximado de seis meses. Posteriormente, se siembran en tierra las plantas del almácigo. La calidad de éstas dependerá del clima, las condiciones del suelo y el grado de adaptación.

1.1.2 Recolección. En este paso se hace una recepción de los granos de café maduros, luego se realiza una limpieza y un mezclado de diferentes tipos de café para obtener las características deseadas.

1.1.3 Despulpado. Consiste en retirar la pulpa que está al rededor del fruto por medio de presión. Este proceso se realiza con una despulpadora (ver Figura 2) donde el café cereza seleccionado y lavado previamente, pasa a través de una tolva hacia un tambor rotatorio, el cual, al rotar lleva el café hacia un punto donde la presión ejercida separa la pulpa del fruto.

Figura 2. Despulpadora de café.



FUENTE: Buencafé, Disponible en: <http://www.buencafe.com/> , Consultado el 15 de Abril de 2016

1.1.4 Desmucilaginado. Consiste en remover mecánicamente el mucilago del café, para poder iniciar su secado. (Ver Figura 3).

Figura 3.Desmucilaginado del café.



FUENTE: Disponible en: <http://www.buencafe.com/> , Consultado el 15 de Abril de 2016

1.1.5 Secado. El grano de café que contiene entre un 10% y un 12% de humedad, dicha agua se retira por medio de secado solar o mecánico. En el secado solar, el café se dispone en una plancha al ambiente durante un periodo entre 7 y 15 días; en el secado mecánico se utiliza un equipo estático, al cual se le inyecta aire caliente a 50°C. En la figura 4 se observa un secado de café por medio de un secador solar.

Figura 4. Secado solar.



FUENTE: Disponible en: <http://www.buencafe.com/> , Consultado el 15 de Abril de 2016

1.1.6 Tostado. Debido a las propiedades que trae el café verde que lo hacen poco apetecible, se debe someter a un proceso de secado a altas temperaturas que provocan cambios químicos y físicos; y en consecuencia dan al café características de aroma, sabor y color propios. En la Figura 5 se muestra el proceso de tostado del café.

Figura 5. Tostado del café



FUENTE: Disponible en: <http://www.buencafe.com/> , Consultado el 15 de Abril de 2016

1.1.7 Molienda. Con este procedimiento se busca reducir el tamaño del grano y aumentar la superficie de contacto, lo que facilita la extracción de sólidos solubles.

1.1.8 Extracción. El café luego del proceso de tostado y molienda, se somete a una extracción sólido-líquido por medio de inyección de agua caliente a alta presión. Dicho proceso se hace dentro de una batería de cilindros verticales. En la Figura 6 se muestra el equipo utilizado en el proceso de extracción de sólidos solubles del café.

Figura 6. Equipos de extracción de sólidos solubles para el café.



Fuente: Industria del café. Alba Cabrera. Octubre 2015

1.1.9 Clarificación. Se realiza una filtración para remover los componentes no solubles restantes.

1.1.10 Secado. El extracto obtenido en la clarificación tiene alto contenido de agua, por lo cual se hace necesario reducirla; para esto se inyecta el café en una torre de deshidratación donde las finas gotas, al contacto con el vapor, van secándose hasta llegar a la parte inferior de la torre que contiene una humedad inferior al 5%.

1.1.11 Liofilización. Consiste en enfriar el extracto hasta el punto en que se inicia la formación de cristales de hielo, que son retirados cuando alcanzan un determinado tamaño. Luego se somete dichos cristales a bajas temperaturas con aire seco, lo que aumenta su porosidad, facilita la liofilización y permite el ajuste del peso específico y el color del producto final. En la figura 7 se puede observar un liofilizador.

Figura 7. Liofilizador



Liofilizador. Fuente: Café de Colombia, Disponible en: www.cafedecolombia.com , Consultado el 15 de Abril de 2016

1.1.12 Empaque. Se realiza al vacío y con cierre hermético para evitar el contacto con la humedad y el oxígeno del aire.

1.2 BORRA DEL CAFÉ

La borra del café es el residuo obtenido del proceso de producción del café liofilizado, corresponde a la fracción insoluble del grano tostado y representa cerca del 10% del fruto fresco.¹ Su composición química muestra que tiene alto contenido de grasas, por lo cual se puede usar en la producción de aceites o como combustible, que es el caso de Nestlé. Otros usos que se le ha dado en CENICAFÉ son la producción de lodos anaerobios y como sustrato de cultivo de hongos tropicales.²

Algunos de los usos que se le da a la borra de café y sus respectivos rendimientos son:³

¹ NELSON RODRÍGUEZ, DIEGO ZAMBRANO. Los subproductos del café: fuente de energía renovable. Artículo de CENICAFE. Marzo 2010. Página 2.

² NELSON RODRÍGUEZ VALENCIA. Manejo de residuos en la industria cafetera. Artículo de CENICAFE. Página 7.

³ NELSON RODRÍGUEZ, DIEGO ZAMBRANO. Op., Cit., p 4.

1.2.1 Como combustible directo. Con borra entre el 8 al 15% de humedad y se utilizan como combustible en calderas generadoras de vapor de agua. Su valor calorífico está en un rango de 24,91 MJ/kg a 29,01 MJ/kg. Ver anexo 6.

1.2.2 Producción de biogás. Se produce con un contenido de metano entre 52% y 62%, de orden de 250 a 300 L/kg de sólidos volátiles de la borra, los cuales equivalen a un poder calorífico de 5,9 MJ/kg.

1.2.3 Producción de bioetanol. Se debe realizar un proceso de sacarificación y de fermentación simultánea para obtener una borra de café delignificada enzimáticamente, es decir remover la lignina o madera por medio de un tratamiento enzimático. Se ha establecido que en promedio la borra tiene 32,62% de celulosa, el cual permite obtener hasta un 201,61 ml de etanol por 1 Kg de borra, con un poder calorífico de 4,38 MJ/kg.

1.2.4 Producción de biodiesel. Se obtiene un 10% de sustancias grasas a partir de la borra seca. Además tiene un 10 a 15% de rendimiento en peso, y una conversión del 100% del aceite obtenido en biodiesel, que tiene un poder calorífico de 38,4 MJ/kg.

1.3 DIAGNOSTICO DEL PROCESO DE APROVECHAMIENTO DE BORRA DE CAFÉ

Los residuos que se generan en la agroindustria del café son de tres tipos; los que se generan en la etapa del beneficio y los generados por la clasificación en la etapa de la selección por calidades, en la comercialización y los generados por las industrias de los cafés solubles.

La borra seca (Ver figura 8), está compuesta de partículas finas de café molido y torrefactado de tamaño de 1,22 aproximadamente, de textura porosa sin llegar a ser abrasivo, de formas amorfas de color negro, con densidad muy baja, 400 Kg/m³ (24.8 lb/ft³) estas densidades son a la salida del proceso de extracción, pero una vez la borra es secada la densidad llega alrededor de 192.2 Kg/m³ (12 lb/ft³ a 18 lb/ft³) por lo cual con una corriente de aire llega a ser volátil⁴.

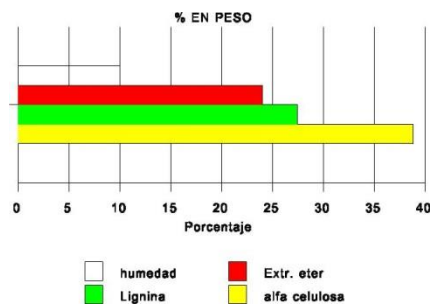
⁴ ROJAS ROMERO & VARGAS MORALES. Diseño y cálculo del sistema de producción de energía térmica y su aprovechamiento a partir de la borra de café para la planta de DECAFE S.A en Manizales. Tesis de ingeniería química.

Figura 8. Borra de café.



1.3.1 Composición química. Mediante un análisis de laboratorio se conoce la composición química y los porcentajes de los elementos químicos de los mismos, a diferentes humedades. La composición se basa en elementos como carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre, cenizas y un porcentaje de humedad. La borra se encuentra constituida por celulosa hasta 64% de la fibra total, lignina hasta el 36% de la fibra total, hemicelulosas entre 22% y 27%, ELN del 13% al 18%.⁵ En la Figura 9 se muestra la composición orgánica de la borra.

Figura 9. Composición orgánica de la borra.



Fuente: GARCÍA, MUÑOZ, A. F; RIAÑO, LUNA, C.E. Extracción de celulosa y colorantes a partir de la borra de café. 1999.

1.3.2 Potencia calorífica. Se puede hallar de forma teórica o experimental de acuerdo a las calorías que contiene la borra en cuanto a carbono, hidrogeno, azufre, y oxígeno, que están presentes en el momento de la combustión. Para el caso de este proyecto se halló de forma experimental, por análisis de propiedades hecho por el laboratorio interlabco. Ver anexo 1.

⁵ Tomado de Jour. Coffee technology vol. 2 1987 Londres. Pag. 286. Clarke R.

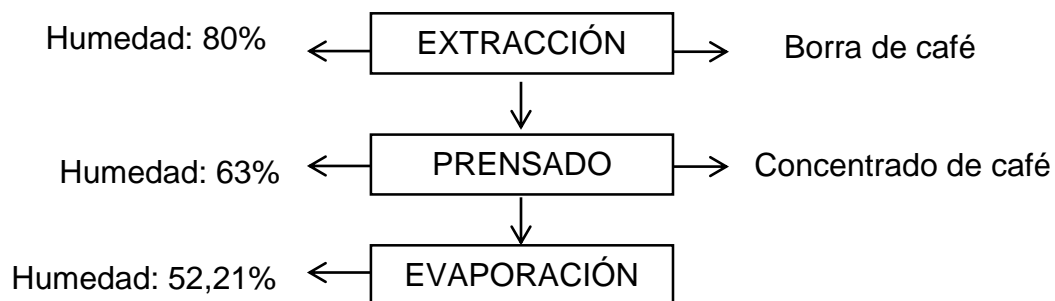
1.3.3 Punto de inflamación. La temperatura de inflamación de la borra se calcula basada en sus condiciones como material orgánico de similares características a otros materiales como la cascarilla de arroz o el bagazo de caña, se relaciona con dichos materiales tomando temperatura de inflamación en un rango de 650°C a 370°C.

1.3.4 Cenizas. Se forman debido a la combustión de la borra con oxígeno a altas temperaturas. Se caracterizan por un color más oscuro que la borra, tienen baja densidad y alta volatilidad; además están compuestas por potasio, calcio, y silicio.

1.4 OBTENCIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ

En la figura 10 se describe el proceso de obtención de borra como residuo a partir de la etapa de extracción del proceso de café liofilizado.

Figura 10. Diagrama de obtención de borra.



La borra de café se obtiene como residuo del proceso de café liofilizado. Actualmente Nestlé tiene un programa llamado “Proyecto Cisco” (para Nestlé la borra de café es llamado como cisco, aun cuando no es el residuo cisco común de cascarilla de café) establecido para su aprovechamiento energético y se emplea como combustible para la generación de vapor en una caldera.

La borra sale del proceso de obtención con 80% de Humedad. Para reducir el contenido de humedad es sometida a diferentes procesos:

1. Por proceso de prensado se reduce el contenido de humedad a 63%
2. En una evaporadora al vacío logra una reducción a 52,21 % de humedad.

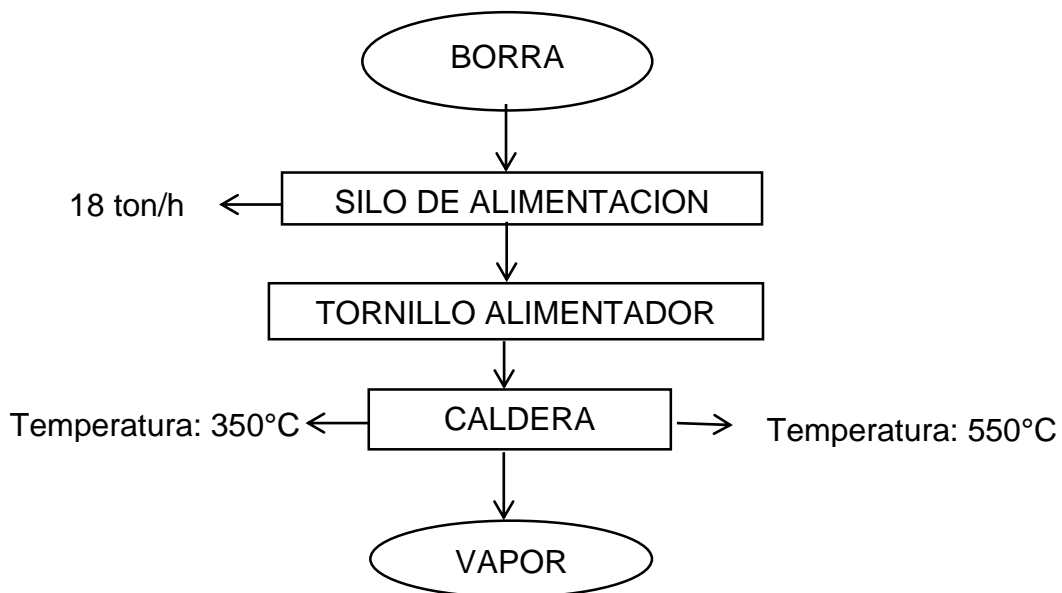
El agua que se retira de la borra, es llamada concentrado de café, residuo que sale de la prensa y se mezcla con agua coloridas residuales del proceso de filtrado y limpieza de las tuberías posteriormente es llevado al evaporador que trabaja con vacío generado por inyectores de vapor. Este está compuesto de agua y trozos de residuo de café, tiene un pH de 5, lo cual lo hace ácido.

Se obtienen 300 litros por hora de concentrado.

Estos dos residuos deben ser eliminados por condiciones ambientales exigidas por las autoridades pertinentes, es por ésta razón que se realiza el proceso de combustión. Aunque el concentrado aumenta el poder calorífico de la borra, lo ideal es hacer la combustión únicamente con borra puesto que aumenta el porcentaje de humedad lo cual demanda más energía y combustible en el proceso.

1.4.1 Proceso de combustión. En la figura 11 se describe el proceso actual de combustión de borra en la caldera acuatubular de la planta de Nestlé.

Figura 11. Diagrama de proceso de combustión de borra.



Como alternativa de aprovechamiento de los residuos sólidos del café, se pueden reconvertir en energía, lo cual genera menos emisiones de gases efecto invernadero al ambiente.

La borra al ser extraída tiene una alta humedad, por lo cual debe ser prensada para disminuir la humedad; posteriormente se usa como combustible para la generación de vapor en una caldera. Con este proceso se busca obtener un balance de CO₂ igual a cero, considerando que genera una reducción de producción del 10% de dicho gas, respecto a los combustibles fósiles.⁶ Si la borra no se usará como combustible se dispondría en un relleno sanitario, donde el transporte hasta el mismo emitiría CO₂, y además durante el proceso de descomposición se generaría

⁶ NESTLÉ. Programa Cisco de café. Disponible en: <http://corporativa.nestle.com.co/csv/aguaysostenibilidadambiental/programa-cisco-del-caf%C3%A9>
Consultado el: 16 Abril 2016

metano, que tiene un potencial de calentamiento 25 veces mayor.⁷ La combustión de la borra del café se realiza generalmente en calderas acuatubulares.

Se realiza en una caldera acuatubular de 1050 BHP's de lecho fluidizado de arena de cuarzo. Éste es precalentado hasta 350°C apoyado con un quemador de biodiesel, al lograr esa temperatura se avienta la borra almacenada en el silo ubicado justo al lado de la caldera, por medio de tornillos alimentadores; ahí aumenta la temperatura del lecho hasta 550°C apoyado por un quemador de gas simultáneamente se eleva la hasta 650°C. En ese momento, se adiciona concentrado a la borra por medio de mangueras ubicadas en los tornillos de aventamiento, se apagan los quemadores y por autoignición se realiza la combustión de la mezcla de borra y concentrado.

El set point de la caldera para la presión de vapor es 19 bar.

En la figura 12 se observa la caldera de combustión de borra de café (cisco para Nestlé) para la generación de vapor que se utiliza en los diferentes procesos de la planta.

Figura 12. Caldera acuatubular para generación de vapor.



⁷ FEDERACIÓN DE CAFETEROS. Disponible en: https://www.federaciondecafeteros.org/buencafe-fnc-s/index.php/comments/el_compromiso_de_buencafe_por_reducir_su_huella_de_carbono/
Consultado el: 15 Abril 2016

Inicialmente la borra llega conducida por una tubería elevada desde la planta de producción de café liofilizado hasta el silo de alimentación que se muestra en la figura 13.

Figura 13. Silo de alimentación de borra (cisco).



Luego la borra se desplaza por gravedad por los ductos de la caldera hasta llegar a los tornillos alimentadores de borra que se observan en la figura 14 donde antes de entrar a la caldera, se mezcla con el residuo de concentrado de café que también es eliminado en la caldera.

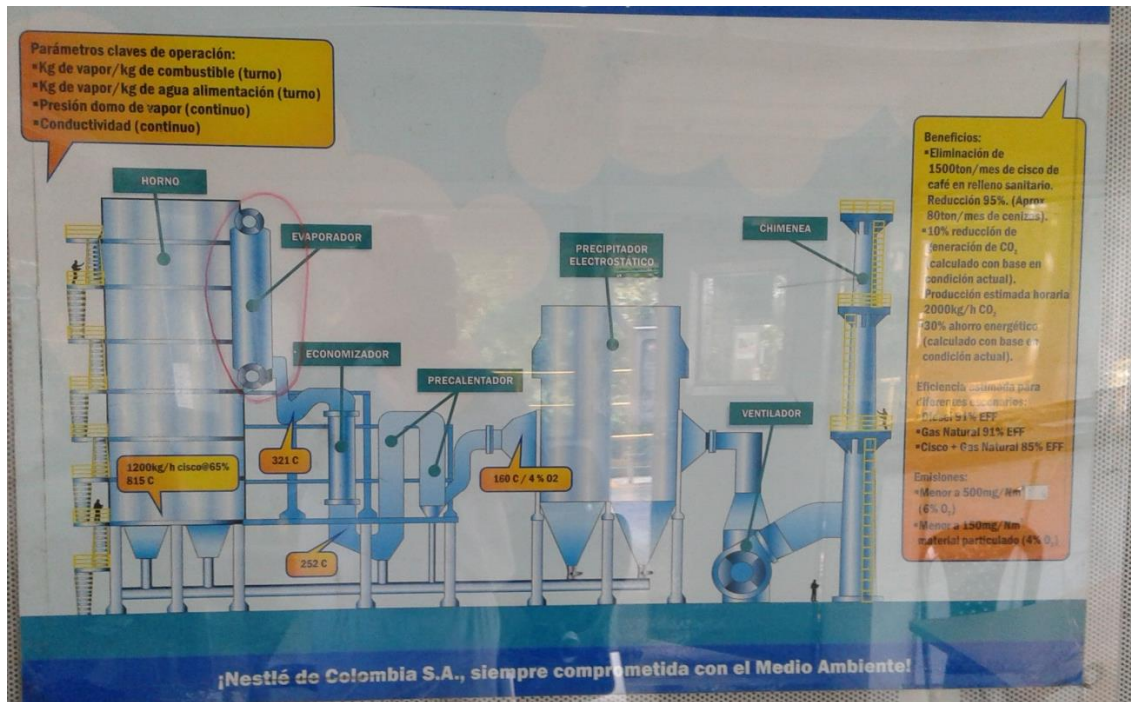
Figura 14. Tornillos alimentadores de borra.



Y finalmente entra al hogar de la caldera para hacer el proceso de combustión y generar el vapor.

Luego de generarse el vapor, este es transportado por tuberías a los diferentes procesos que se realizan en la planta como se detalla en la figura 15.

Figura 15. Ficha de operación de la caldera



Bajo las condiciones de composición, obtención y uso de la borra actual de Nestlé para el proceso de generación de vapor que es empleado como fuente de energía en los procesos de producción adicionales, se realizó el diagnóstico de este residuo.

2. SECADO

En este capítulo se detalla el proceso de experimentación de secado de borra de café.

2.1. PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS

El secado de borra se realizó con el fin de comprobar la reducción de humedad presente para así aumentar su potencial calorífico.

2.1.1 Secador solar tipo túnel. Este secador desarrollado por Cenicafé ha sido adoptado y utilizado por un amplio número de caficultores, para atender flujos de café producidos en fincas, de menos de 200 arrobas de café pergamino seco por años.

Con el fin de incrementar el aprovechamiento de la energía solar, se diseñó este secador que dispone de una superficie de 20 m², adecuada para atender el secado de café de una producción anual de 1.500 kilogramos de café pergamino seco; sin embargo las dimensiones se pueden acoplar a otras producciones. Ver figura 16.

Tomando como referencia que para un día pico de producción de 60 kilogramos de café lavado, que requieren 3,3 m² de piso, con un espesor de capa de máximo 3 centímetros, aún se cuenta con espacio disponible hacer la extrapolación de secar 70 kilogramos de borra de café, bajo estos parámetros.

Gracias a la facilidad del movimiento de las compuertas del secador permite ajustar las condiciones internas del aire de secado (temperatura y humedad relativa) a las necesidades del proceso. Al iniciar el proceso se dejan las compuertas del secador abiertas para que entre mayor cantidad de aire y acelerar el proceso de secado si las condiciones ambientales lo permiten. A medida que la humedad disminuye se requiere mayor temperatura lo cual se logra ajustando las compuertas hasta dejar una apertura cercana al 20%.

El secador cuenta con aberturas frontales y laterales para permitir la salida del aire húmedo y favorecer su circulación a través del secador.

Figura 16. Secador solar.



Se seleccionó este tipo de secador ya que cumple con las condiciones de empleo de uso de energía solar como único combustible, así como la capacidad para secar 70 kilogramos de borra de café.

La selección del tiempo de secado se hizo basado en la incidencia solar en el sitio, que según se referencia, en Colombia se cuentan con 4 horas solares pico, con mayor incidencia de 10am a 2pm. De igual manera se tuvo en cuenta la fluctuación del clima y la variación de radiación presente dado que en un día de secado se presentaron lluvias, lo cual afecta el tiempo de secado por la disminución de la radiación directa

Para el proceso de secado se dispuso una muestra de borra de 70kg separada en dos muestras de 35kg cada una, dichas muestras se dispusieron a secar en el secador solar parabólico tipo túnel. El primer lote de 35kg se dispuso con una capa de espesor de 1cm y el segundo lote de 35kg se dispuso con una capa de espesor de 2cm; esto con el fin de determinar la diferenciación en cuanto al tiempo y la humedad retirada en el proceso y la influencia del espesor de capa para el mismo, como se observa en la tabla1.

Tabla 1. Datos de secado en secador solar parabólico

Fecha	Hora del Día	Datos Del Secador		Tiempo (h)	Masa (g)	Lote 1	Lote 2	
		Humedad (%)	Temperatura (°C)					
7/23/2015	1:30pm	36	34	t0	0	m0	35	35
7/24/2015	10:30am	25	43	t1	21	m1	29.86	30.66
7/24/2015	4:00pm	18	44	t2	28	m2	21.88	25.58
7/27/2015	10:00am	40	35	t0	93	m0	11.72	15.08
7/27/2015	4:00pm	42	35	t1	99	m1	11.28	13.38
7/28/2015	10:00am	26	40	t0	117	m0	10.74	12.28
7/28/2015	4:00pm	46	32	t1	123	m1	10.64	11.42

Como se describió el proceso de secado solar, así como se ve en la figura 17 y .figura 18, se observa el cambio físico de apariencia de la borra seca a la borra húmeda, donde incluso su color aparentemente disminuye en oscuridad.

Figura 17. Borra húmeda.



Figura 18 Borra seca.



Para permitir el flujo de aire constante en el lote en secado total, según la norma, la muestra debió removerse cada 6 horas con el fin de permitir que la humedad fuera disminuyendo de forma simultánea, así mismo, se hacía control de masa para así determinar la reducción de humedad basado en la reducción de peso respecto al peso inicial de la muestra.

Como se muestra en la tabla 2, salvo el primer día, los siguientes días en que la muestra estuvo en el secado, se hizo control de peso cada 6 horas, en este caso, se determinó que fuera durante las horas sol día para así enfatizar la reducción de humedad bajo la radiación a la que estaba siendo sometida la borra.

Para el control de peso, se recogió cada lote de muestra en un saco de lona y se pesó en una balanza de precisión, se determinó el peso de la muestra y se comparó con el peso inicial, así se determinó la disminución progresiva de humedad, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Humedad removida.

	Tiempo (h)	Masa (g)	Lote1	Lote2	HUMEDAD REMOVIDA (%)	
t0	0	m0	35	35		
t1	21	m1	29,86	30,66	14,69	12,4
t2	28	m2	21,8	25,58	37,71	16,57
t0	93	m0	11,72	15,08	66,51	56,91
t1	99	m1	11,2	13,38	68	61,77
t0	117	m0	10,74	12,28	69,31	64,91
t1	123	m1	10,64	11,42	69,6	67,37

2.2 VARIABLES DE OPERACIÓN DE SECADO

Son las características del proceso que por autonomía del autor, basado en la bibliografía, fueron escogidas para dar seguimiento al comportamiento del proceso de secado en la muestra y así determinar las condiciones a las cuales el proceso ocurre en parámetros favorables.

2.2.1 Temperatura. A mayor temperatura la energía cinética de las moléculas de agua localizadas en la superficie de la borra aumenta, y será suficiente para vencer las fuerzas intermoleculares de la fase líquida y en consecuencia, evaporarse.

La temperatura también afecta la humedad relativa del aire, ya que a mayor temperatura aumenta la presión de saturación de vapor de agua, por lo tanto, mayor captación de agua.

En este caso, la temperatura de la borra a secar aumenta rápidamente desde un valor inicial hasta la temperatura de vaporización que será igual o aproximada a la temperatura del bulbo húmedo del gas (aire), permanece constante durante un periodo y luego aumenta a causa de la zona seca que se forma en la superficie de alimento.

El aumento o disminución de la temperatura en el proceso, depende de la incidencia solar que recibió el secador durante el tiempo que estuvo allí la muestra, por esta razón, se observó cómo durante las horas solares aumento la temperatura del secador y el proceso de eliminación de agua presente, fue más efectivo. En la tabla 3 se observan los datos de temperatura del secador solar parabólico durante el proceso.

Así mismo la temperatura, incidió directamente en el proceso de secado, ya que a mayor temperatura, el flujo de aire por diferencia de densidad aumentada a través de la borra y permitió que la evaporación fuera mejor. Estos datos de temperatura registrados en sitio durante los días en que se llevó a cabo el proceso se registran en la tabla 3.

Tabla 3 Registro de temperatura ambiental

Día de secado	Hora / día	Temperatura ambiental (°C)
1	11	25,52
	12	26,24
	13	26,02
	14	25,65
	15	25,24
	16	27,91
2	10	24,92
	11	26,89
	12	28,65
	13	30,36
	14	31,34
	15	31,44
3	16	33,29
	10	24,75
	11	27,7
	12	29,67
	13	31,27
	14	31,89
4	15	32,67
	16	31,77
	10	25,01
	11	26,23
	12	28,11
	13	29,05
5	14	29,42
	15	30,28
	16	30,59
	10	27,55
	11	27,57
	12	25,46
6	13	26,25
	14	26,25
	15	26,99
	16	28,97
	10	26,17
	11	27,54
6	12	26,99
	13	29,04
	14	30,13
	15	27,83
	16	27,29

Fuente: Estación Meteorológica CENICAFE, Consultado el 28 de julio del 2015

2.2.2 Tiempo de residencia. Según la referencia tomada para este proceso, que es el secado de café en secador solar parabólico de CENICAFE ya que es el equipo empleado para este proceso y, el café, es el único elemento que ha sido empleado en este equipo para el proceso de secado.

El tiempo requerido para secar el café esta entre 7 y 15 días, dependiendo de la temperatura del lugar y el comportamiento de las lluvias.⁸ esto debido a la humedad del café pergamino luego de ser sometido al proceso de lavado; sin embargo, para este proceso de secado de borra se optó por elegir el menor tiempo ya que la humedad presente en la borra es menor a la humedad del café pergamino.

⁸ CENICAFE. BENEFICIO DEL CAFÉ II: SECADO DEL CAFÉ PERGAMINO. Cartilla 21. Disponible en: http://www.cenicafe.org/es/publications/cartilla_21_Secado_del_cafe.pdf consultado el Febrero del 2016

3. RESULTADOS

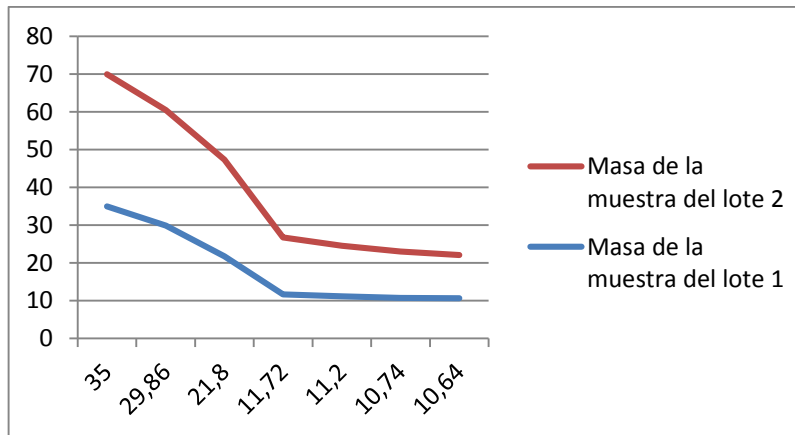
Luego de ser sometidos los dos lotes al proceso de secado en el secador solar se hizo un análisis del comportamiento de la muestra lo largo del tiempo que estuvo sometida a este proceso y se comparó el comportamiento de las variables de secado entre sí.

3.1 SECADO EN SECADOR SOLAR PARABÓLICO TIPO TÚNEL

Cómo se mostró en la tabla 2, se recopilaron los datos de tiempo y masa para cada uno de los lotes que estuvieron en el secador. Se hizo la comparación del comportamiento de secado de las muestras del lote 1 y 2 con el tiempo de secado al que estuvieron expuestos y la disminución de la masa, reflejado como la disminución de humedad de la muestra.

En la gráfica 1 se determina el comportamiento de secado de las dos muestras a lo largo del tiempo que estuvieron sometidas al proceso.

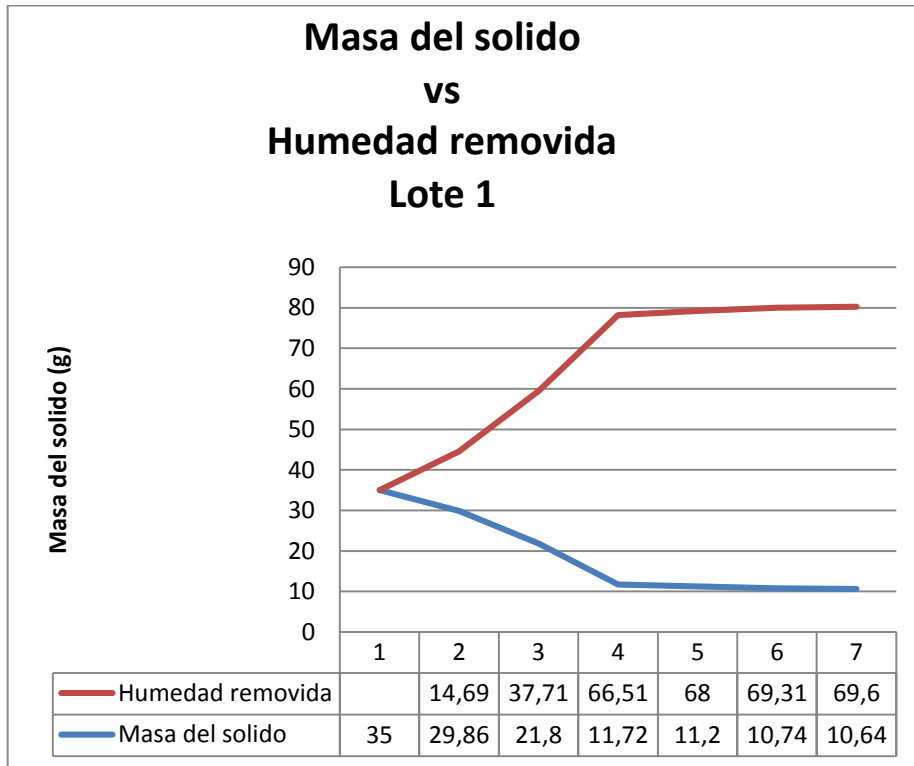
Gráfica 1. Comparación de masa entre lote 1 y 2



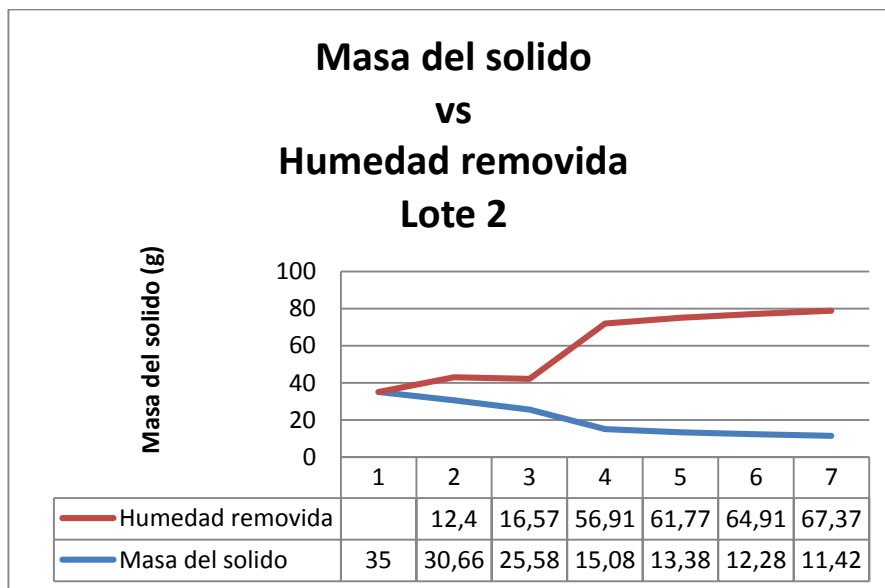
En la gráfica 1, se observa como el lote 1 de capa de espesor de 1 cm, requiere menos tiempo de secado respecto al lote 2 de capa de espesor de 2cm, puesto que al ser la misma cantidad de borra dispuesta a secar en los dos lotes, la reducción de masa de la muestra, se realiza en menor tiempo para el lote 1 y de la misma forma, la reducción de humedad máxima se logra a su vez en un tiempo menor respecto a la muestra del lote 2.

De la misma forma se realizó el análisis de la humedad removida para cada uno de los lotes de la muestra, como se pudo observar en las gráficas 2 y 3.

Gráfica 2. Masa vs humedad removida para lote 1.



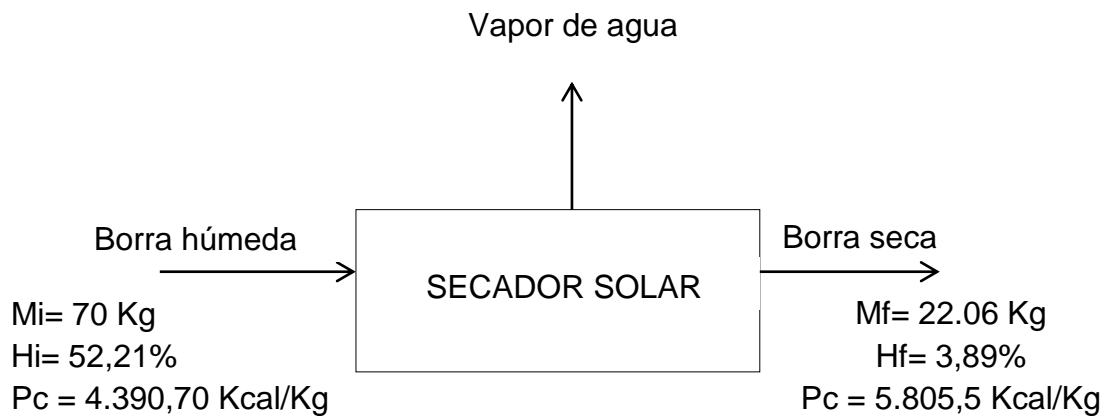
Gráfica 3. Masa vs humedad removida para lote 2



Este mismo comportamiento se demuestra en las gráfica 2 donde se refleja que la relación de masa del sólido respecto a la humedad removida se determina como un comportamiento opuesto desde el inicio del proceso de secado. Para el lote 1 a menor contenido de masa presente en la muestra, mayor contenido de humedad removida en la misma; y el equilibrio del proceso de secado se determina en el día 4.

3.1.1 Cálculo de cantidad de agua evaporada.

Figura 19. Diagrama de proceso de secado.



Dónde:

Mi = masa inicial.
 Hi = humedad inicial.
 Pc = poder calorífico.
 Mf = masa final.
 Hf = humedad final.

La ecuación que describe el cálculo para la relación de borra húmeda con respecto a la borra seca y la cantidad de agua retirada en el proceso es:

$$B_e = B_s + C_a \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

B_e = Cantidad de borra a la entrada del proceso.
 B_s = Cantidad de la borra a la salida del proceso.
 C_a = Cantidad de agua evaporada.

Para determinar la cantidad de agua evaporada durante proceso global secado, se despeja C_a de la ecuación 1.

$$C_a = B_e - B_s \quad \text{Ecuación 2}$$

$$C_a = 70Kg - 22,06Kg$$

$$C_a = 47,94 Kg$$

3.1.2. Cálculo de cantidad de agua retirada por muestra de secado. Debido a que el proceso de secado se realizó en dos muestras de borra, con espesor de 1 centímetro y 2 centímetro correspondiente, se procede a realizar los cálculos para cada muestra y determinar la cantidad de humedad retirada durante el proceso de secado en cada una de ellas aplicando la ecuación 2 y como se registró en la Tabla 4, donde se registró la reducción de humedad.

3.1.2.1 Cálculo de cantidad de agua retirada en muestra de lote 1.

$$C_{a1} = 35Kg - 10,64 Kg$$

$$C_{a1} = 24,36 Kg$$

3.1.2.2 Cálculo de cantidad de agua retirada en muestra de lote 2.

$$C_{a2} = 35Kg - 11,42 Kg$$

$$C_{a2} = 23,58 Kg$$

De acuerdo a los resultados de cantidad de agua removida C_a en el proceso de secado de borra, se observa que hay mayor cantidad de agua retirada en el lote con espesor de capa de 1 centímetro.

3.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Para determinar específicamente las condiciones a las cuales se presentó la borra luego de ser sometida al proceso de secado solar se sometieron a pruebas de laboratorio para determinar las características de cada lote y así demostrar el cambio en sus propiedades.

Para explicar los cambios en la composición química de la borra luego del proceso de secado, según el lote, se analizó cada una de las características dadas por el informe de laboratorio presentado por la empresa Interlabco S.A.S. ver anexo 2 y 3.

Tabla 4. Resultados de laboratorio para borra lote 1

Característica	Base Seca	Método ASTM
Humedad total %	3,83	D 3302 / D3302M-12
Cenizas %	0,64	D 3174 – 11
Materia volátil %	82,2	D 3175 – 11
Carbono fijo %	17,16	D 3172 - 07 ^a
Azufre %	0,24	D 4239 – 12
Poder calorífico, Kcal/Kg	5810	D 5865- 11 ^a

Tabla 5. Resultados de laboratorio para borra lote 2

Característica	Base Seca	Método ASTM
Humedad total %	4,55	D 3302 / D3302M-12
Cenizas %	0,68	D 3174 – 11
Materia volátil %	82,22	D 3175 – 11
Carbono fijo %	17,1	D 3172 - 07 ^a
Azufre %	0,24	D 4239 – 12
Poder calorífico, Kcal/Kg	5801	D 5865- 11 ^a

3.2.1 Humedad Total. La humedad final, es decir la humedad de la borra seca, depende del espesor del lecho, velocidad de secado, temperatura de secado y el tiempo de secado o tiempo de residencia.

De acuerdo a estas variables propias del proceso de secado y analizadas durante el mismo, se determinó que el contenido de humedad está directamente ligado al peso del sólido, como se muestra en las tablas 4 y 5 donde se observa que en los resultados para el lote 1, donde la masa final es menor, el contenido de humedad es menor, respecto al lote 2, donde estas características son mayores.

Para la determinación del % de humedad del sólido se hizo mediante la norma ASTM D 3302 tomando como referencia el análisis para el carbón, ya que la borra tiene características similares. Este método de ensayo cubre la medición de la humedad total en el carbón, tal como existe en el sitio, en el momento y en las condiciones que se muestrea. Es aplicable a los carbones como extraídos, procesados, enviado, o se utilicen en actividades comerciales normales. No es aplicable a los lodos de carbón - agua, lodos, o productos pulverizados bajo 0,5 mm de diámetro de tamaño de tamiz.⁹

⁹ Norma ASTM 3302. Método de prueba estándar para Humedad total.

3.2.2 Cenizas. Las cenizas deben ser analizadas detalladamente con el fin de prever posibles daños en los elementos con los que pueda tener contacto el sólido, si la temperatura de esta sobre pasa el punto de fusión, se podría llegar a presentar taponamiento de los ductos de alimentación así como una disminución en la transferencia de calor por incrustaciones.

Según la tabla 4 y 5, la norma utilizada por Interlabco para determinar el % de cenizas presente en la borra seca, se determinó mediante la norma ASTM 3174- 11 llamada Método de prueba estándar para Ceniza en el análisis de la muestra de carbón y coque de carbón, como se ha mencionado, la borra se analizó bajo los mismos parámetros del carbón, ya que cumple con características similares.

Este método de ensayo cubre la determinación del residuo inorgánico como cenizas en la muestra de análisis de carbón o coque tal como se preparó de acuerdo con el Método D 2013 o la norma ASTM D 346. Los resultados obtenidos se pueden aplicar como la ceniza en el análisis inmediato, la norma ASTM D 3172, y en el último análisis, la norma ASTM D 3176. Para la determinación de los componentes de la ceniza, se hace referencia a ASTM D 2795 y D 3682. Ver Terminología D 121 para definición de cenizas¹⁰.

3.2.3 Azufre. De acuerdo a la normatividad legal el contenido de azufre de las emisiones o suspensiones de crudos pesados o combustible en agua o cualquier otro líquido, o los de carbón mineral en agua, en hidrocarburos o en cualquier otro líquido no deberá ser superior a 1,7% en peso, cuando éstas se utilicen como combustible en hornos o calderas dentro del territorio nacional.

Para determinar que la borra seca cumple con esta regulación se analizó mediante la norma ASTM D 4239 titulada Métodos de prueba estándar para el azufre en el análisis de la muestra de carbón y coque de uso alto de temperatura en horno de combustión.¹¹

3.2.4 Poder calorífico. La borra puede ser comparada con un carbón sub-bituminoso, por su poder calorífico, debido a que el poder calorífico de un carbón de este tipo está comprendido en el rango de 4.614,8 Kcal/Kg y 6.394 Kcal/Kg rango en el que también se encuentra la borra.

Para determinar el poder calorífico se realizó bajo la norma D5865 que se titula Método de prueba estándar para poder calorífico del carbón y coque. Este método de ensayo se refiere a la determinación del poder calorífico del carbón y el coque ya sea por isoperibol, calorímetro de bomba adiabática.¹²

¹⁰ Norma ASTM 3174. Método de prueba estándar para Ceniza en el análisis de la muestra de carbón y coque de carbón.

¹¹ Norma ASTM D 4239. Método de prueba estándar para el azufre.

¹² Norma ASTM D 5865. Método de prueba estándar para poder calorífico del carbón y coque.

3.3 BALANCE DE MASA

El balance de masa permite determinar la cantidad de aire empleado durante el proceso de secado, con el análisis de las condiciones del proceso desde la entrada de la borra al secador hasta la salida. Como se ve en la figura 20 el diagrama del balance de masa global, permite identificar las corrientes de entrada y de salida del proceso, es decir, bajo qué condiciones entra la borra húmeda al proceso de secado solar y como son sus características de humedad y peso luego de ser sometida a ese proceso. En las tablas 6 y 7 se referencian las condiciones de borra así como las condiciones del secador respectivamente.

Figura 20. Diagrama balance de masa global

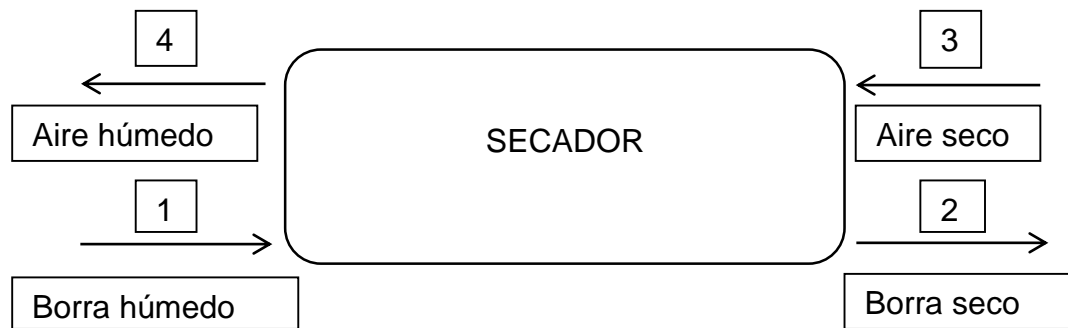


Tabla 6. Datos de borra

Corriente 1 Borra húmeda		Corriente 2 Borra seca		Corriente 3 Aire seco		Corriente 4 Aire húmedo	
M1	70 Kg	M2	22,06 Kg	M3	1,156 Kg	M4	49,1 Kg
M1s	0,477	M2s	0,961			y4	0,98
M1a	0,5221	M2a	0,0389				

Tabla 7. Datos de secador solar

Diámetro del secador	200 cm
Velocidad del aire	22,2 Km/h
Presión	644,47 mmHg
Temperatura	22,8 °C

Balance general:

$$M1 + M3 = M2 + M4 \quad \text{Ecuación 3}$$

Balance por componentes

Sólidos:

$$M1 * m1s = M2 * m2s \quad \text{Ecuación 4}$$

Agua:

$$M1 * m1a = M2 * m2a + M4 y4 \quad \text{Ecuación 5}$$

3.3.1 Cálculo del flujo de aire. Para el cálculo del flujo de aire empleado en el secado se requiere usar ecuaciones adicionales como son:

Ecuación de continuidad:

Por medio de esta ecuación se calcula el flujo de aire de la corriente 3

$$Ma = V * A * \rho \quad \text{Ecuación 6}$$

Área de un círculo:

Se emplea para hallar el área, requerida en la ecuación 6.

$$A = \pi r^2 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$A = 0,3141 \text{ m}^2$$

Ecuación de los gases ideales:

Por medio de esta ecuación se calcula la densidad, requerida en la ecuación 6

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación 8}$$

Sustituyendo n, que es igual a la masa sobre el peso molecular del gas, se transforma la ecuación 8 así:

$$PV = m/PM * RT \quad \text{Ecuación 9}$$

De esta forma se despeja la densidad de la ecuación 9, recordando que la densidad es igual a la masa sobre el volumen y la ecuación 9 queda en dichos términos:

$$m/V = P * PM / RT \quad \text{Ecuación 10}$$

Por medio de la ecuación 10 se calcular la densidad

$$\rho = P * PM / RT \text{ Ecuación 11}$$

$$\rho = (644,47 \text{ mmHg} * 28,8 \text{ g/mol}) / ((0,062 \text{ mmHg m}^3/\text{molK}) * 501,15 \text{ K})$$

$$\rho = 597,36 \text{ g/m}^3$$

Teniendo los valores de área y densidad, se procede a calcular el flujo de aire de la corriente 3 empleando la ecuación 6, ecuación de continuidad. La velocidad del aire se determinó del anexo 4 donde se referencian las condiciones ambientales.

$$M3 = 6.17 \text{ m/s} * 0,3141 \text{ m}^2 * 0,597 \text{ Kg/m}^3$$

$$M3 = 1,156 \text{ Kg}$$

Teniendo el valor del flujo de aire de la corriente 3 se procede a calcular el flujo de aire de la corriente 4 despejando de la ecuación 3 del balance general M4 así:

$$M4 = M1 + M3 - M2 \text{ Ecuación 12}$$

$$M4 = 70\text{Kg} + 1,156 \text{ Kg} - 22,06 \text{ Kg}$$

$$M4 = 49,1 \text{ Kg}$$

3.3.2 Cálculo de la fracción de aire. Para determinar la humedad del aire a la salida del secador, se calcula mediante la relación de la cantidad de agua evaporada de la ecuación 2 y el flujo de aire de la corriente 4

$$Y4 = Ca / M4 \text{ Ecuación 13}$$

$$Y4 = 47,94 \text{ Kg} / 49,1 \text{ Kg}$$

$$Y4 = 0,98$$

3.4 BALANCE DE ENERGÍA EN EL PROCESO DE SECADO

Para el cálculo del consumo energético y la transferencia de calor durante el proceso de secado, inicialmente se realizaron y energía para tener claridad del comportamiento del proceso.

Los balances de energía se realizaron con el fin de determinar, de acuerdo a las condiciones de la muestra en el proceso de secado, las condiciones de operación a las que debieron ser sometidas las muestras y así, de acuerdo a los resultados

determinar las especificaciones técnicas del proceso de secado propuesto en este proyecto.

El balance de energía permite demostrar la transferencia de calor que se presenta a lo largo del proceso de secado. El flujo de calor se determina por las entradas y salidas de los diferentes tipos de calor que están involucrados en el secado como se muestra en la figura 21. Para determinar las condiciones de poder calorífico y humedad, necesarias para realizar los cálculos correspondientes para el flujo de calor involucrado se realizaron análisis de laboratorio tanto para la borra húmeda (llamada cisco por Nestlé) como para la borra seca. Ver anexos 1,2 y 3

El balance de energía, de acuerdo a las entradas y salidas del flujo del calor dentro del proceso de secado se calcula así:

$$Q_e + Q_{rad} = Q_{perd} + Q_s + Q_{evap} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

Q_e = Calor de entrada.

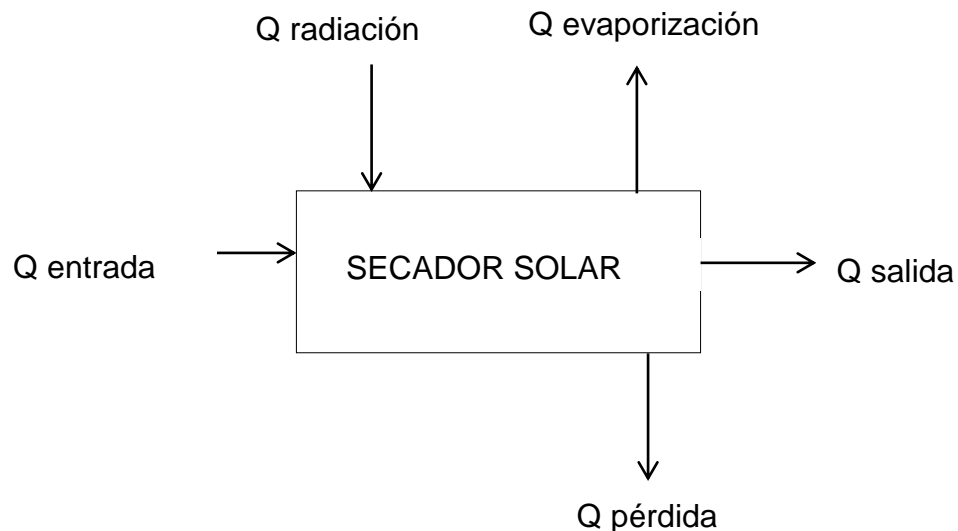
Q_{rad} = Calor de radiación

Q_{perd} = Calor de pérdida.

Q_{evap} = Calor de evaporación.

Q_s = Calor de salida.

Figura 21. Esquema de flujo de calor.



3.4.1 Cálculo del Calor de entrada. El calor de entrada se define como la energía propia de la borra de café húmeda con la que entra al proceso de secado solar; como todo elemento tiene en sí mismo energía contenida, esa es al que en este caso se determina como el calor de entrada.

$$Q_e = m_{bh} * p_{c_{bh}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde:

Q_e = calor de entrada del proceso.

m_{bh} = masa de borra húmeda.

$p_{c_{bh}}$ = poder calorífico de borra húmeda.

$$Q_e = 70 \text{ Kg} * 5304.64 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q_e = 371.324,8 \text{ Kcal}$$

3.4.2 Cálculo de calor de radiación. El cálculo del calor por radiación se determina de acuerdo a la radiación solar que incidió en la muestra durante el proceso de secado; esta como la fuente de energía única empleada en el proceso. Este dato se obtuvo del informe meteorológico emitido por la estación de meteorología de CENICAFE. Ver anexo 4.

De acuerdo a la tabla 8 donde se indica la radiación solar neta presentada en los días de secado y por medio de la ecuación se calculó la transferencia de calor por radiación.

$$Q_{rad} = \frac{\Sigma \text{radiacion neta}}{\text{numero de muestras}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$Q_{rad} \text{ promedio} = (17.751,9 \text{ Watt/m}^2) / 40$$

Para este cálculo, se realizó la sumatoria de los datos de radiación neta reflejados en el tiempo que estuvo sometida la muestra al proceso de secado, restringido a las horas de sol presentes en el sitio, que se determinaron de 10 de la mañana a 4 de la tarde. Se hizo la recopilación de 40 datos de radiación durante ese tiempo y así se calculó el calor de radiación promedio al que estuvo sometida la muestra.

Tabla 8. Condiciones de radiación.

Estación: Cenicafé (Manizales Caldas)			
Día	Fecha	Hora / día	Radiación Neta (W/m ²)
1	23	11	379.1
	23	12	403.3
	23	13	217.2
	23	14	197.1
	23	15	162.9
	23	16	367.6
2	24	10	518.5
	24	11	580.7
	24	12	764.9
	24	13	801.3
	24	14	807.9
	24	15	607.1
	24	16	495.6
3	25	10	441.5
	25	11	619
	25	12	832.8
	25	13	836.1
	25	14	770.5
	25	15	569.3
	25	16	323.1
4	26	10	327.5
	26	11	463.2
	26	12	426
	26	13	382.8
	26	14	311.5
	26	15	377.3
	26	16	289.2
5	27	10	619.6
	27	11	348.7
	27	12	123.8
	27	13	289.6
	27	14	61.6
	27	15	222.3
	27	16	293.1
6	28	10	549.5
	28	11	464.1
	28	12	188.3
	28	13	556.9
	28	14	418.8
	28	15	187.5
	28	16	155.1

Fuente: CENICAFÉ, Reporte de estación meteorológica. Consultado Julio 2016

3.4.3 Cálculo de calor de evaporación. El calor de evaporación, es el calor absorbido por la borra de café durante el proceso de secado. Este calor se calculó por intervalos, donde los datos recopilados de experimentación, brindaron datos más precisos para este cálculo, debido a que durante la experimentación se tuvieron lapsos en días donde no se hizo mediciones, como se muestra en la tabla 1. El cálculo de evaporación se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{evap} = (m_i - m_f) * \chi \text{ Ecuación 17}$$

Dónde:

Q_{evap} = calor de evaporización.

M_i = masa inicial.

M_f = masa final.

χ = entalpía de evaporización (SMITH, VAN NESS, & ABBOTT, 2007, pág. 717).

3.4.4 Cálculo de evaporización total. Aplicando la ecuación 6, se calculó el calor de evaporización para todo el proceso, partiendo de las condiciones inicial y final del mismo en términos de la masa inicial y la masa final del proceso de secado global así como la entalpía de evaporización¹³ a la temperatura del proceso de secado, la cual se determinó como un promedio entre la temperatura inicial y final del proceso. Ver tabla 3.

$$Q_{evap} = (70 \text{ Kg} - 22,06) \text{Kg} * 2.421,2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{evap} = 116.072,328 \text{ Kj}$$

Cálculo de evaporización por etapas para Lote 1.

Como se mencionó anteriormente, las mediciones en la experimentación no se tomaron bajo parámetros de tiempo regulares, sin embargo se determinaron los intervalos de días de secado donde la medición de las condiciones de experimentación de temperatura, masa inicial y masa final permite hacer los cálculos correspondientes de flujo de calor como se muestra en la tabla 8. Debido a esto se seleccionaron los días 24, 27 y 28 de Julio como intervalo 1, 2 y 3 respectivamente.

¹³ SMITH, J.M. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. Mc Graw Hill. 2007. Apéndice F: Tablas de vapor. P 717.

Tabla 9. Intervalos de experimentación

Fecha	Hora del Día	Datos Del Secador		Tiempo (h)	Masa (g)	Lote1	Lote2	
		Humedad (%)	Temperatura (°C)					
7/24/2015	10:30am	25	43	t1	21	m1	29.86	30.66
7/24/2015	4:00pm	18	44	t2	28	m2	21.8	25.58
7/27/2015	10:00am	40	35	t0	93	m0	11.72	15.08
7/27/2015	4:00pm	42	35	t1	99	m1	11.2	13.38
7/28/2015	10:00am	26	40	t0	117	m0	10.74	12.28
7/28/2015	4:00pm	46	32	t1	123	m1	10.64	11.42

Intervalo 1: Día 24 de Julio

$$Q_{evap} = (29,86 \text{ Kg} - 21,8) \text{ Kg} * 2.399,7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{evap} = 19.341,582 \text{ KJ}$$

Intervalo 2: Día 27 de Julio

$$Q_{evap} = (11,72 \text{ Kg} - 11,2) \text{ Kg} * 2.418,8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{evap} = 1.257,776 \text{ KJ}$$

Intervalo 3: Día 28 de Julio

$$Q_{evap} = (10,74 \text{ Kg} - 10,64) \text{ Kg} * 2.416,4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{evap} = 24165 \text{ KJ}$$

Cálculo de evaporización por etapas para Lote 2.

Se realiza de la misma manera que se demostró en el numeral anterior, con las condiciones de experimentación de la tabla 9.

Intervalo 1: Día 24 de Julio

$$Q_{evap} = (30,66 \text{ Kg} - 25,58) \text{ Kg} * 2.399,7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{evap} = 12.190,476 \text{ KJ}$$

Intervalo 2: Día 27 de Julio

$$Q_{evap} = (15,08 \text{ Kg} - 13,38) \text{ Kg} * 2.418,8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{evap} = 4111,96 \text{ KJ}$$

Intervalo 3: Día 28 de Julio

$$Q_{evap} = (12,28 \text{ Kg} - 11,42) \text{ Kg} * 2.416,4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$
$$Q_{evap} = 2.078,104 \text{ KJ}$$

3.4.5 Cálculo del calor de salida. El calor de salida se define como la energía propia de la borra de café seca con la que sale del proceso de secado solar; como todo elemento tiene en sí mismo energía contenida, esa energía es la que se determina como el calor a la salida.

$$Q_s = m_{bs} * pc_{bs} \text{ Ecuación 18}$$

Dónde:

Q_s = calor de entrada del proceso.

m_{bs} = masa de borra seca.

pc_{bs} = poder calorífico de borra seca.

$$Q_s = 22,06 \text{ Kg} * 5.805,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$
$$Q_s = 128.069,33 \text{ Kcal}$$

3.4.6 Cálculo del calor de pérdidas. El calor de pérdidas se calcula para determinar las pérdidas que se presentan a los largo de la transferencia del calor del proceso de secado.

$$Q_{perd} = Q_e + Q_{rad} - Q_{evap} - Q_s \text{ Ecuación 19}$$

$$Q_{perd} = 371.324,8 \text{ Kcal} + 432,973 \text{ Watt} / m^2 - 116.072,328 \text{ KJ} - 128.069,33 \text{ Kcal}$$

$$Q_{perd} = 371.324,8 \text{ Kcal} + 372.289 \text{ Kcal} - 27,72 \text{ Kcal} - 128.069,33 \text{ Kcal}$$

$$Q_{perd} = 127.616,118 \text{ Kcal}$$

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Respecto al sistema de secado solar, se determinó que si es recomendable para el secado de borra de café, puesto que, como se muestra en las gráficas 1,2 y 3, es posible determinar y analizar el comportamiento de las muestras de los lotes 1 y 2, dispuestos a secar en este equipo, ya que es posible observar el comportamiento de las características de humedad removida respecto a la masa del sólido así como la influencia del espesor de capa seleccionado en el comportamiento de la muestra a lo largo del proceso de secado.

Para el lote 2, debido a que el espesor de capa, respecto al lote 1 es mayor, el proceso de secado no es uniforme y es inclusive más lento respecto al secado del lote 1, debido a que la relación de masa de sólido y humedad removida, no se refleja de manera inmediatamente opuesta, incluso en el día 2 y 3, se observa un periodo donde no se retira humedad de la muestra, como si el proceso de secado hubiera quedado suspendido, luego hay un crecimiento exponencial en el porcentaje de humedad retirado pero que no se mantiene constante.

Para afirmar que el lote 1 cumplió con los requisitos de ser la mejor opción en cuanto a condiciones específicas para el proceso de secado solar, se realizó una comparación respecto a las características propias de las muestras de lote 1 y 2 explicadas en el capítulo 3 de este documento, reflejadas en las tablas 4 y 5 para lote 1 y 2 respectivamente.

Respecto al contenido de humedad final, luego de secar las muestras en el secador solar, la muestra del lote 1, contuvo menor humedad respecto al lote de con un valor de 3,83% respecto a 4,55%; bajo esta premisa y con el fin de emplear la borra como combustible directo, el lote 1 tiene mejor característica para cumplir con este proceso por su menor contenido de humedad.

Y finalmente, la característica más importante, por ser la determinante para el proceso de combustión al que se pretende sea sometido este residuo, el lote 1, demostró que tiene mayor poder calorífico respecto al lote 2, el aumento fue de 9 kilocalorías, sin embargo, al ser mayor, el lote 1 se elige como al mejor opción respecto a potencial calorífico para el proceso de combustión.

De acuerdo a todo lo anterior, se determina que la propuesta de secado acorde para este residuo es el secado solar térmico con un espesor de capa de máximo 1 centímetro con un tiempo de residencia de la muestra en el equipo de 4 días para una muestra de 35 Kg.

De acuerdo a los resultados de cantidad de agua removida C_a en el proceso de secado de borra, se observa que hay mayor cantidad de agua retirada en el lote con espesor de capa de 1 centímetro, quiere decir, que el tanto el flujo de aire como la transferencia de calor, es mejor bajo esta condición, puesto que permite que la

transferencia de calor sea más eficiente tanto para la incidencia solar en la muestra como el flujo de aire para la remoción de la humedad.

Del balance de masa se determinó que la cantidad de aire necesaria para este proceso de secado planteado es 49,1 Kg y la humedad del aire a la salida del secado es de 98%, es decir según estas condiciones que la cantidad de agua retirada en el proceso es mayor a la cantidad de masa de sólido seco, es decir que se retira la humedad de la muestra.

De acuerdo a los resultados del balance energético realizado, se determinó que el sistema de secado propuesto energéticamente es viable, debido a que en la transferencia de calor del mismo, se demostró que la pérdida de calor es menor respecto al calor de entrada y el calor de salida del proceso.

4. ANÁLISIS COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Debido a que la viabilidad de este proyecto se basa en la posterior implementación de un sistema de secado solar térmico para borra de café, con proyección a la producción de borra de café en la planta de Nestlé en Bugalagrande, no se consideró efectuar un estudio económico que permita determinar la viabilidad del proyecto, por lo tanto se presenta únicamente el costo de la inversión inicial que incluye equipos, servicios, materia prima y mano de obra; estos tres últimos tomados como el capital de trabajo necesario para dar inicio a la producción.

4.1 COSTOS DE ACTIVOS

Para la evaluación del proyecto se determinó en base al costo de adquisición de los activos que representan la inversión total del proyecto.

Para determinar los activos, se tomó como referencia los materiales necesarios para la construcción del secador solar parabólico tipo túnel que se utilizó en este proyecto para el secado de borra. Ver anexo 5.

Para evaluar los costos de inversión, se realizaron dos cotizaciones como referencias de precios, basados en los costos propuestos por CENICAFE (ver anexo 7) y los propuestos por un tercero, en este caso, un distribuidor (ver anexo 8).

Tabla 10. Costos de Activos según distribuidor.

Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Guadua 2"	M	9	\$ 3.000	\$ 27.000
Guadua 5"	M	10	\$ 3.000	\$ 30.000
Guadua 4"	M	10	\$ 3.000	\$ 30.000
Guadua de 1,5	M	10	\$ 1.500	\$ 15.000
Guadua de 4m	M	4	\$ 8.000	\$ 32.000
Puntilla 1 1/2	Lb	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Puntilla de 2 1/2	Lb	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Alambre dulce	Kg	2	\$ 3.500	\$ 7.000
Pintura 1/4	tarro	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Pintura 1/4	tarro	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Thiner	Lt	1	\$ 2.800	\$ 2.800
Brocha 2"	U	1	\$ 4.000	\$ 4.000
Cemento	Bulto	1	\$ 28.000	\$ 28.000
Arena	Bolsa	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Gravilla	Bolsa	1	\$ 4.500	\$ 4.500
Plástico Agropilas	M	5	\$ 6.500	\$ 32.500
Saranda	U	3	\$ 8.500	\$ 25.500
			Total:	\$ 268.300

Tabla 11. Costos de Activos según CENICAFÉ

Materiales	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Guadua 7,00	m	9	\$ 2.500	\$ 22.500
Guadua 4,60	m	10	\$ 2.500	\$ 25.000
Guadua 2	m	6	\$ 1.000	\$ 6.000
Guadua de 1,5m	m	6	\$ 1.000	\$ 6.000
Guadua de 4m	m	4	\$ 2.000	\$ 8.000
Plástico agroplas 2,50	m	7,5	\$ 5.600	\$ 42.000
Plástico agroplas 1,50	m	8	\$ 2.500	\$ 20.000
Plástico agroplas 1,50 doble	m	5	\$ 5.600	\$ 28.000
Puntilla 2	lb	1	\$ 1.800	\$ 1.800
Puntilla de 2 1/2	lb	1	\$ 2.400	\$ 2.400
Alambre dulce	Kg	1	\$ 3.000	\$ 3.000
Pintura	galón	0,25	\$ 58.000	\$ 14.500
Pintura	galón	0,25	\$ 58.000	\$ 14.500
Thiner	Lt	1	\$ 2.900	\$ 2.900
Brocha 2"	u	1	\$ 4.000	\$ 4.000
Cemento	Bulto	0,25	\$ 17.000	\$ 8.500
Arena	m3	0,25	\$ 10.400	\$ 2.600
Gravilla	m3	0,25	\$ 10.400	\$ 2.600
Total				\$ 214.300

Fuente: Oliveros, Carlos. Secador parabólico Mejorado, 2008. Avances técnicos Cenicafé. Consultado el: Julio 2016

Según los costos reflejados en las tablas 10 y 11, la opción menos costosa es la presentada por CENICAFÉ, por lo cual, la adquisición de los activos, se sugiere hacerse basado en esa referencia.

4.2 COSTOS DE MANO DE OBRA

Para la construcción del sistema de secado solar propuesto en este proyecto es necesario contar con mano de obra calificada, capaz de realizar la construcción de la infraestructura. Según la ley laboral de Colombia, el salario que se tendrá como referencia para el pago al personal, será determinado a partir del salario mínimo mensual vigente. Se hace la proyección de contratación por 30 días calendario.

Para determinar este costo, al igual que para el costos de activos, se basó, en los costos presentados por el distribuidor seleccionado y CENICAFÉ. En la tabla 12 se presenta este costo diferenciado para las dos opciones.

Tabla 12. Costo de mano de obra

CONCEPTO	CENICAFÉ	DISTRIBUIDOR
Jornales	4	12
Costo unitario día	\$40.000	\$30.000
Costo total día	\$ 160.000	\$360.000
Total por días contratados	\$ 4'800.000	\$ 10'800.000
Ingeniero supervisor	1	1
costo mensual	\$2'000.000	\$1'300.000
Total	\$6'800.000	\$12'100.000

De acuerdo a los costos de mano de obra, CENICAFÉ, es la opción más rentable, ya que propone la contratación de menos jornales, sin que estos suponga que la instalación del proyecto se va a realizar en mayor tiempo y menos eficiente, esto se afirma, debido a que CENICAFÉ, cuenta con el personal capacitado y de total conocimiento para la instalación de este secador solar parabólico, por lo que supone que con la contratación de 4 jornales, es suficiente.

4.3 COSTOS DE SERVICIOS

Debido a que en este proceso de secado no se utiliza ningún tipo de servicio público adicional, no genera ningún costo.

4.4 COSTOS DE MATERIA PRIMA

La borra de café, que es la materia prima para ese sistema de secado propuesto en este proyecto, es un residuo generado en la producción de café liofilizado; por esta razón su adquisición no genera ningún costo.

4.5 COSTO TOTAL DE INVERSIÓN

La inversión total de la implementación del sistema de secado propuesto, se calculó de acuerdo a los costos presentados anteriormente, como la suma de cada uno de ellos. Para determinar la mejor opción en cuanto a inversión inicial, se calculó el costo de inversión propuesto por los costos propuestos por CENICAFÉ y el distribuidor seleccionado.

- Inversión total por CENICAFÉ

$$INVERSIÓN TOTAL = \$ 214.300 + \$6'800.000$$

$$INVERSIÓN TOTAL = \$7'014.300$$

- Inversión total por distribuidor.

$$**INVERSIÓN TOTAL = \$ 268.300 + \$12'100.000**$$

$$**INVERSIÓN TOTAL = \$12'368.300**$$

De acuerdo a los costos de inversión presentados, se determinó que la opción de costos basado en CENICAFÉ, es la opción de menor costo en cuanto a inversión inicial para la implementación del sistema de secado con el sistema de secador solar parabólico tipo túnel propuesto en este trabajo de grado.

5. CONCLUSIONES

- La alternativa de secado propuesta para biomasa de café tipo borra es el sistema de secado solar térmico empleado con el secador solar tipo túnel de CENICAFE. El aprovechamiento actual de la borra de café en Nestlé en la planta de Bugalagrande, como residuo del proceso de producción de café liofilizado, es el uso de este residuo como combustible directo para la caldera acuatubular de generación de vapor, sin embargo, al ser el contenido de humedad de la borra de 52,21% no cumple con las características necesarias para ser empleado como este tipo de combustible en la generación de vapor.
- Se determinó que el espesor de capa de la muestra de borra no debe ser mayor a 1 centímetro, debido a que bajo esta condición, la reducción del contenido de humedad de la muestra así como el aumento del poder calorífico es mayor respecto a un espesor de capa mayor. Al igual se estableció que el tiempo de residencia en el secador propuesto no necesita ser mayor a 4 días, siempre y cuando las condiciones de radiación sean similares a las mostradas en este proyecto y no se vean afectadas por días continuos de no sol o lluvia. Se determinaron las especificaciones técnicas del proceso como la humedad total de la muestra al final del proceso fue de 3,89%, el poder calorífico fue de 5.805,5 Kcal/kg. Estas son las especificaciones principales de proceso que de acuerdo a los parámetros para usar la borra como combustible directo, se cumplieron.
- De acuerdo al análisis de costos de implementación del sistema de secado propuesto en este proyecto, se estableció que la opción viable para implementación respecto al costo total de inversión es la presentada por CENICAFÉ, con un valor de \$ 7'014.300 respecto al costo ofrecido por el distribuidor por un valor de \$12'368.300, donde el porcentaje de ahorro es del 43%.

6. RECOMENDACIONES

- Para la implementación de esta alternativa de secado para la borra de café, se recomienda, hacer una extrapolación de este proyecto para la producción total de borra de café actual que son 18 toneladas por hora, se sugiere como opción el sistema basado en el artículo “Diseño, construcción y análisis de un secador solar industrial en Huacalera, Quebrada de Huamuaca, Argentina” ver anexo 9. Una contribución a este proyecto que puede ser realizada como proyecto para el área de ingeniería mecánica.
- Para el estudio de la incidencia solar sobre el proceso de secado, se sugiere, hacer la evaluación de esta condición en días continuos de secado y no, como sucedió en este proyecto, tener lapsos de días donde no se pueda determinar el comportamiento de secado, respecto a la radiación solar recibida y la humedad retirada de la muestra determinada por la variación del peso de la muestra a lo largo del secado.
- Para materiales como la borra de café, que aunque no tiene uniformidad en el tamaño de partícula, que no es de gran tamaño, en su estado húmedo tiende a aglomerarse y así impedir que la transferencia de calor sea uniforme a lo largo de toda la capa expuesta. Por esa razón se recomienda el secado en dos lotes de 1 centímetro y 2 centímetros respectivamente, para determinar cuál espesor de capa es mejor para el proceso de secado. En caso de materiales granulares, como la borra de café, se debe disponer a secar en lotes de capa delgada de tal forma que la radiación solar pueda incidir a lo largo de toda la capa en menor tiempo posible y así mismo la transferencia de calor sea uniforme a lo largo del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ARANGO, R. Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales . *Revista Lasallista de Investigación* , 49-5.

ARISTIZÁBAL ARIAS, C., & DUQUE ORREGO, H. (2005). Caracterización del proceso de beneficio de café en cinco departamentos cafeteros de Colombia. 299-318.

CENICAFÉ. (2010). Secado del café pergamino. Beneficio del café II.

CONDORI, M. A., DURÁN, G., & ECHAZÚ, R. (2010). Diseño, construcción y análisis de un secador solar industrial en Huacalera, Quebrada de Humahuaca, Argentina.

FARFÁN PARRA, C.A. (2006) Diseño de un secador solar térmico para granos a nivel laboratorio. *Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América.*

GARCIA, M. (2003). Determinación de la humedad de un alimento por un método gravimétrico indirecto por desecación. Departamento de Tecnología de alimentos. Universidad Politécnica de Valencia.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Norma Técnica Colombiana NTC 1486. Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá: ICONTEC, 2008.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. Norma Técnica Colombiana NTC 5613. Última versión. Bogotá: ICONTEC, 2008.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas Norma Técnica Colombiana NTC 4490. Última versión. Bogotá: ICONTEC, 1998.

JURADO CHANÁ, J. M., MONTOYA RESTREPO, E. C., OLIVEROS TASCÓN, C. E., & GARCÍA ALZATE, J. (2009). Método para medir el contenido de humedad del café pergamino en el secado solar del café. Chinchiná: CENICAFÉ.

MÉNDEZ OCHOA, L.R. (2002). Obtención de papa deshidratada para alimentación animal, por métodos combinados. *Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América.*

OLIVEROS, T. (2010). Determinación del contenido de humedad del café durante el secado en silos. *Cenicafé* 61 (2): 108-118.

OLIVEROS TASCÓN, C. E., RAMIREZ GÓMEZ, C. A., SANZ URIBE, J. R., & PEÑUELA MARTÍNEZ, A. E. (2008). Secador parabólico mejorado. Programa de investigación científica de CENICAFÉ.

ORTÍZ CASTAÑEDA, P.A. (2007) Diseño e implementación de un proceso de secado a nivel de planta piloto para especies aromáticas cultivadas en una finca orgánica. *Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América.*

RIAÑO, C. Curso de tecnología del café. Universidad Nacional Abierta y A distancia. Facultad de Ingeniería de Alimentos.

ROJAS MORENO, H.Y. (1999). Diseño y cálculo del sistema de producción de energía térmica y su aprovechamiento a partir de la borra de café para la planta de DECAFÉ S.A. en Manizales. *Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América.*

URRIBARÍ, A. (2014). Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel. *Revista Multiciencias, Vol 14, N° 2, 129-139.*

VERA MARTÍNEZ, J.N. (2009) Evaluación de la deshidratación por secado de cilantro a nivel laboratorio para la empresa Colsintesis. *Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Químico. Bogotá, Colombia. Fundación Universidad de América.*

ANEXOS

ANEXO A
CONDICIONES DE BORRA HÚMEDA

ANEXO B.
BORRA SECA LOTE 1

ANEXO C.
BORRA SECA LOTE 2

ANEXO D. CONDICIONES AMBIENTALES. ESTACIÓN: CENICAFÉ (MANIZALES CALDAS)							
día	fecha	Hora / día	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Radiación Neta (W/m ²)	Vel. Viento (m/s)	Presion (hPa)
1	23	11	25.52	63.21	379.1	7.924	862.8
	23	12	26.24	60.98	403.3	3.221	862.3
	23	13	26.02	62.22	217.2	2.297	861.7
	23	14	25.65	62.35	197.1	4.743	861.1
	23	15	25.24	63.42	162.9	2.237	860
	23	16	27.91	52.7	367.6	2.902	859.3
2	24	10	24.92	62.57	518.5	11.203	862.7
	24	11	26.89	58.15	580.7	6.146	862.2
	24	12	28.65	51.08	764.9	6.364	861.6
	24	13	30.36	41.84	801.3	6.802	860.9
	24	14	31.34	37.06	807.9	5.761	859.8
	24	15	31.44	36.76	607.1	7.447	858.9
	24	16	33.29	32.62	495.6	8.856	858.2
3	25	10	24.75	57.2	441.5	7.674	860.4
	25	11	27.7	48.58	619	7.06	860.2
	25	12	29.67	43.98	832.8	9.305	859.7
	25	13	31.27	39.7	836.1	5.234	859
	25	14	31.89	39.15	770.5	8.326	858
	25	15	32.67	35.4	569.3	8.601	857.2
	25	16	31.77	35.38	323.1	6.237	856.6
4	26	10	25.01	60.95	327.5	8.92	859.8
	26	11	26.23	57.05	463.2	6.204	859.6
	26	12	28.11	49.67	426	8.18	859
	26	13	29.05	46.41	382.8	6.914	858.7
	26	14	29.42	42.15	311.5	3.549	858.1
	26	15	30.28	42.37	377.3	6.223	857.5
	26	16	30.59	41.66	289.2	4.274	857
5	27	10	27.55	54.48	619.6	6.541	859.7
	27	11	27.57	58.51	348.7	8.714	859.6
	27	12	25.46	71.64	123.8	5.136	859.2
	27	13	26.25	65.57	289.6	3.905	858.4
	27	14	26.25	63.91	61.6	4.324	857.7
	27	15	26.99	61.78	222.3	2.618	857.2
	27	16	28.97	53.56	293.1	3.349	856.4
6	28	10	26.17	54.29	549.5	8.759	859.8
	28	11	27.54	54.69	464.1	7.596	859.7
	28	12	26.99	54.58	188.3	4.067	859.2
	28	13	29.04	47.48	556.9	9.144	858.4
	28	14	30.13	44.96	418.8	9.013	857.5
	28	15	27.83	51.24	187.5	3.844	856.8
	28	16	27.29	51.16	155.1	2.536	856.6

ANEXO E.
SECADOR SOLAR PARABÓLICO MEJORADO.

ANEXO F.
SUBPRODUCTOS DEL CAFÉ.

ANEXO G.
COTIZACIÓN DISTRIBUIDOR.

FERRETERIA EL ECONOMICO
 NIT. 36.182.882-0
 Teléfono: 871 22 00
 Cra. 3 No. 4-36 Cel. 317 291 66 00 - 320 464 44 41 Neiva H.

Todo en acueducto y Gas.
Medidores para el Agua

REMISION
 COTIZACION

0062

CLIENTE: Laura Pinzón Loraño
 DIRECCION: Cra 118 # 83A 59
 Ciudad: BSA Forma de Pago: Contado.
 Teléfono: 4836873
 Vendedor: Julio

Cantidad	DESCRIPCIÓN ARTICULO	VR. UNIT.	VR. TOTAL
9	METROS DE GUSAS 2"	3000	27.000-
10	METROS DE GUSAS 5"	3000	30.000-
10	METROS DE GUSAS 4"	3000	30.000-
10	GUSAS DE A.S.M.	1500	15.000-
4	GUSAS DE 4 M	8000	32.000-
2	LIBRAS PINTURAS 1 1/2	2000	4000-
2	LIBRAS PINTURAS 2 1/2	2000	4000-
2	NILOS SOMBRE DUKE	3500	7000-
1/4	PINTURAS	10.000	10.000-
1/4	PINTURAS	10.000	10.000-
1	LITRO PAVAR	2800	2800-
1	BROCHAS 2"	4000	4000-
1	BUELTO CEMENTO	28.000	28.000-
1	BOLSAS ARENA	2000	2000-
1	BOLSAS GRAVILLA	4500	4500-
12	FORNALLES	30000	360000-
5	PLASTICO DE 50 CM 5 10.50	6500	32500-
3	SARASAS 4 1/2 . 11.2	8.500	25.500-
		TOTAL \$	626.000-

Pipa Impermeable - Tel. 871 76 49

FIRMA Y SELLO

ANEXO H.
SISTEMA DE SECADO SOLAR PARA INDUSTRIA.