



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

**ASPECTOS GENERALES DE LA INCORPORACIÓN DE UN
PROCESO DE SECADO SPOUTED-BED EN LA PRODUCCIÓN
DE CAFÉ**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

ULISES DAMIÁN SOLACHE HERNÁNDEZ



CIUDAD DE MÉXICO

AÑO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. AIDA GUTIÉRREZ ALEJANDRE
VOCAL: Ing. CARLOS ÁLVAREZ MACIEL
SECRETARIO: Dr. JUAN PABLO AGUAYO VALLEJO
1er. SUPLENTE: Ing. OSCAR HERNÁNDEZ MELÉNDEZ
2° SUPLENTE: Dr. ALBERTO ROSAS ABURTO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

JUAN PABLO AGUAYO VALLEJO

SUSTENTANTE:

ULISES DAMIÁN SOLACHE HERNÁNDEZ

Índice General

.....	0
Acrónimos y Abreviaturas	4
Nomenclatura.....	4
Glosario	6
Figuras y Tablas	7
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
Producción mundial	9
Consumo mundial	10
Precios de referencia ¹⁰	12
Mercado Nacional	12
Consumo Nacional	14
Café Orgánico	14
Análisis.....	15
ANTECEDENTES	18
JUSTIFICACIÓN	19
OBJETIVOS	21
Objetivos específicos.....	21
HIPÓTESIS	21
ALCANCE Y LIMITACIONES	21
Contribución del proyecto	21
DESARROLLO DE EQUIPO DE PROCESO	22
Secado	22
Métodos de secado	23
Sistema aire-sólido	24
Clasificación de las partículas	26
Lecho con Chorro (Spouted-bed o Spouting).....	27
Predicción de patrón o régimen de flujo.....	28
Parámetros y condiciones de proceso	29
Metodología	30
Cálculo de parámetros de diseño spouted-bed	31
Diseño Hidrodinámico	31

Cálculo energético.....	34
Cálculo del requerimiento energético del soplador.....	35
Ejemplo de cálculo	35
Tostado.....	38
Diseño hidráulico.....	43
COSTOS.....	44
Cálculo de costos fijos	44
Costos Variables	45
Periodo de Recuperación	46
CONCLUSIÓN	47
COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES.....	48
ANEXO	50
Proceso de café	50
<i>Imágenes representación de bayas, capas y grados de tueste del café</i>	53
BIBLIOGRAFÍA	55

Acrónimos y Abreviaturas

ECF	European Coffee Federation (Federación Europea del Café)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas)
ICO	International Coffee Organization (Organización Internacional del Café)
LTLT	Low temperatura long time (Baja temperatura, tiempos largos)
NCA	Asociación Nacional del Café, siglas en inglés
NCDT	National Coffee Drinking Trends (Tendencias nacionales en el consumo de bebida de café)
NRC	National Research Council (Consejo Nacional de Investigación) de Canadá
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SIACON	Sistema de Información Agroalimentaria de consulta SAGARPA

Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidades
<i>Símbolos latinos</i>		
Ar o Ga	Número de Arquímedes o Galileo	adimensional
A_t	Área transversal del lecho	m ²
A_s	Área transversal de los sólidos	m ²
a_w	Actividad del agua	
b	Constante dependiente de cada sistema	=0.3627
c_{pg}, c_{pl}, c_{ps}	Calor específico del gas, líquido y sólido, respectivamente	J/kg*K
d^*	Medida adimensional del diámetro de partícula	adimensional
d_p	Diámetro de partícula	m
D_i	Diámetro de entrada del lecho o tubería	m
D_{bed}	Diámetro de la cama o tubería	m
g	Aceleración de la gravedad	=9.8 m/s ²
g_c	Factor de conversión gravitacional	$= \frac{1 \text{ kg} * \text{m}}{\text{kg} * \text{wt} * \text{s}^2}$ $= \frac{9.8 \text{ kg} * \text{m}}{\text{kg} * \text{wt} * \text{s}^2}$
G	Gasto másico de gas	kg/h
h_a	Coefficiente de transferencia de calor pared-lecho	W/m ² *K
h_g	Coefficiente de transferencia de calor del gas por convección	W/m ² *K
h_s	Coefficiente de transferencia de calor gas-una sola partícula	W/m ² *K
k	Coefficiente de transferencia de masa	m/s
L_m	Altura del lecho empacado	m
L_{max}	Altura máxima del lecho fluidizado	m

Símbolo	Significado	Unidades
p, p_s, p_a	Presión, presión de saturación y presión de vapor respectivamente	Pa
ΔP_b	Caída de presión a través del lecho	Pa
ΔP_d	Caída de presión a través del distribuidor	Pa
r	Distancia desde el centro de una partícula	m
Re	Número de Reynolds	adimensional
R	Constante universal de los gases	=8.314 J/mol*K
S	Masa de sólido seco	kg
S_h	Masa de sólido húmedo	kg
T, T_s, T_a	Temperatura, temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco	K ó °C
t	Tiempo	h
u	Velocidad del gas	m/s
u^*	Medida adimensional de la velocidad de partícula	adimensional
u_{mf}	Velocidad superficial en condiciones de mínima fluidización	m/s
u_0	Velocidad superficial a través de un lecho de sólidos	m/s
u_{or}	Velocidad a través de un orificio	m/s
u_t	Velocidad terminal de la caída de una partícula	m/s
v	Flujo volumétrico del gas	m ³ /s
$\dot{\omega}_{s,actual}$	Energía de bombeo	W
$\dot{\omega}_{s,ideal}$	Energía de bombeo ideal	W
W	Humedad	
Wc	Humedad crítica	
X	Fracción húmeda base seca	$\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$
%X _{bh}	$\frac{(\text{Peso sólido húmedo} - \text{Peso sólido seco}) * 100}{\text{Peso sólido húmedo}}$	Kg/kg
Símbolos griegos		
α	Coeficiente de transferencia de calor convectivo	W/m ² *K
γ	Relación de calores específicos del aire	= C _{pg} / C _{vg} =1.4, adimensional
ε	Fracción de espacios vacíos	adimensional
ε_{mf}	Fracción de espacios vacíos en un lecho con condiciones de mínima fluidización	adimensional
η	Eficiencia	adimensional
μ	Viscosidad del gas	kg/m*s
$\rho_f, \rho_s, \rho_{bulk}$	Densidad del gas, densidad del sólido, densidad de bulto (bulk), respectivamente	kg/m ³
ϕ_s	Esfericidad de una partícula	adimensional
φ o %HR	Humedad relativa del aire	
θ_{rep}	Angulo de reposo	°

Unidades de Conversión para Café:

Un quintal	= 46 kilogramos (100 libras)
Un quintal métrico	=100 kilogramos
Una tonelada	=20 quintales
Una tonelada métrica	= 1,000 kilogramos
Una libra	=453.6 gramos
Un saco	= 60 kilogramos

Glosario

Agroindustria	Industria derivada de la actividad agrícola o que está relacionado con ella
Beneficio	Conjunto de operaciones para transformar los frutos de café, en café pergamino ver Anexo
Cafecultura	Conjunto de conocimientos relacionados a la producción de café
Claim	Es una declaración simple, concisa y directa. Informa o realza el beneficio principal que obtiene el cliente
Commodity	Todo bien que tiene valor o utilidad, y un muy bajo nivel de diferenciación o especialización
Divisas	Inversiones extranjeras de capital
Micotoxina	Metabolitos fúngicos cuya ingestión, inhalación o absorción cutánea reduce la actividad, hace enfermar o causa la muerte
Pirólisis	Fragmentación térmica de las moléculas grandes en ausencia de oxígeno
Quenching	Enfriamiento forzado del solido por medio de aspersión de agua o corrientes frías de gases
Rastrillar	Pasar un rastrillo por encima de los granos para cambiarlos de posición y no se aglomeren
Torrefacción	Proceso de tostar sólidos

Figuras y Tablas

FIGURA 1 PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE CAFÉ 1995/96-2016/17 8.....	10
FIGURA 2 CONSUMO INTERNO PAÍSES PRODUCTORES 1995/96-2016/17 8.....	10
FIGURA 3 CONSUMO DE CAFÉ EN GENERAL ⁵	11
FIGURA 4 PRODUCCIÓN DE CAFÉ EN MÉXICO, DATOS SIACON.....	14
FIGURA 5 PRECIO COMMODITY-CAFÉ (CENTAVOS DE EE UU DÓLAR POR LIBRA).....	16
FIGURA 6 PRECIOS A CAFETICULTORES 1995/2016 5.....	17
FIGURA 7 FLUIDIZACIÓN PARTICULAR U HOMOGÉNEA (CARLOS ÁLVAREZ MACIEL, 2004).....	25
FIGURA 8 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA SPOUTED-BED. LAS FLECHAS INDICAN EL MOVIMIENTO DEL SÓLIDO (EPSTEIN, N., GRACE, 2010).....	27
FIGURA 9 MAPA DE PATRONES GENERALIZADO PARA FLUJO VERTICAL ASCENDENTE EN SISTEMAS GAS- SÓLIDO (CARLOS ÁLVAREZ MACIEL, 2004).....	29
FIGURA 10 MAPA DE CLASIFICACIÓN PARTÍCULAS GELDART (KUNII & LEVENSPIEL, 1991)	32
FIGURA 11 EJEMPLO DE DISEÑO DE SPOUTED-BED	36
FIGURA 12 MAPA DE CLASIFICACIÓN PARTÍCULAS GELDART (KUNII & LEVENSPIEL, 1991)	36
FIGURA 13 FORMAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA 44.....	39
FIGURA 14 COLORACIÓN DEL TOSTADO 20	41
FIGURA 15 TOSTADOR DE TAMBOR Y FLUIDIZADO (FRESHLYROASTEDESPRESSOCOFFEE.CO.UK Y ASHELLC.COM).....	42
FIGURA 16 PROCESO DE TOSTADO DE CAFÉ ARÁBICA A 260 °C 43.....	42
FIGURA 17 CÁLCULO DE LN(US\$) EN FUNCIÓN DE ENERGÍA LN(BTU/MIN) 46.....	44
FIGURA 18 COSTO DE VENTILADORES CENTRÍFUGOS 46.....	45
FIGURA 19 PUNTO DE EQUILIBRIO FINANCIERO	46
TABLA 1 PRODUCCIÓN, OFERTA Y DEMANDA DE CAFÉ EN MÉXICO ¹¹	13
TABLA 2 PROPIEDADES DEL SISTEMA DE SECADO ^{4,32,33,41,42}	31
TABLA 3 GRADOS DE TUESTE ²⁶	41
TABLA 4 DATOS RECOPIADOS DE PROCESO DE TOSTADO ^{39,41,43,45}	43

RESUMEN

A pesar de los diferentes sabores y variedades realmente sólo hay dos tipos de café: Arábica y Robusta, siendo la primera la especie más común pero también la que genera una bebida de mayor calidad y mejores propiedades organolépticas.

Se han realizado muchas investigaciones para mejorar la calidad de las cerezas del café y las actividades relacionadas con el crecimiento de las plantas. Sin embargo, poca investigación ha sido dirigida hacia el proceso del producto después de cosecharlo (secado, tostado y molienda de las bayas de café) que a la fecha algunos de estos procesos han sido diseñados de forma empírica¹.

Este proyecto surgió para proporcionar información sobre la innovación de uno de los métodos de secado y tostado de café. Aunado a esta investigación, es necesario crear nuevos mercados de los productos ya generados o analizar los ya existentes para su introducción en ellos, pues como lo remarca Muñoz (2008) en su trabajo, señala que en el comercio tradicional o de libre competencia las relaciones comerciales entre los productores y consumidores, vendedores y compradores, están gobernadas por la ley de la oferta y la demanda, donde influye la especulación de los intermediarios. Por obvias razones, quienes resultan afectados en la comercialización son los pequeños productores al recibir un precio muy bajo por su producto y los consumidores al recibir un producto costoso, siendo los intermediarios los únicos ganadores en la comercialización.

Una de las propiedades físicas que dificultan las líneas de tratamiento del café es su elevada humedad, que puede ser de hasta del 50% en café pergamino (recién despulpado), por lo que el tratamiento previo a la mayoría de las operaciones (transporte, tostado, extracción, compostaje, etc.) es siempre el secado.

Actualmente, en el sector del café, se busca un sistema con un rendimiento energético adecuado, con el fin de hacer rentable la producción de dicha semilla, el sistema de secado tradicional o comúnmente utilizado es el de tambor rotatorio, con un rendimiento energético por debajo del 50%³, presentando diversos inconvenientes entre los que destacan: falta de homogeneidad en la humedad del producto, y la presencia de precipitado del tostado por el contacto continuo con la placa metálica.

El presente trabajo, describe el diseño de las etapas de secado y tostado de una planta de café utilizando la técnica de spouted-bed (lecho de borboteo o de chorro), como una propuesta de obtener un producto de mayor calidad y homogeneidad en los granos de café, para no tener una variación significativa entre lotes de producto.

Para fines de este documento se hará referencia al proceso de lecho fluidizado con chorro o borboteo como “spouted-bed”.

INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más populares en el mundo, siendo el segundo commodity de importancia a nivel mundial, sólo por debajo del petróleo y la tercera bebida más consumida después del agua y el té. Cerca de 25 millones de agricultores en 70 países alrededor del mundo dependen del café como medio principal para su subsistencia. Las características de las bebidas de café, agradables y ricas en aroma y sabor, son el resultado de un proceso complejo, que comprende desde las características del lugar donde se cosechan los frutos hasta el momento en que es servida como una taza de café ⁴.

Las bayas de café son cosechadas cada año cuando se encuentran firmes, con una coloración roja brillante. Durante el “Beneficio del café” (ver Anexo 1), se remueve la capa externa, las semillas dentro de éste son llamadas “granos de café verde”. La calidad de los granos de café es dictada de acuerdo a una serie de parámetros, verbi gratia, tamaño de grano, color, forma, método de secado, año de cosecha y presencia de defectos (granos rotos, pergamino, marchito y mohoso, por mencionar algunos.) ver NMX-F-597-SCFI-2016. Para mayor información sobre cosecha, beneficio y curación, consúltese la bibliografía pues son operaciones que están fuera del alcance de esta tesis.

En el mercado internacional se distinguen cuatro categorías de café de acuerdo con el tipo de grano. En orden descendente con respecto a la calidad y el precio ⁵, son:

- a) Suaves colombianos: son granos de arábica lavados, producidos principalmente en Colombia.
- b) Otros suaves: granos de arábica, cuyos principales productores son México y Centroamérica.
- c) Brasileños naturales: granos de arábica sin lavar, provenientes de Brasil y otros países sudamericanos.
- d) Robustas: producidos en África, Asia y algunos países sudamericanos.

Producción mundial

De acuerdo a la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), el valor bruto de la producción de café verde excede los \$16 billones de dólares, y sus exportaciones \$24 billones de dólares en 2012 ⁶. Alrededor de 70 países producen café, y cerca del 50% de éste proviene de tres países (Brasil, Vietnam y Colombia), los cuales no se caracterizan por calidad sino por cantidad ⁷.

De acuerdo a datos de la ICO (Organización Internacional del Café, por sus siglas en inglés), la producción mundial de café en el ciclo 2016/17 fue de 153.8 millones de sacos de 60 kg, ver Figura 1 Principales países productores de café 1995/96-2016/17 ⁸.

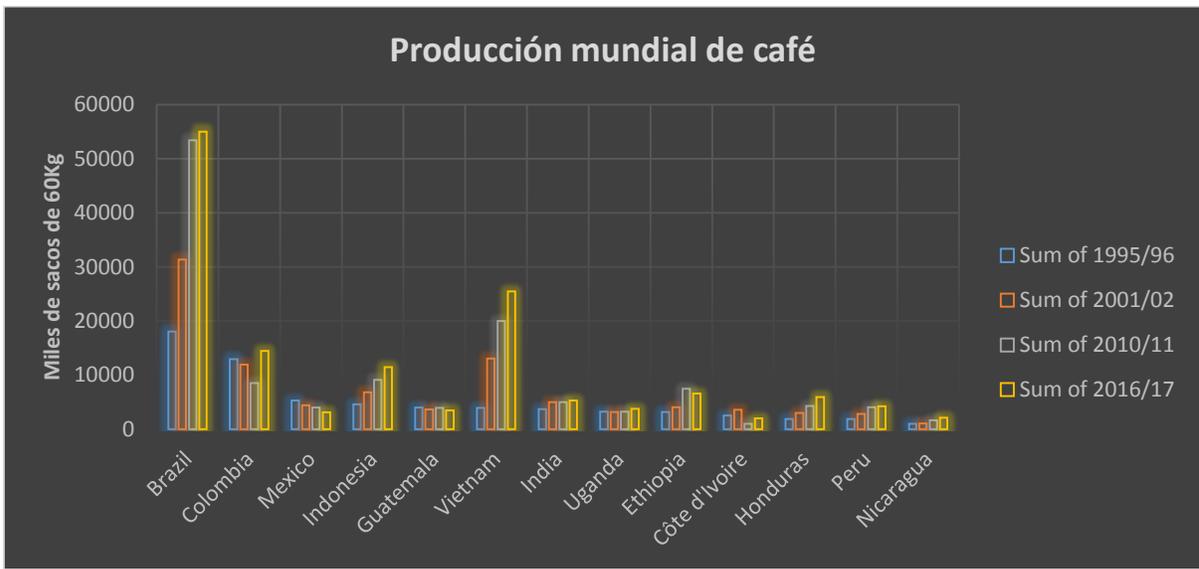


Figura 1 Principales países productores de café 1995/96-2016/17⁸

Consumo mundial

Por otra parte, se prevé que el consumo mundial del aromático aumente hasta 150.8 millones de sacos ver Figura 2 Consumo interno países productores 1995/96-2016/17, impulsado por el crecimiento de la demanda principalmente en mercados donde tradicionalmente no son consumidores de café y una reducción de los inventarios, esto último derivado de una menor disponibilidad en algunos de los principales países productores y exportadores⁵.

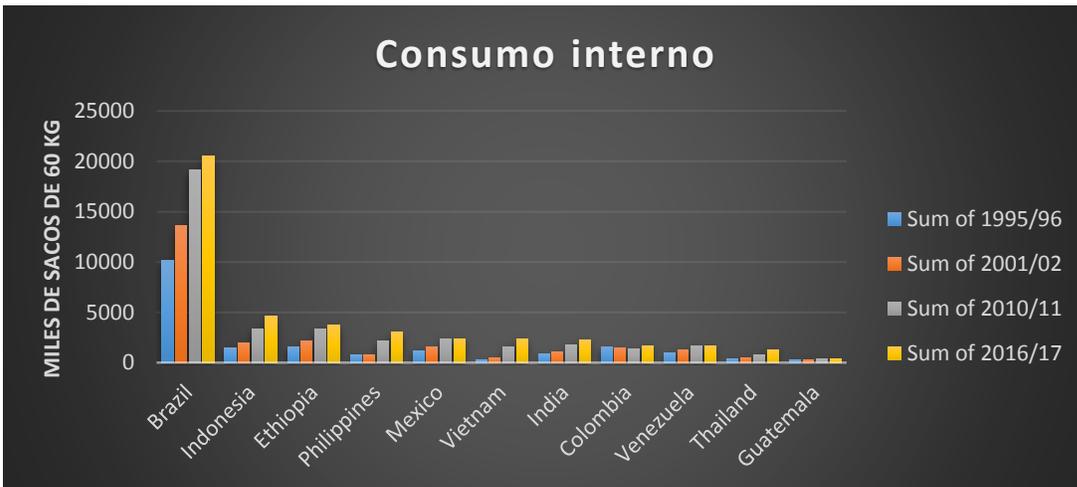


Figura 2 Consumo interno países productores 1995/96-2016/17⁸

Se estima que el consumo nacional en los países productores ha aumentado de aproximadamente 26 millones de sacos en 2000/01 a más de 38 millones de sacos al presente. El grueso de este aumento es atribuido al aumento en el mercado interno del Brasil, que creció durante ese periodo de 13 millones de sacos a más de 18 millones de sacos – más o menos la mitad de todo lo consumido en los países

productores. Fuentes de la industria consideran que el aumento de ingresos reales disponibles en el Brasil y una política orientada a la utilización de café de mejor calidad en los mercados internos son los factores más importantes que han contribuido a este crecimiento. En otras partes de América Latina el consumo está limitado por los niveles de ingresos urbanos relativamente bajos, como es el caso en el ligero aumento en México ⁹.

La Unión Europea ocupa la primera posición en el consumo de café, con 28.9 por ciento del consumo global en 2015/16. Le siguen en importancia Estados Unidos, con una participación del 16.6 por ciento, y Brasil, con el 13.8 por ciento de la demanda mundial. En los años recientes, el incremento en el consumo en los países productores y exportadores, así como en los mercados emergentes, ha sido mayor que el crecimiento de la demanda en los mercados consumidores tradicionales. Entre los mercados tradicionales destacan Estados Unidos, Canadá, Alemania, Francia, Italia y Japón; entre los mercados emergentes sobresalen Rusia, China, Corea del Sur, Ucrania, Argelia, Turquía, Australia y Sudáfrica.⁵

Analizando la *Figura 3 Consumo de café en general*. Claramente se puede establecer que el café, siendo un producto de origen etíope, es producido en los países que fueron colonias, para ser consumido principalmente en aquellos países que fueron las metrópolis o que en las últimas fechas han jugado ese papel en la economía mundial.

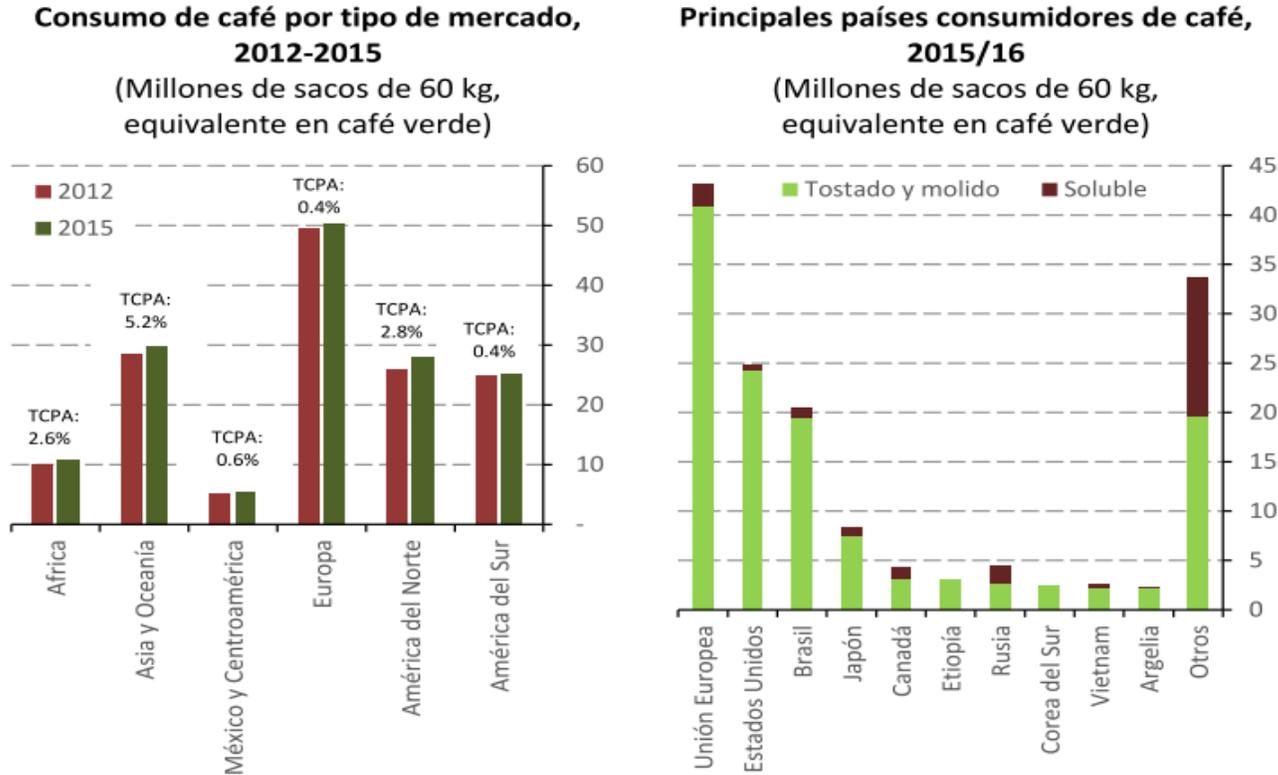


Figura 3 Consumo de café en general
*TCPA (tasa de crecimiento promedio anual)

Precios de referencia¹⁰

La Organización Internacional del Café (ICO, por sus siglas en inglés) calcula los precios indicativos para los cuatro grupos de café (suaves colombianos, otros suaves, brasileños naturales y robusta) que se comercializan en la Bolsa de Nueva York (Intercontinental Exchange) ¹⁰.

Debido a un balance más ajustado entre producción y consumo durante 2016/17 y la reducción de los inventarios al final del ciclo, el precio internacional de café al cierre de la jornada de hoy (6 de septiembre de 2017, solo por dar un ejemplo) en la Bolsa ICE de cafés suaves en Nueva York cerró en \$126.6 centavos de EE UU dólar por libra según datos de la página, ino.com.

Mercado Nacional

México cuenta con condiciones ideales para el cultivo del café, con zonas montañosas del sureste del país que se encuentran a altitudes mayores a 900 metros sobre el nivel del mar, así como temperaturas que van de los 17.5 a 25.3°C.

La cafecultura en el país representa una actividad fundamental en el sector agrícola, no sólo por el valor de su producción, sino además por ser un importante generador de divisas, además por las bondades que ofrece al ser un cultivo de gran relevancia ambiental, puesto que el 99% de los predios cafetaleros se establecen bajo sombra (cultivo que respeta flora y fauna de la zona) ⁵ que es uno de los muchos factores que determinan la calidad de un buen café.

En México, la producción de café ha sido de 824 mil toneladas en 2016, habiendo una disminución del 33.3% desde el año 2008 a la actualidad, poco más de 1.5 millones de costales de 60 kg ⁸ pasando del 3 lugar en 1995/96 al décimo primero en 2016/17, como se observa de igual manera en la Figura 1.

En 2016, el 93.3 por ciento de la cosecha nacional de café cereza se concentró en cinco entidades: Chiapas (43.4 por ciento), Veracruz (23.3 por ciento), Puebla (13.6 por ciento), Oaxaca (8.0 por ciento) y Guerrero (5 por ciento).

El 64.2 por ciento del volumen exportado correspondió a café verde sin tostar, el 6.2 por ciento a café tostado y molido, y el 29.6 por ciento a café soluble. Alrededor del 62 por ciento del volumen exportado tiene por destino Estados Unidos. Otros mercados para el café mexicano son España, Bélgica, Alemania, Canadá, Cuba y Japón ⁵.

De acuerdo con datos de SIACON (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta), en el ciclo 2016/17 el rendimiento promedio nacional de café cereza fue de 0.99 toneladas por hectárea. Este nivel de productividad es el mínimo desde que se tiene registro, en 1979/80.

Los principales factores que explican la disminución de la producción nacional durante la década reciente son la disminución de la superficie cosechada y la

reducción de la productividad de los cafetales, relacionada principalmente con la avanzada edad de las plantaciones, afectaciones climatológicas y por la roya del café ⁵. Lo cual se puede ver reflejada en la Tabla 1 Producción, oferta y demanda de café en México y la *Figura 4 Producción de café en México, datos SIACON*.

Tabla 1 Producción, oferta y demanda de café en México¹¹

Café Verde	2014/2015		2015/2016		2016/2017	
Año de comienzo del mercado	Oct 2014		Oct 2015		Oct 2016	
México	USDA Oficial	New Post	USDA Oficial	New Post	USDA Oficial	New Post
Inventario inicial	169	169	123	123	0	70
Producción arábica	3100	2980	3200	2050	0	2100
Producción robusta	200	200	200	200	0	200
Producción total	3300	3180	3400	2250	0	2300
Importación de granos	720	1441	900	1550	0	1600
Importación de tostado y molido	70	70	75	75	0	75
Importación solubles	175	137	175	170	0	180
Total de importaciones	965	1648	1150	1795	0	1855
Total de suministro	4434	4997	4673	4168	0	4225
Exportación de granos	1525	1530	1400	1080	0	1100
Exp. Tostado y molido	175	174	150	124	0	125
Exportación de solubles	835	854	900	594	0	600
Exportaciones totales	2535	2558	2450	1798	0	1825
Consumo doméstico de tostado y molido	470	788	500	780	0	795
Consumo doméstico de soluble	1306	1528	1673	1520	0	1530
Consumo doméstico	1776	2316	2173	2300	0	2325
Inventario final	123	123	50	70	0	75
Distribución total	4434	4997	4673	4168	0	4225
(1000 HA), (MILLONES DE ARBOLES), (1000 60 Kg de sacos)						

México posee el primer lugar en exportación de café orgánico en el mundo según un estudio de la cadena Univisión destacando como principales estados productores Chiapas, Oaxaca, Veracruz y Puebla, con una producción de 350 mil sacos de 60 kilos de café verde ¹²¹³. El país exporta el 62% de la producción nacional, la cual genera más de 3 millones de ocupaciones, de las cuales el 70% las realizan productores y familias de comunidades cafetaleras indígenas entre las cuales destacan: zapotecos, mixtecos, mixes, mazatecos, totonacas, nahuas, otomíes, tzotziles, zoques, tojolabales, huicholes y chatinos.

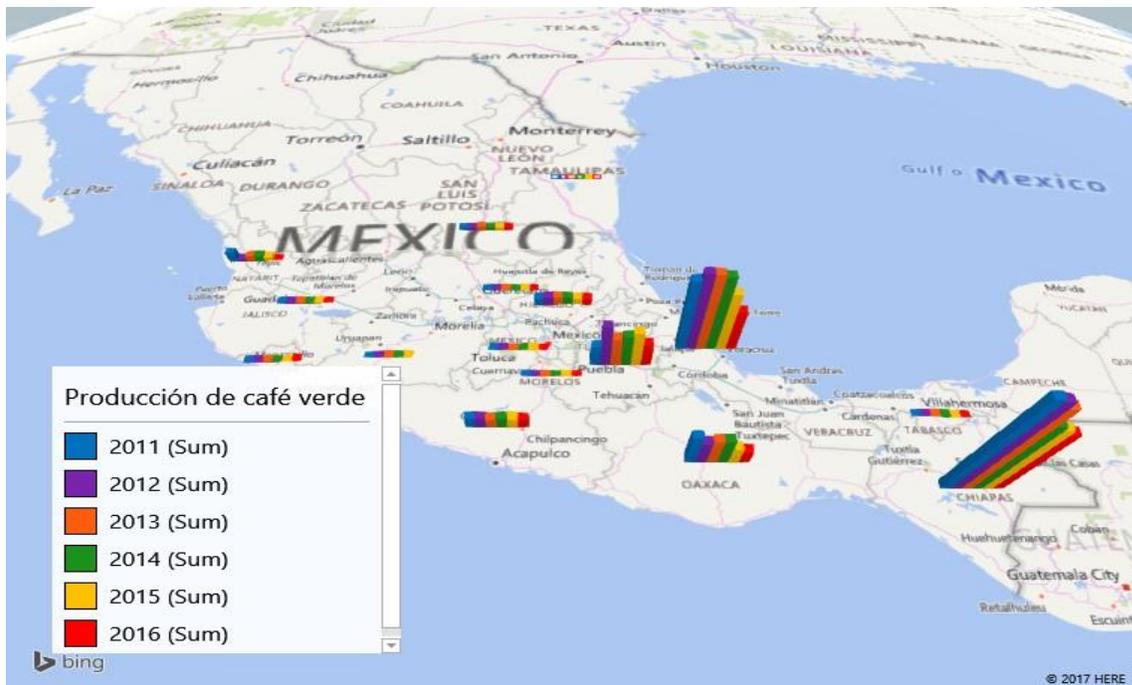


Figura 4 Producción de café en México, datos SIACON

Consumo Nacional

De acuerdo con información del USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), el consumo de café en México creció a una tasa promedio anual de 2.0 por ciento entre 2005/05 y 2015/16. Así, se ubicó en este último ciclo en 2.35 millones de sacos de 60 kg, en volumen equivalente en café verde. El 64.9 por ciento del consumo correspondió a su forma en café soluble y el 35.1 por ciento como café tostado y molido.

Café Orgánico

El término café orgánico se refiere a aquellos granos de café que se cultivan sin el uso de pesticida o fertilizantes inorgánicos, utilizando sólo métodos naturales. La teoría detrás de todo esto es que la producción de café orgánico se siembra a la sombra, intercalado entre árboles tales como el naranjal, el platanero, el limonero, etc.

Con este sistema se evita la contaminación del agua y se mantiene la riqueza del suelo. Además, los pájaros tienen como hábitat los árboles que dan sombra al café y mantienen a raya las distintas alimañas e insectos dañinos del cafeto.

Con el tiempo, se ha abandonado este sistema de producción y se introduce el sistema actual de extensivo al sol, en donde el uso de insecticida y fertilizante es necesario, como es el caso de Brasil, con su gran producción a costa de altos índices de deforestación.

El café orgánico es hoy en día más caro que el café normal, porque los costos de producción son superiores a los del sistema de cultivo tradicional. A esto se añade que la producción de café orgánico se realiza a pequeña escala y en zonas de difícil acceso de maquinaria, debido a que se encuentran en las colinas de nuestro sistema montañoso.

El cultivo de café orgánico se rige por normas internacionales de producción e industrialización que son vigiladas bajo un sistema de certificación que nos garantiza el consumo de café de alta calidad sin insumos de síntesis química y la protección del medio ambiente, además de buen precio al productor como lo ha venido haciendo la organización internacional “Fairtrade Labelling Organizations International, E.V,” (n.d.).

El cultivo de café orgánico aumenta la productividad de la planta y los ingresos económicos en la venta del café, al mismo tiempo que contribuye a la protección de los recursos naturales para futuras generaciones. La demanda del café orgánico está en constante crecimiento y constituye una fuente de ingresos de mayor remuneración, para las organizaciones campesinas que lo producen.

La producción orgánica constituye una alternativa sostenible. Tal es así, que el cultivo de café orgánico es una fuente de generación de recursos para muchos productores campesinos de algunas zonas marginales de los estados de México¹⁵.

Análisis

Realizando un análisis del café mexicano se obtuvieron las siguientes conclusiones:

De acuerdo con la estimación del USDA, por primera ocasión desde que se tiene registro (1961/62) la producción de café en México en 2016/17 es inferior al consumo nacional, en 50 mil sacos de 60 kg, equivalente en café verde. Con ventas al exterior por 1.825 millones de sacos y compras por 1.875 millones de sacos, se registraría un déficit de 50 mil sacos de 60 kg, equivalente en café verde. Lo que genera que se importe café de menor calidad (variedad canephora, la cual no tiene propiedades organolépticas diferenciales) de los países sudamericanos, provocando una mala imagen al café mexicano ¹⁶ ver Tabla 1 Producción, oferta y demanda de café en México, alarmando a los productores mexicanos, no sólo por la falta del gobierno federal en defender el producto nacional, sino de la falta en la verificación de la calidad de los granos que están siendo vendidos como café mexicano y a alto costo. Disminuyendo en los consumidores la preferencia del producto ^{17,18}.

De acuerdo a características del grano mexicano (como cultivo de sombra, de altura y orgánico) el presente trabajo recomienda darle un valor agregado al secarlo y tostarlo, enfocándose en generar un producto de especialidad con los más altos estándares debido a que el mercado paga un precio más alto por su calidad y diferenciación. Ahora bien, es debido a la falta de tecnificación de procesos y

transferencia de tecnología, que el productor sólo vende en café cereza, acotándolo en muchas restricciones en las que competir no es una opción.

El precio del café en México se rige con base en el contrato “C” en la bolsa de Nueva York ¹⁰ y varía de acuerdo a varios factores (ambientales, políticos, sociales, entre otros), como su disminución debido a la gran oferta de Brasil y Colombia, ver Figura 5 Precio commodity-café (centavos de EE UU dólar por libra). Por otra parte, los precios al consumidor del café soluble y del café tostado en México han reportado una ligera tendencia al alza durante los últimos dos años, mientras que el índice de precios al productor como promedio se redujo 4.4 por ciento con respecto al ciclo previo (octubre de 2014 a septiembre de 2015) ⁵ Figura 6 Precios a cafecultores 1995/2016.



Figura 5 Precio commodity-café (centavos de EE UU dólar por libra)

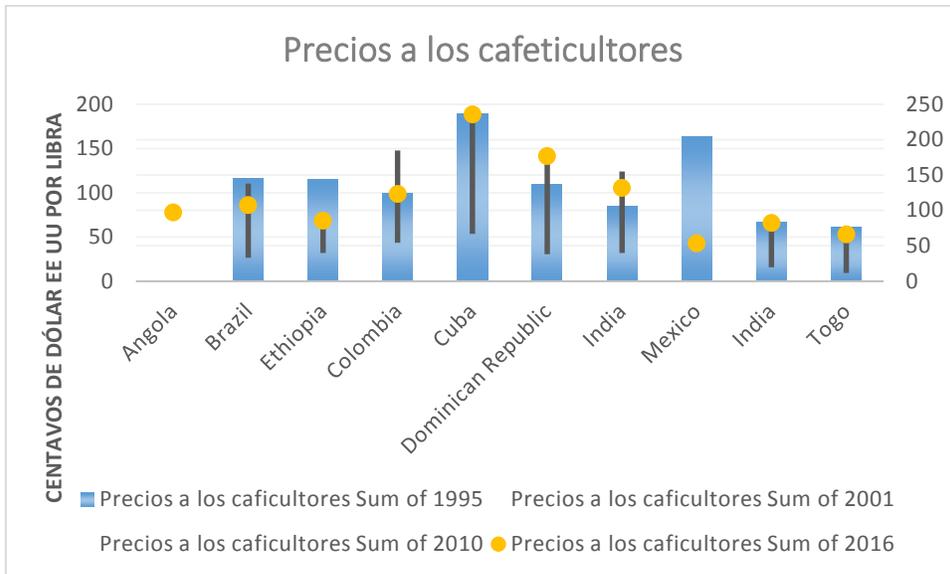


Figura 6 Precios a cafeticultores 1995/2016⁵

Como se acaba de mencionar y teniendo en cuenta este proyecto como estimación de inversión para una planta de café tostado, el agricultor se puede convertir en generador de zonas de trabajo, exportador e innovador debido a ese mayor ingreso de divisas.

Un ejemplo de visión a exportación, por primera vez en 67 años de historia de la NCDT's en Estados Unidos (National Coffee Drinking Trends), más de la mitad (59%) de las tasas de café consumidas diariamente ahora son clasificadas como gourmet, contra el 46 % en 2012. Siendo la bebida favorita del país, superando por 20% de puntos a la soda¹⁹.

ANTECEDENTES

En la actualidad muchas de las empresas en México, principalmente las pequeñas y medianas, aún no cuentan con los conocimientos ni la tecnología necesarias para fabricar productos de forma industrial, la mayoría de sus trabajos se limitan a lo artesanal y le confieren la habilidad para crear maquinaria, equipos y partes a los trabajadores, que si bien realizan labores excelentes de fabricación, esto se convierte en una limitante para poder incursionar en el mercado de la producción en serie de satisfactores ²⁰.

El tostador de café, objeto de estudio del presente trabajo cuenta con esta cualidad, es un producto que si bien ha funcionado de forma adecuada, no cuenta con un expediente tecnológico de definición, el equipo se hace de forma 100% artesanal y esto ha provocado problemas en cuanto a los tiempos de respuesta para con los clientes finales ²⁰.

En este documento de secado y tostado de café, se pretende efectuar el diseño, mediante la transferencia de tecnología y realizar la factibilidad de su aplicación comercial que puede ser obtenida a través de su simulación matemática.

JUSTIFICACIÓN

Se tuvo la iniciativa de investigar sobre el sector cafetalero, después de realizar una estancia en SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) y FAO se pudo observar que la cafecultura es una actividad importante para el desarrollo económico del país y además aporta un porcentaje alto de divisas que entran a México por la comercialización del grano en el extranjero.

Por otra parte, al revisar la literatura y los datos durante la estancia, se pudo observar la situación del campo mexicano, como se expuso anteriormente. Por tales motivos es necesaria la aplicación de nuevos mecanismos para la comercialización del café que mejoren el nivel económico del pequeño y mediano productor mexicano.

El café es un alimento que se presta para obtener una diversidad de productos y generar oportunidades de empleo a muchas personas, no sólo como productores, sino personal con carreras de licenciatura e ingenierías (contaduría, administración, leyes, ingeniería química, mecánica, eléctrica, industrial, entre otras).

Si bien el proceso existe como algo bien estudiado y hay amplia literatura que lo demuestra, se puede generar riqueza, valor, fuentes de trabajo, tecnología. si:

- Los pequeños procesadores, en lugar de vender en cereza vendieran pergamino o tostado.
- Los mismos procesadores cuidaran la calidad cumpliendo con normas nacionales y demás variables (homogeneidad, densidad, tamaño de grano, especie, etc.) que influyen en ella, para ser un café con claims (frases que hablan de cualidades positivas de un producto en el marco de una campaña publicitaria) como orgánico, bajo sombra, de altura, entre otros, que le permitan obtener un mayor ingreso.
- Explotaran tecnologías de proceso para disminuir tiempos y costos.

Una parte de la estrategia para incrementar el valor del café producido en el país consiste en implementar la tecnología presentada aquí, la cual describe el equipo de lecho fluidizado, que se muestra como alternativa al proceso de secado y tostado de café en un solo equipo, mejorando la situación económica del pequeño cafecultor al proporcionar un grano con características óptimas para su almacenamiento o como producto terminado de acuerdo a un tostado deseado.

Debido a uno de los descuidos por parte de los agricultores mexicanos como el no comprar fertilizantes sintéticos o pesticidas, que aumenta la producción y explotan el suelo y es dejado crecer entre a árboles de todo tipo (frutales, coníferas, entre otros) en los bosques y selvas de las montañas, ese café es considerado como orgánico, cultivo de sombra y altura; claims que deben ser aprovechados para que

el café mexicano no esté regido por los precios de la bolsa de Nueva York y ser vendido con un mejor margen de ganancia. Además de observar mercados objetivo como lo reporta el estudio de la Asociación Nacional del Café (NCA's) 2016, "National Coffee Drinking Trends" donde ²¹:

- El consumo diario de bebidas a base de expreso casi se ha triplicado desde 2008.
- Entre 2008 y 2016, el consumo de bebidas gourmet de café en los últimos días aumentó del 13% al 36% entre los 18-24 años y del 19% al 41% entre los 25-39 años.
- En el caso de las bebidas a base de expreso, los saltos se vuelven del 9% al 22% para el grupo de edad de 18-24 años y del 8% al 29% para los de 25-39 años.

Para conocer las diferencias de los certificados de sustentabilidad verificar Giovannucci (2001).

Como observación, de acuerdo a un estudio del Centro internacional para la agricultura tropical (International Center for Tropical Agriculture, o CIAT) en su programa de cambio climático, agricultura y seguridad alimentaria, argumentan que la producción de café arábica debe sembrarse en terreno alto para sobrevivir los efectos que se proyectan para el 2050, asegurando la inminente pérdida de los mayores productores, Brasil, Vietnam, Indonesia y Colombia, si no toman precauciones de adaptación ²³.

OBJETIVOS

Proponer un diseño de un equipo de secado y tostado en lecho fluidizado (spouted-bed) como base económica en un proyecto de investigación de transferencia de tecnología.

Objetivos específicos

- Diseñar proceso de secado y torrefacción en spouted-bed
- Estimar un presupuesto de inversión
- Enfatizar la necesidad de estandarizar la calidad de la materia prima y del proceso para que este proyecto sirva como guía para acrecentar su valor.

HIPÓTESIS

Dentro del mercado del café, se utiliza una variedad de equipos de secado y tostado, donde cada uno tiene sus ventajas y desventajas. Debido a que las condiciones deseadas son una alta homogeneidad en producto, tiempo de procesamiento y costos menores, este trabajo se enfoca en el equipo spouted-bed, el cual tendría un efecto muy significativo para cumplir con esas características.

ALCANCE Y LIMITACIONES

1. Como limitante es la información referida a la producción agroindustrial de café, debido a la falta del registro de condiciones de operación y diseño de equipo.
2. El estudio de caso es aplicado a pequeños y medianos cafecultores
3. Se estudia el tema de fluidización específicamente spouted-bed, para conocer su funcionamiento y oportunidades en el ámbito cafetalero. Cabe mencionar que este estudio es meramente teórico y no contempla resultados de la implementación del mismo.

Contribución del proyecto

La contribución que aporta este trabajo de tesis, es la aplicación del lecho fluidizado spouted-bed como equipo para secar y tostar café.

Además, la investigación documental sobre la cafecultura mexicana y su relación con claims, que dan pauta para una revisión de los objetivos de los pequeños y medianos productores, ofreciéndoles oportunidades de crecimiento, poniendo énfasis en la calidad de los granos y proceso para obtener un producto terminado.

Con dicha propuesta se busca eliminar aquellos intermediarios que acaparan recursos que los cafecultores reinvertirán en su proceso, y sobre todo en su educación para seguir ofreciendo un café de calidad a precio justo.

DESARROLLO DE EQUIPO DE PROCESO

Para desarrollar la metodología de investigación se emplea un enfoque cualitativo, el cual se complementa con datos estadísticos obtenidos mediante bases de datos, reportes, revistas, páginas web y libros. Esto debido a que no se desea hacer un diseño riguroso del equipo, sino una aproximación, debido a que el proceso es complejo en sí, a causa de variables en las propiedades del sólido, las condiciones de operación, el diseño del equipo y las cualidades deseadas del producto ^{24(chaps1-3),25,26(chap1-4.8.9.11)}

Secado

Es raro que el café sea beneficiado inmediatamente después de ser cosechado, por lo que es necesario conservarlo para posteriormente, de acuerdo a las necesidades del proceso, se pueda tostar.

La conservación del mismo tiene por objetivo preservarlo de las inclemencias del tiempo o estragos por insectos, roedores y microorganismos. Siendo cosechado el café con un contenido de humedad del 60% se debe disminuir a un 12% con el fin que no sufra ningún deterioro o merme su calidad, ²⁷.

El proceso de secado es una operación cuya meta es reducir la cantidad de humedad en los productos, para garantizar su almacenamiento y siendo posible utilizarlos posteriormente sin amenazar sus componentes y valor nutricional ^{15,28}. Además de la influencia del secado en la calidad del proceso, influye en otros sectores de los alimentos debido al incremento de la vida de anaquel del producto, reducir el costo del empaque, disminuir los pesos de envío y cuidados ambientales, pues se desea cumplir con propiedades distintivas, llevando a cabo un proceso de manera consiente y cuidadosa de cumplir con las expectativas del consumidor en estas áreas ²⁹. El lograr una mejor operación de secado es propulsora de investigaciones y creadora de tecnología.

Referente a la seguridad alimentaria, el secado es una etapa delicada del proceso del café ya que si no se lleva a cabo adecuadamente puede afectar hasta la seguridad microbiológica. Pues muchos estudios han reportado Ocratoxina A (OTA), una micotoxina que contamina el alimento durante el secado, comúnmente cuando es dejado al sol debido a que tiene contacto con el suelo en condiciones de humedad alta.³⁰ La conservación del producto a través del secado se basa en el hecho de que los microorganismos o enzimas y todos los mecanismos metabólicos, necesitan agua para sus actividades. Reducir el agua disponible a un porcentaje de humedad seguro para su almacenamiento generará que la actividad del agua, las reacciones químicas y el desarrollo de microorganismos se ralenticen ³¹.

Métodos de secado

Cuando se está diseñando un proceso de deshidratación dos importantes preguntas se deben tener en cuenta: ²⁹

1. Los atributos de calidad esperados del producto
2. La forma en que utilizará el producto.

El proceso de café como se ha expresado se hace de manera natural (colocándolo al sol) o de manera artificial en la que se introduce aire, el cual es previamente calentado mediante algún sistema de intercambio de energía y posteriormente ponerlo en contacto del lecho fijo del café húmedo a presión atmosférica. La única variable para la calidad del producto es el tiempo de secado, pues de todos los equipos que existen lo importante es la manera en que tiene contacto el producto con el aire y la manera en que se transfiere la energía ²⁹ por lo que la mayor desventaja de estos es la falta de uniformidad en el deshidratado. El tiempo de secado de las diferentes maquinarias varía entre 20-60 horas ⁴. Los equipos más utilizados son:

Secador	Ventaja	Desventaja
Estático	Pocas partes móviles en la que sólo se necesita el quemador por debajo de un plato perforado usando combustible sólido*. Inversión mínima de capital	Falta de control de temperatura, riesgo de incendio y una constante supervisión y un rastrillado manual
Estático con rastrillado automático	Un rastrillo continuamente mueve las bayas de café mientras aire caliente asciende entre los orificios.	Falta de control de temperatura.
Tambor giratorio	Comúnmente usado para café pergamino y su fácil uso lo posiciona como el ampliamente recomendado.	Baja eficiencia térmica por una falta de recirculación de gases de combustión.
Tipo Silo	Utiliza varios compartimientos en los que se procesa de manera continua grandes cantidades de producto. ^{32,33} .	Teniendo un tiempo de operación de 20 a 25 horas y en general se presenta una desuniformidad en el contenido de humedad final del grano, hasta 4% entre experimentos, cuando el flujo de aire solo incide en una cara del grano durante el proceso ^{32,33} .
Fluidizado	Hay una gran variedad de equipos siendo por sus características idóneos para cada partícula a secar, en general tienen una buena difusión del calor.	Comúnmente se necesita de una inversión mayor

*madera, cáscaras de café, entre otros.

Debido a que lo buscado es un proceso con condiciones suficientes para proporcionar un producto homogéneo, el proceso de lecho fluidizado fue seleccionado.

Sistema aire-sólido

Los sistemas donde se tiene contacto aire-sólido, en partículas, granos o polvo han sido empleados en la industria por casi un siglo ³⁴. Los sólidos o polvos, de tamaños similares se comportan como un líquido cuando se encuentran contenidos en un recipiente, cuya forma adoptan, mas no ocupan la totalidad de su volumen ³⁴. Cuando un fluido, ya sea un líquido o un gas, se hace pasar a través del lecho, estas partículas se mantienen estáticas a bajas velocidades. Esto se llama lecho empacado o fijo. Pero si se comenzara a aumentar la velocidad del fluido a través del lecho, las partículas comenzarán a separarse y alejarse una de otra, se dice que el lecho se expande. Al seguir incrementando la velocidad se llega a un punto en que la fuerza de arrastre proporcionada por el fluido se iguala al peso neto de la partícula. Las partículas están ahora suspendidas en la corriente ascendente de fluido. Este es el punto de mínima fluidización o inicio de la fluidización ³⁵.

A velocidades en exceso de la requerida para mínima fluidización uno de dos fenómenos comúnmente puede ocurrir. Primero el lecho podría continuar expandiéndose de manera uniforme entre los espacios de sus partículas. Esto es conocido como fluidización particular u homogénea, y de continuar su incremento, el lecho podría generar burbujas cada vez más grandes hasta tener un comportamiento errático. Existen tres patrones de flujo a dos fases y siete patrones de fluidización, ver Figura 7 Fluidización particular u homogénea (Carlos Álvarez Maciel, 2004)³⁵.

Otra similitud con los líquidos es la de mantener un nivel horizontal pero irregular en el recipiente además de presentar un gradiente de presión hidrostática a lo largo de una columna de partículas, proporcional a la densidad de las mismas y a la altura de la columna; por estas semejanzas se afirma que las partículas sólidas pueden fluir como un líquido si se les arrastra mediante una columna de gas o de líquido ³⁴.

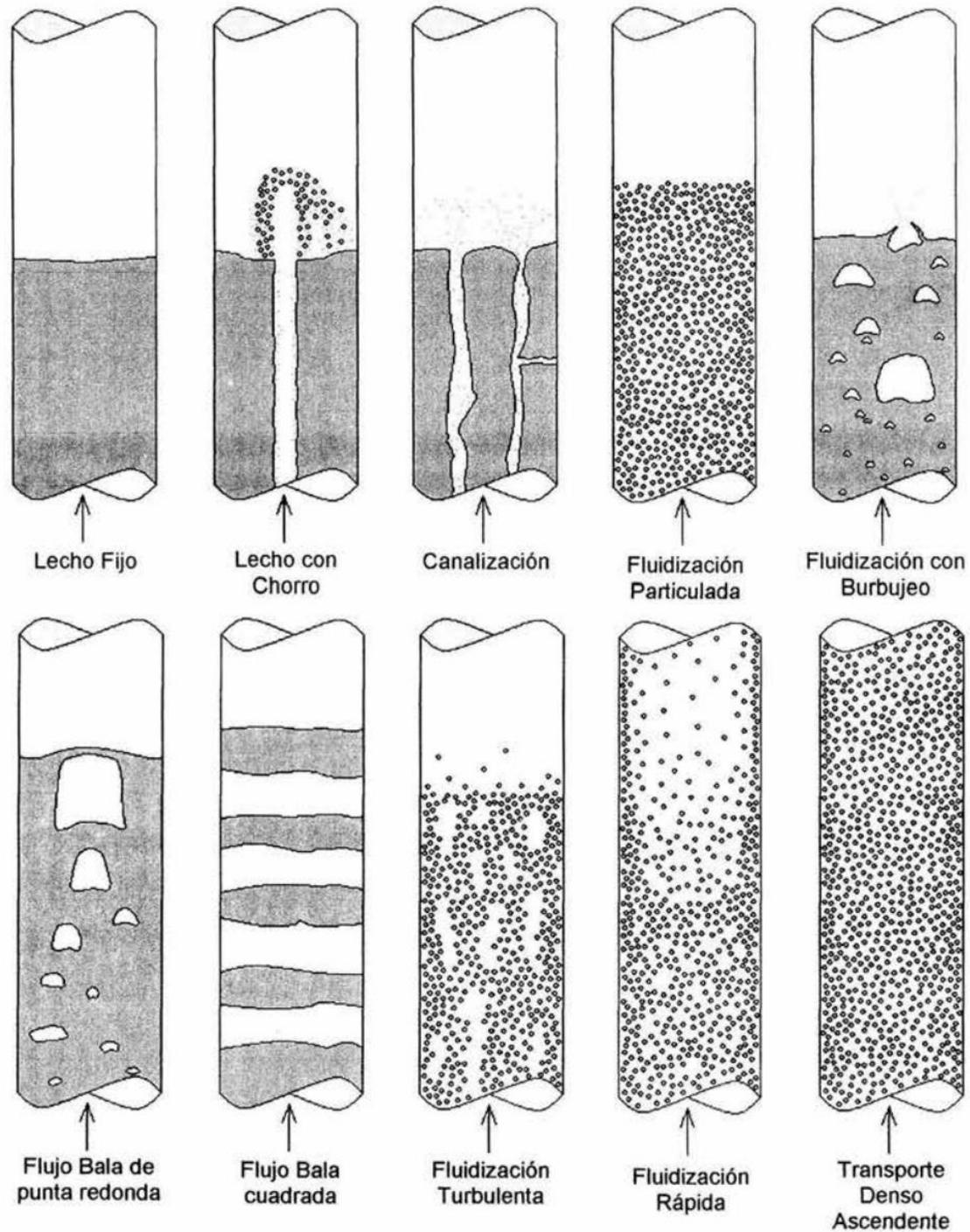


Figura 7 Fluidización particular u homogénea (Carlos Álvarez Maciel, 2004)

Hoy en día, no se ha llegado a un modelo general aplicable a todos los sistemas de flujo, pues los desarrollados son empleados para ciertos tipos de flujo y para determinadas condiciones de operación ³⁴.

Para ahondar en las características de cada patrón de flujo el lector puede ver la siguiente bibliografía ^{24,34,36}.

Clasificación de las partículas

Geldart tras observar los distintos patrones de flujo presentes en los lechos de partículas, sobre los que fluye un gas, los agrupó en cuatro grupos, clasificándolos con dos criterios principalmente, la diferencia de densidades entre el fluido y el sólido, y el diámetro de partícula. Los grupos Geldart en orden creciente de tamaño de partícula son los siguientes ^{34,36(chap2.3.8.11)}:

- Grupo C Cohesivas, o polvos muy finos. Es extremadamente difícil de fluidizar este tipo de partículas debido a la gran atracción existente entre ellas, resultado de las cargas electrostáticas, la humedad o de sólidos pequeños unidos mediante fuerzas de van der Waals. Tienen un diámetro alrededor de los 20 μm ; como ejemplo están el almidón, azúcar glass, harinas y cemento.
- Grupo A Son partículas aireables, con diámetros pequeños que van de 30 a 100 μm y/o con baja densidad ($< \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$). Estos sólidos son fáciles de fluidizar con un suave movimiento a velocidades bajas de gas; principalmente se tiene a los catalizadores utilizados para el cracking como ejemplo.
- Grupo B Son partículas arenosas con tamaños de $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$ y densidades de $1.4 < \rho_s < 4 \text{ g/cm}^3$. Estos sólidos fluidizan bien con un burbujeo vigoroso. Estas burbujas se unen entre sí (coalescen) al ascender, incrementando su tamaño, y explotan al llegar a la superficie del lecho. No existe un máximo en el tamaño de las burbujas, el cual es independiente del diámetro de partícula. En lechos poco profundos, el gas puede ser inyectado a chorro, sin presentar un colapso en la interfase gas-sólido. Se tiene como ejemplo la sal de mesa y la arena.
- Grupo D Partículas grandes y/o densas. Lechos grandes de estos sólidos son difíciles de fluidizar pues su comportamiento es errático, dando un comportamiento con grandes burbujas que explotan de forma no predecible como en las partículas A y B, o haciendo canales a través del lecho como el caso C, o provocando borboteos si la distribución de gas es desigual. De esta manera la inyección de un chorro de gas es el mecanismo más adecuado para fluidizarlas. Poseen diámetros de partículas mayores a 1mm como por ejemplo en los chícharos, granos de café, arroz, trigo, carbón mineral, etc.

La clasificación de Geldart es clara y fácil de usar pues las clasifica de acuerdo a su tipo de fluidización por lo que sólo hace falta conocer las densidades del sólido y el fluido, además del diámetro de partícula. Esto debido a que autores anteriores sólo proponían categorías arbitrarias o basadas exclusivamente en la aparición de las burbujas, distinguiendo solamente dos tipos de fluidización.

Lecho con Chorro (Spouted-bed o Spouting)

Este patrón de fluidización ocurre cuando una corriente de gas es inyectada verticalmente a una alta velocidad a través de una pequeña abertura u orificio en la parte inferior del lecho. Este chorro de gas penetra en el lecho, arrastrando con ello algunas partículas hacia arriba, y formando así una región tubular de flujo diluido. Al llegar estas partículas arrastradas a la superficie del lecho, ascienden y luego descienden en un movimiento parabólico, conformando de esta manera una fuente de partículas, las cuales caen sobre la porción del lecho conocida como región anular, localizada entre la pared y el chorro de gas. Las partículas de la región anular se mueven hacia abajo y recirculan hacia el chorro de gas, constituyendo un patrón circular de flujo de sólidos. El mezclamiento de las partículas es más regular y cíclico respecto al existente en otros patrones de fluidización, debido a que es axialmente inducido por el flujo de gas a chorro ³⁴.

Se presenta a velocidades superficiales de gas mayores a la velocidad de chorro mínima, típicamente con partículas del grupo D, pero también puede darse con partículas del grupo B en lechos poco profundos (shallow beds).

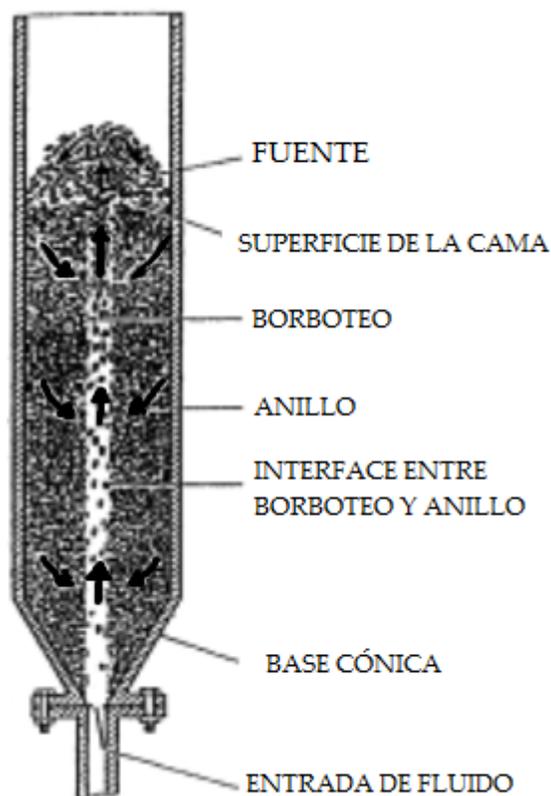


Figura 8 Diagrama esquemático de una spouted-bed. Las flechas indican el movimiento del sólido (Epstein, N., Grace, 2010)

Lo que el secador de la Figura 8 Diagrama esquemático de una spouted-bed. Las flechas indican el movimiento del sólido (Epstein, N., Grace, 2010) ofrece como alternativa es un contenido de humedad más uniforme, reducir el tiempo y una temperatura homogénea en todo el proceso, debido a una buena difusión de calor por su buena interacción aire-partícula, lo que genera una calidad uniforme. Aunado a esto es usado por diversas industrias debido a su larga capacidad, fácil operación y control de proceso ^{25,36}.

Sobre las desventajas de este equipo: entre el tamaño de partícula sea menor, mayor es la potencia requerida para el compresor y una menor eficiencia. Además, las paredes se erosionan por el contacto continuo de partículas, entre otras (Oluleye, A. E. and Ogungbemi, A. A. and Anyaeche & Ibadan, 2012)

Como se mencionó anteriormente, es idóneo para el proceso del café de acuerdo a las propiedades de las semillas, pero el diseñarlo es un tema específico y generalmente empírico, por lo que en el presente trabajo se sugiere una metodología de diseño y estimación de inversión para un equipo piloto.

Cabe denotar que no se está realizando una invención, debido a que es una tecnología ya existente y podemos citar algunas patentes, US5958494, US8679561, US20090304886, que servirán únicamente como guía visual y consideración de equipo necesario.

Predicción de patrón o régimen de flujo

Desde el siglo pasado diversos mapas de patrones de flujo han sido desarrollados, algunos típicos para sistemas especializados y otros cualitativos con aplicaciones industriales. En una investigación desarrollada por el Ingeniero Carlos Maciel se generó la siguiente Figura 9 Mapa de patrones generalizado para flujo vertical ascendente en sistemas gas-sólido (Carlos Álvarez Maciel, 2004), el cual está basado en el diagrama generalizado de Grace con modificaciones semiempíricas. Este mapa utiliza la velocidad superficial de la fase gaseosa debido a que la fluidización de las partículas depende exclusivamente de la velocidad del gas, por lo cual no se requiere conocer la cantidad de partículas presentes en la tubería vertical. De esta manera, el mapa generalizado de patrones de flujo vertical ascendente muestra la velocidad superficial de gas necesaria para desarrollar a cada patrón de fluidización en el interior del equipo ³⁴.

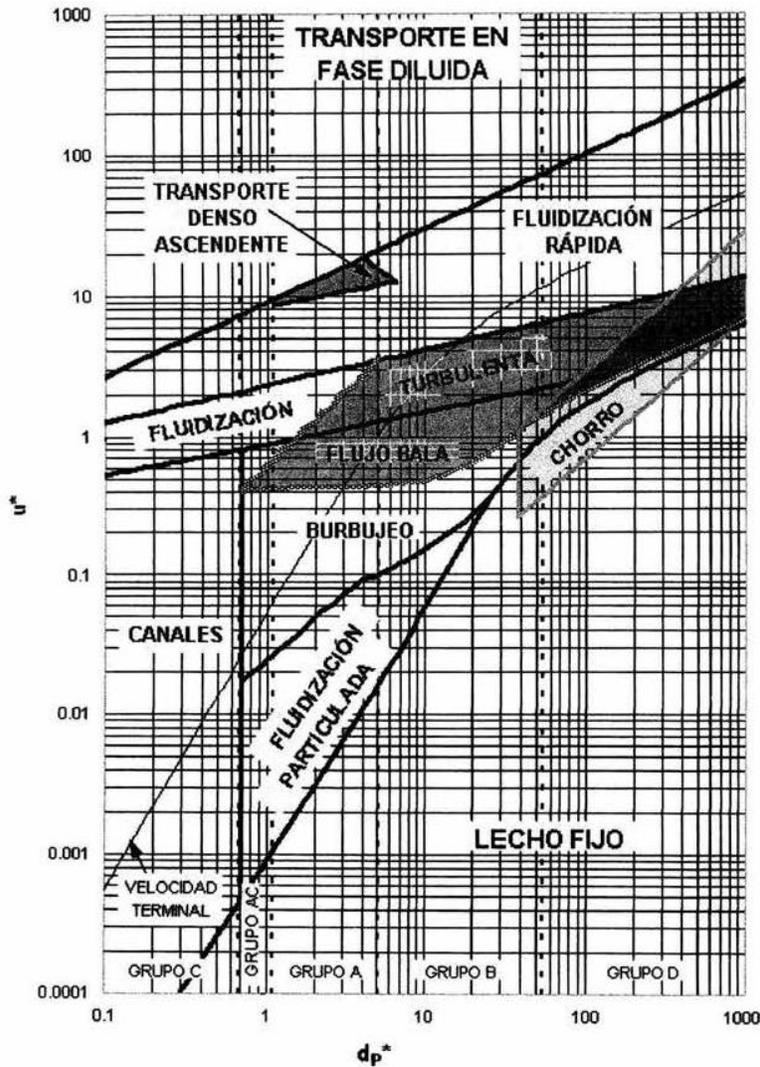


Figura 9 Mapa de patrones generalizado para flujo vertical ascendente en sistemas gas-sólido (Carlos Álvarez Maciel, 2004)

Se eligió este gráfico debido a que se basó en el estudio de Reh, quién elaboró la gráfica de los puntos de operación industrial de los diferentes equipos de manejo de mezclas gas-sólido. En otras palabras, tomó las áreas de operación de acuerdo a la experiencia. Las fronteras entre patrones no son líneas sino regiones de transición gradual ³⁴.

Parámetros y condiciones de proceso

El secado comprende una etapa húmeda, desde los 60 a 30% de humedad y una etapa higroscópica por debajo del 30% ^{26(pp19-22)}. Se podría secar a temperaturas menores a los 49 (temperatura recomendada para no devaluar la calidad del producto) pero según un estudio hecho en la Universidad Nacional de Colombia, simplemente se alarga el tiempo de proceso al usar una temperatura menor, pero

en cualquier caso se obtiene un producto de calidad con buenas características organolépticas ³³.

El método ocupado y analizado en el presente trabajo es cuando se usa aire caliente como el medio de calentamiento ²⁹ aunque también existe la radiación infrarroja ²⁹ y el calentamiento dieléctrico (micro ondas o radio frecuencias)

Metodología

La extracción de tecnología puede cumplir con fines distintos, por ejemplo, cumplir con un fin industrial y comercial, llevar a cabo un proceso de enseñanza – aprendizaje o evolucionar el diseño de un satisfactor. Esta metodología tiene su principal aplicación en la satisfacción de una necesidad que en general padece la pequeña y mediana empresa mexicana, consiste en la carencia de tecnología para la industrialización de productos. Siempre que los equipos o máquinas cubren las necesidades mínimas a satisfacer o para las cuales fueron hechos, tendrán buena aceptación en el mercado, pero si agregamos aquel plus a nuestro producto, que lo haga ser mejor que los de nuestros competidores, estaremos por encima de ellos en cuanto a ventas y aceptación en el actual mercado, muy competitivo y muy cambiante. ²⁰.

Se comenzó por investigar el funcionamiento de un lecho fluidizado spouted-bed principalmente en base a la metodología propuesta por Kunii-Levenspiel et al. ^{3,24,25,34–36} los cuales son una fuente extensa sobre el tema.

Las principales simplificaciones que se realizaron pueden resumirse en:

- Temperatura de operación dentro del lecho se puede considerar uniforme, el medio fluidizante y a la salida del mismo están en equilibrio térmico y químico.
- Partículas esféricas, de igual tamaño, homogéneas y bien mezcladas en el lecho fluidizado.
- No hay cambio de las condiciones de operación y propiedades del sólido a lo largo del proceso.
- Para el proceso del cálculo de energía se usó un modelo basado en la Ley de Enfriamiento de Newton para la transferencia de energía por convección, asumiendo que durante las condiciones en la operación de secado son isotérmicas y la transferencia de humedad ocurre estrictamente en la superficie del producto.

CONJUNTO DE DATOS UTILIZADOS

Se utilizaron datos recopilados de distintas tesis^{15,20,33,34,37}, libros sobre procesos de separación y de transferencia de masa^{24,35,36,38}, libros especializados en café de los años comprendidos entre 1990 hasta 2017^{11,39,40(chap1.3-6)} (usados como parámetros de diseño en este trabajo), su origen es presentado en la siguiente Tabla 2 *Propiedades del sistema*. Se usó el programa computacional Microsoft Excel como principal herramienta para el diseño de equipo.

Tabla 2 *Propiedades del sistema de secado*^{4,32,33,41,42}

Sólido		Fluido en secado		Líquido	
ρ_s partícula(kg/m ³)	1300	ρ_f (kg/m ³)	0.7461	λ_{vap} (BTU/kg)	2139.23
$dp(m)$	0.006	μ (Kg/m*s)	2.49E-05		
ϕ	0.75	T (K)	473		
ρ_{bulk}	420	C_p (J/kg*K)	1022.995		
θ_{rep}	24.8	$\gamma =$	1.4		
		p_0	74660.5		

Cálculo de parámetros de diseño spouted-bed

Diseño Hidrodinámico

En este primer apartado se muestra la metodología de cálculo, y posteriormente se realizó su aplicación numérica.

- Primero determinamos que nuestra partícula se encuentra en la zona D del diagrama Geldart:
 - $(\rho_s - \rho_f) d_p^2 > 15.3 \text{ Pa}$ (1)

2. Se ubica en la siguiente

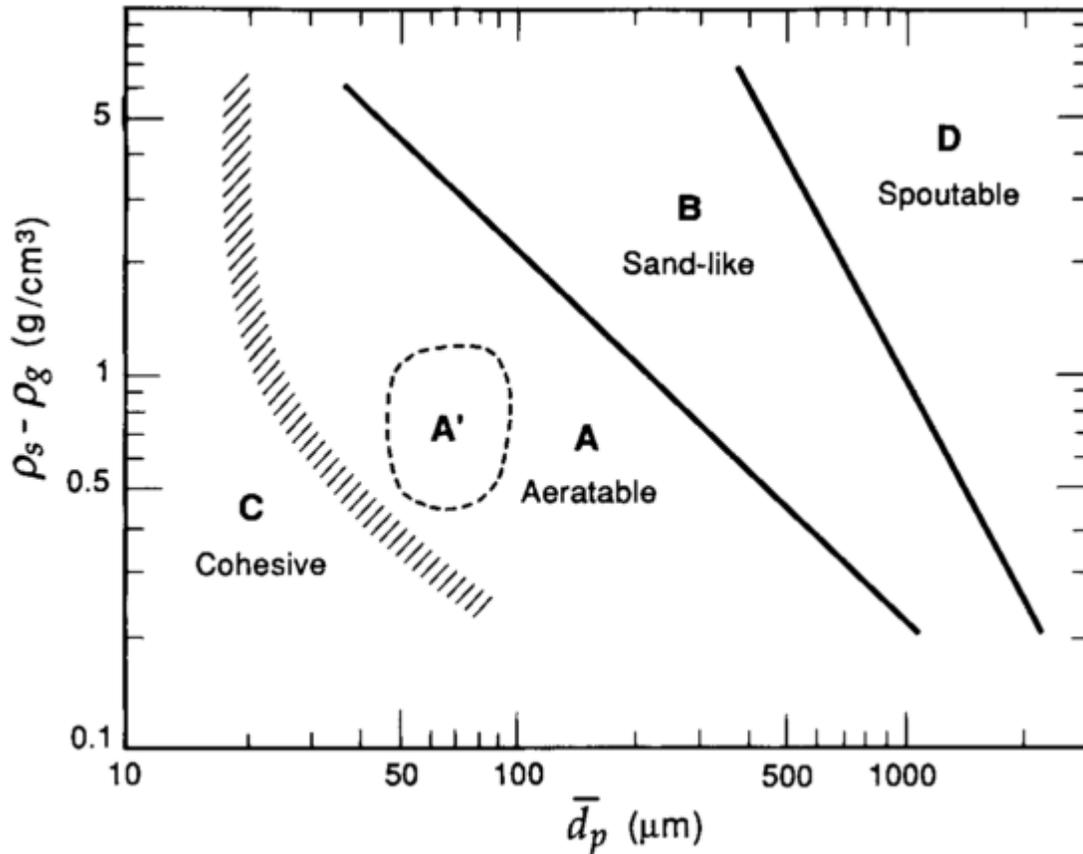


Figura 10 Mapa de clasificación partículas Geldart (Kunii & Levenspiel, 1991)

3. Cálculo del número de Arquímedes o Galileo:

$$Ar = Ga = \frac{\rho_f (\rho_s - \rho_f) d_p^3 g}{\mu^2} \quad (2)$$

4. De acuerdo con el diámetro de partícula d_p y la relación para generar un spouted-bed estable, se determina el diámetro de entrada, D_i , del lecho:

$$D_i = 25 d_p \quad (3)$$

5. Y el diámetro del lecho:

$$D_{bed} = \frac{25 d_p}{\varepsilon_{mf}^{n/2}} \quad (4)$$

6. Cálculo del área transversal de entrada al equipo:

$$A_t = \frac{\pi D_i^2}{4} = \pi r^2 \quad (5)$$

7. Cálculo del término gravitacional:

$$\Omega = g(\rho_s - \rho_f) \quad (6)$$

8. Determinación del exponente n de Richardson-Zaki que es una forma de asegurarnos que los diámetros están en concordancia para generar un sistema por borboteo estable:

$$\frac{4.8 - n}{n - 2.4} = 0.047 Ar^{0.57} \quad (7)$$

9. Con todos los datos anteriores se calcula la fracción de espacios vacíos:

$$\varepsilon_{mf} = 0.586 \phi_s^{-0.72} \left[\frac{\mu^2}{\rho_f \Omega d_p^3} \right]^{0.029} \left(\frac{\rho_f}{\rho_s} \right)^{0.021} \quad (8)$$

10. Determinar la velocidad mínima de fluidización en términos de Reynolds para partículas grandes. La cual ocurre cuando la fuerza de arrastre ascendente del gas se iguala con el peso de las partículas, produciendo que éstas floten en el aire circundante:

$$Re_{mf} = \frac{d_p \rho_f u_{mf}}{\mu} = [28.7^2 0.0494 Ar]^{0.5} - 28.7 \quad (9)$$

11. Para determinar el tipo de fluidización de gases con transporte de partículas se usan las siguientes coordenadas:

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} = Ar^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

12. Se busca en la Figura 9 Mapa de patrones generalizado para flujo vertical ascendente en sistemas gas-sólido (Carlos Álvarez Maciel, 2004) para todo el rango de contacto gas-sólido, con el fin de colocar el proceso en el área deseada del spouted-bed. Primero se obtiene d_p^* (10) y posteriormente se debe seleccionar la velocidad u^* tal que se encuentre gráficamente dentro del intervalo.

13. Posteriormente se usa la siguiente ecuación para determinar la velocidad de operación a partir de la velocidad adimensional obtenida con el diagrama:

$$u_m = u_m^* \left(\frac{\mu (\rho_s - \rho_f) g}{\rho_f^2} \right)^{1/3} \quad (11)$$

14. Se define el parámetro b que funciona como rango amortiguador, a fin de controlar con mayor facilidad el proceso:

$$b = u_m / u_{mf} \quad (12)$$

15. Se obtiene la altura del equipo de acuerdo a la máxima altura que puede alcanzar una partícula impulsada a través de la columna central de aire, provocando que las partículas se separen entre ellas y sean proyectadas ascendentemente para formar una fuente:

$$L_{max} = \left(\frac{D_{bed}^2}{d_p} \right) \left(\frac{D_{bed}}{D_i} \right)^{2/3} \frac{568}{Ga} (b)^2 \left(\sqrt{1 + 35.9 \times 10^{-6} Ar} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

16. Una manera de calcular la caída de presión a través de la cama, es según el autor Ogino ²⁴.

$$\frac{-\Delta P_b}{(1 - \varepsilon_{mf}) \Omega L_{max}} = 1.15 \left(\frac{L_{max}}{D_{bed}} \right)^{1/2} \left(\frac{D_i}{D_{bed}} \right)^{1/3} \quad (14)$$

17. Para el cálculo del volumen de sólidos, se elige una altura menor a la altura máxima de fluidización, que permita la formación de la fuente, la cual distribuye radialmente el producto. Esto, es un parámetro libre de diseño, por lo que se eligió $L_m = 1/3 L_{max}$

$$V_{bed} = \frac{\pi}{4} (D_{bed}^2 - D_i^2) \left(L_m - \frac{D_{bed}}{2} \right) + \frac{\pi}{12} (D_{bed}^2 - D_i^2) \left(\frac{D_{bed}}{2} \right) + \frac{\pi}{12} (D_{bed}^2 - D_i^2) \left(\frac{D_{bed}}{2} \tan \theta_{rep} \right) \quad (15)$$

18. Con base a lo anterior se calcula la masa del lecho:

$$m_{bed} = (1 - \varepsilon_{mf}) \rho_s V_{bed} = \rho_{bulk} V_{bed} \quad (16)$$

Cálculo energético

19. Para determinar la cantidad de energía Q que es suministrado a los granos de café, puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$Q = \alpha A_p (T_f - T_s) \quad (17)$$

20. Para el cálculo de la energía necesaria para evaporar agua es usando el contenido de humedad que ha sido evaporado, suponiendo que pasa del 50% al 12% (b.h. = base húmeda) la cual es transformada a base seca por conveniencia:

$$\%X_{bs} = \frac{\%X_{bh}}{100 - \%X_{bh}} 100 \quad (18)$$

21. Posteriormente la diferencia entre humedades es multiplicada por la cantidad de masa de sólido, resultando en la cantidad de humedad transferida.

22. Por último, se calcula el calor debido al cambio de fase:

$$q = m_{bed} \%X_{bs} \lambda_{vap} \quad (19)$$

23. Siendo la cantidad de energía suministrada por el intercambiador de calor al aire:

$$q = m_f C_{p_f} \Delta T \quad (20)$$

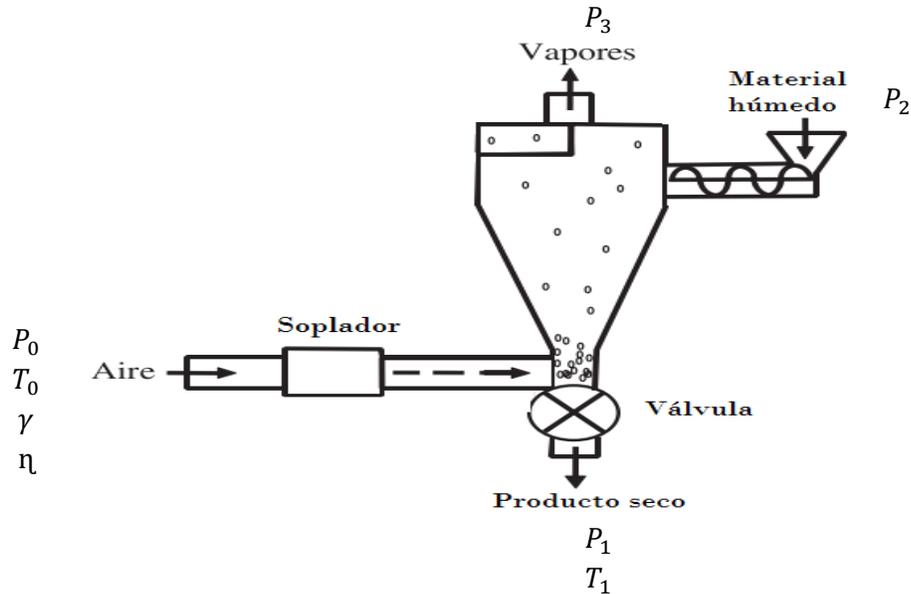
Por lo que las magnitudes de estas energías deben ser de igual o parecida proporción suponiendo que está debidamente aislado el proceso, cumpliendo que la energía proporcionada por el intercambiador será la misma que es captada por los granos para su proceso de secado.

Cálculo del requerimiento energético del soplador

24. Cálculo del soplador para generar un lecho fluidizado a presión atmosférica:

$$P_2 - P_1 = \Delta P_b + \Delta P_d \quad (21)$$

Donde ΔP_b , es la caída de presión a través de la cama, ecuación (14) y ΔP_d la caída de presión a través del distribuidor de placa perforada, por diseño es un 40% (máximo) de ΔP_b ²⁴. Lo que nos informa de la caída de presión a través del equipo.



25. Por lo que la potencia de este soplador es dada por la ecuación:

$$-\dot{\omega}_{s.\text{ideal}} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_0 V_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\gamma-1/\gamma} - 1 \right] \quad (22)$$

$$-\dot{\omega}_{s.\text{actual}} = \frac{-\dot{\omega}_{s.\text{ideal}}}{\eta} \quad (23)$$

Ejemplo de cálculo

Los siguientes datos son números típicos de café verde arábica en condiciones ambientales de la Ciudad de México, usados para ejemplificar el presente proyecto ^{4,24,39}.

Obtener dimensiones, caída de presión a través del lecho, al igual que el patrón de flujo presente en el equipo empleado para fluidizar granos de café verde con aire, La densidad de los granos es de 1300 kg/m^3 , la esfericidad de 0.75 y su diámetro individual es de 6 mm. La densidad del aire es de 1.111 kg/m^3 y viscosidad de $1.9117 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^2\text{s}$ a 50°C .

1.- Visualización del equipo:

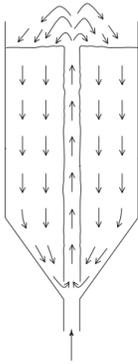
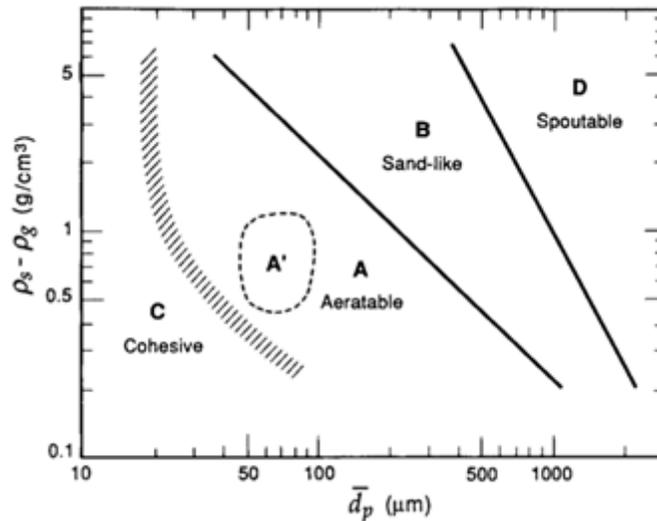


Figura 11 Ejemplo de diseño de spouted-bed

$$1) (1300\text{kg/m}^3 - 1.111\text{kg/m}^3)(0.006\text{m})(9.8\text{m/s}^2) = 76.37\text{ Pa lo cual cumple } > 15.3\text{ Pa}$$



Coordenadas $d_p = 6000\ \mu\text{m}$

$$\gamma((1300 - 1.111) = 138.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left| \frac{0.001\text{g}/\text{cm}^3}{1\text{kg}/\text{m}^3} \right| = 0.1386 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Nos encontramos en la zona "D"

2)

Figura 12 Mapa de clasificación partículas Geldart (Kunii & Levenspiel, 1991)

3) $D_i = 25 * 0.006\text{m} = 0.15\text{ m}$ lo que es una tubería de acero inoxidable de 6" (0.154 m) que es con el diámetro de entrada que trabajaremos

$$4) \Omega = 9.8\text{m/s}^2 * (1300\text{kg/m}^3 - 1.11\text{kg/m}^3) = 12,729\text{ kg/m}^2\text{s}^2$$

$$5) Ga = Ar = \frac{(1.111\text{kg/m}^3)(12129\text{kg/m}^2\text{s}^2)(0.006^3\text{m}^3)(9.8\text{m/s}^2)}{(1.9117 \times 10^{-5}\text{kg/ms})^2} = 8,358,483$$

$$6) \frac{4.8-n}{n-2.4} = 0.047 (8358483)^{0.57} \quad n=2.406$$

$$7) \varepsilon_{mf} = 0.586(0.75)^{-0.72} \left[\frac{(1.9117\text{kg/ms})^2}{1.111\text{kg/m}^3(12729\text{kg/m}^2\text{s}^2)(0.006^2\text{m}^2)} \right]^{0.029} \left(\frac{1.111\text{kg/m}^3}{1300\text{kg/m}^3} \right)^{0.021} =$$

0.491

$$8) D_{bed} = 25 * 0.006m / 0.491^{2.406/2} = 0.362m$$

$$9) \frac{0.006m * 1.111kg/m^3 * u_{mf}}{1.9117 * 10^{-5} kg/ms} = [28.7^2 + 0.0494 * 8,358,483]^{0.5} - 28.7; u_{mf} = 1.76m/s$$

$$10) Re_{mf} = \frac{0.006m(1.111kg/m^3)(1.76m/s)}{1.8537 * 10^{-5} kg/ms} = 614.52$$

$$11) d_p^* = 0.006m \left[\frac{1.1614kg/m^3(138.6kg/m^3)(9.8m/s)}{1.8537 * 10^{-5} kg/ms} \right]^{1/3} = 202.94$$

12) Verificamos en el diagrama *Figura 9 Mapa de patrones generalizado para flujo vertical ascendente en sistemas gas-sólido (Carlos Álvarez Maciel, 2004)* y concluimos que esa es la máxima velocidad para evitar el transporte de materia y nuestra velocidad de operación será $u_m^* = 3.5$ ya que el valor de u_t^* con d_p^* calculado esta aproximadamente entre los valores de 1.5 y 8

$$13) u_m = 4.6 \left[\frac{1.9117 * 10^{-5} kg/ms(12,729kg/m^2s^2)}{(1.111kg/m^3)^2} \right]^{1/3} = 2.03 m/s$$

$$14) b = \frac{2.03m/s}{1.73m/s} = 1.1558$$

$$15) L_{mf} = \left(\frac{0.3619^2 m^2}{0.006m} \right) \left(\frac{0.3619m}{0.154m} \right)^{2/3} \frac{568}{8358483} (1.15)^2 (\sqrt{1 + 35.9 * 10^{-6} * 8358483} - 1)^2 = 0.94 m$$

$$16) \frac{-\Delta P_M}{(1-0.49) * 12729kg/m^2s^2 * 0.94m} = 1.15 \left(\frac{0.94m}{0.3619m} \right)^{1/2} \left(\frac{0.154m}{0.3619m} \right)^{1/3} = 8439 Pa = 0.08329 atm$$

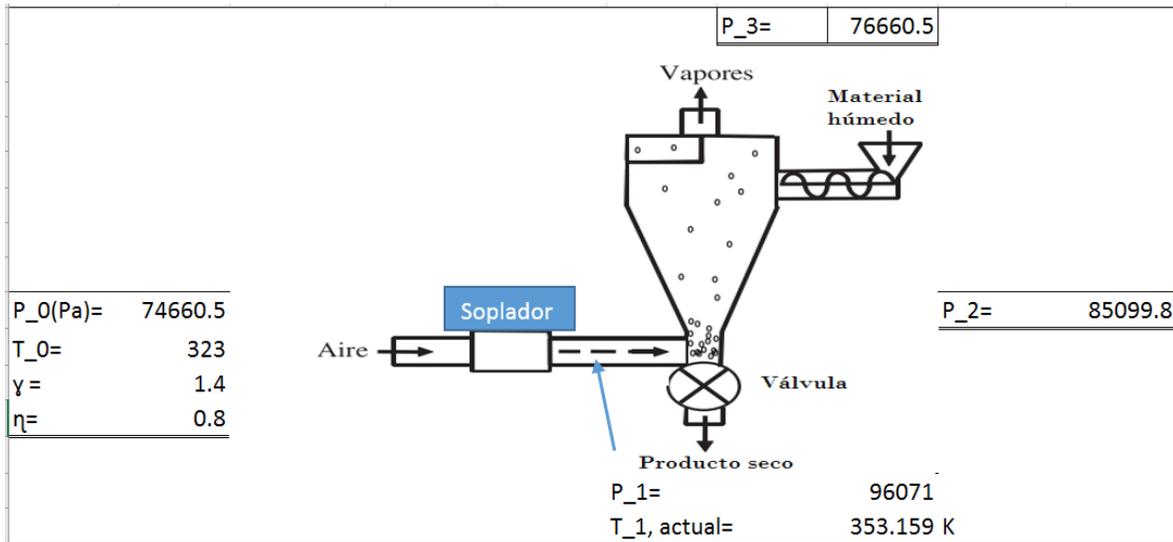
17) Siendo un excedente de 30% de la caída de presión del lecho $\Delta P_d = 1.3 * 8939 = 10971 Pa = 0.1082 atm$

18) Siendo $L_m = 0.33 * 0.94m = 0.31m$

$$19) V_{bed} = \frac{\pi}{4} (0.3619^2 m - 0.154^2 m) \left(0.31m - \frac{0.3619m}{2} \right) + \frac{\pi}{12} (0.3619^2 m - 0.154^2 m) \left(\frac{0.3619m}{2} \right) + \frac{\pi}{12} (0.3619^2 m - 0.154^2 m) \left(\frac{0.3619m}{2} \tan 24.8^\circ \right) = 0.1615m^3$$

20) Usando el dato teórico de densidad de bulto: $masa = 420 * 0.1615 = 6.78$ y con $masa = (1 - 0.4914) * 1300kg/m^3 * 0.01615m^3 = 10.67Kg$ por lo que tomando el promedio es una $masa = 8.72 Kg$

21) Cálculo de presiones



$$22) -\dot{\omega}_{s, \text{ideal}} = \frac{1.4}{1.4-1} 77995 \text{ Pa} * 2.03 \text{ m/s} * \frac{\pi}{4} * 0.154 \left[\left(\frac{96071 \text{ Pa}}{74660.5 \text{ Pa}} \right)^{1.4-1/1.4} - 1 \right] =$$

740.6 Watts

$$23) -\dot{\omega}_{s, \text{actual}} = \frac{740.6 \text{ W}}{0.8} = 925.77 \text{ Watts}$$

Tostado

La finalidad de producir café tostado es venderlo a un precio tal que sea más rentable que venderlo en pergamino o cereza, es decir, darle valor agregado. Para que el café adquiera su sabor característico es necesario someterlo a la operación de tostado, tueste o torrefacción. El proceso de tostado, es la etapa donde todos sus colores, aromas y sabores se desarrollan para generar la bebida con características deseadas ⁴³. Es muy importante que dicha operación se realice de la manera correcta. Si el grano no es tostado a la temperatura adecuada o bien no se tuesta durante el tiempo necesario, se evitará que los aceites salgan a la superficie y se perderá el sabor característico del café. Siendo lo más importante del proceso el que se expresen estos aceites, llamados también esencias o aceites de café, son volátiles y solubles en el agua, por lo que contienen en sí mismos el sabor y el aroma que, más tarde trasladarán a la infusión. Los aceites afloran a la superficie tras una serie de reacciones químicas provocadas al someter al grano a altas temperatura de torrefacción. ²⁰

El calor generado por el proceso químico de la combustión es transferido en el proceso de torrefacción al grano de café verde en tres formas, ver *Figura 13 Formas de transmisión de energía* :

Conducción. Esta ocurre cuando el café verde es puesto en contacto con las paredes del equipo a una temperatura elevada y los granos a una temperatura

menor, el calor es transferido por conducción de la superficie metálica a los granos y de un grano a otro. La transferencia depende del tipo de recipiente y la forma en que vaya a ser tostado el café.

Convección. Cada grano de café es rodeado completamente por una corriente continua de aire caliente a una velocidad que corresponda con la mejor absorción de calor del café, el aire es calentado por un quemador que puede utilizar diesel, o gas como combustible. El calor es transferido por convección mediante el contacto aire caliente-grano; en los equipos en que se utiliza este método también ocurre una transferencia por conducción de grano a grano.

Radiación. Parte de la transferencia de calor también ocurre por radiación emanada de la llama del quemador y del café calentado sin que los granos y demás elementos se toquen entre sí y sin la interacción del aire caliente. Esta radiación es parte reflejada y parte absorbida por los granos de café.

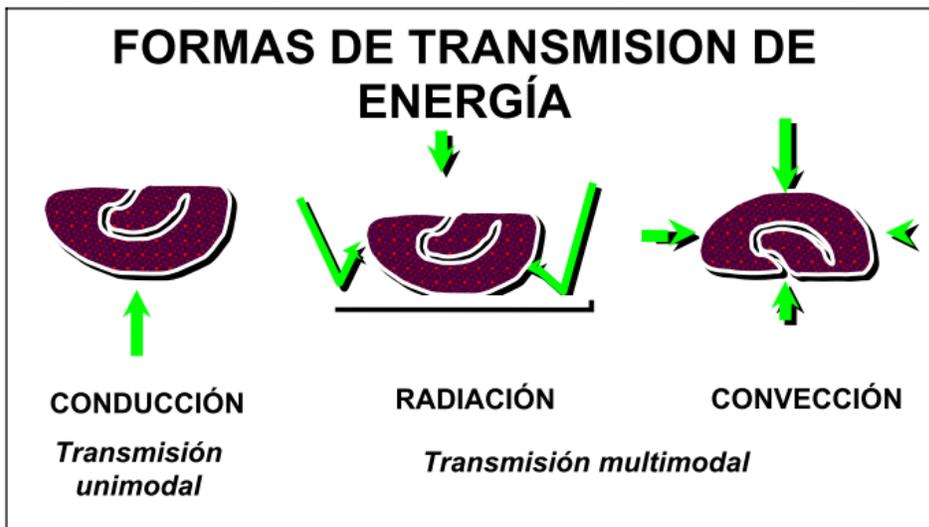


Figura 13 Formas de transmisión de energía ⁴⁴

Existen varios tipos de máquinas tostadoras. Las empresas de mayor venta, que tuestan grandes cantidades de una sola vez, tienen máquinas de grandes dimensiones con un tambor gigante que gira en vertical, mientras que las empresas más pequeñas emplean máquinas de tueste horizontal, preparadas para remesas más pequeñas ²⁰.

La torrefacción es un proceso dependiente de la velocidad superficial, temperatura y el tiempo, por lo cual reacciones químicas se presentan en el grano verde, cambiando su composición estructural, sus componentes químicos y también su apariencia. Hay una pérdida de masa (alrededor del 13.3% cerca de los 230 °C y hasta un 20% cuando es muy oscuro con una densidad de 447 kg/m³) ^{20,37}, principalmente de dióxido de carbono y agua, además de componentes volátiles debido a la pirólisis (fragmentación térmica de las moléculas grandes en ausencia de oxígeno) de los carbohidratos y proteínas. El proceso de tostado puede ser

dividido en dos etapas principales: una, la etapa seca de 125 a los 187°C; seguido de la etapa de tostado que llega a los 300 °C ^{20,43,44}. En términos simples el café tostado puede ser clasificado en “claro”, “medio” u “oscuro, provocando que los aceites broten a la superficie del grano, tornándose de un color marrón oscuro. Llegados a este punto hay que determinar cuánto tiempo se debe mantener el grano en la máquina tostadora y a qué temperatura hay que tostarlo.

Esta es la decisión, que requiere mayor responsabilidad por lo antes expuesto y se le suele encargar a un verdadero maestro torrefactor. Pero tomamos como referencia a Peláez R & Moreno G, (1991) con rango de temperatura para la torrefacción situado entre 185 y 240°C, siendo la temperatura óptima para la torrefacción la comprendida entre 210 y 230°C. Por encima de esta temperatura se inicia la sobre-torrefacción del grano que ocasiona una carbonización sobre éste.

Los granos tostados oscuros contienen menos acidez y un poco menos cafeína que los granos más claros, aunque también menor período de conservación, debido a la cantidad de aceites en la superficie. En los tostados más oscuros predomina el sabor ahumado, penetrante y quemado, ocultando el verdadero sabor del grano. Al contrario de las creencias populares, un tostado más oscuro no equivale a una taza de café más rica ni más fuerte. En términos generales, cuanto más claro sea el color, y por ende menos tostado, el sabor será más suave, más ácido y menos amargo. Cuanto más oscuro y más tostado, el sabor será más fuerte, menos ácido y más amargo. El café ha sido menos expuesto al calor, por lo cual las cualidades del grano son mejor mantenidas. Los tostados más claros se hacen con granos de más alta calidad, pues en este caso se expone el sabor real del grano ^{20,44} ver siguientes Figura 14 Coloración del Tostado y Tabla 3 Grados de tueste .

Nivel	Aspecto	Características
Tueste Canela	Tostado claro, tono canela claro	 Sabor como de nuez pronunciado, alto Nivel de acidez del café
Tueste Americano	Tostado mediano, tono castaño	 Sabor acaramelado
Tueste De La Ciudad	Tostado mediano, marrón mediano sin aceites en la superficie	 Sabor completo de café, con algo menos de acidez
Tueste Urbano	Marrón castaño, apenas más oscuro que el tueste de la ciudad	 Sabor completo de café, con buen balance de azúcar y acidez
Viena	Marrón oscuro, con rastros de aceite en la superficie	 Sabor de tostado oscuro
Tueste Francés	Marrón oscuro, casi negro, aceitoso en la superficie	 Amargo, sabor ahumado y aroma intenso
Italiano	Marrón chocolate amargo, con aceites en la superficie	 Sabor quemado
Expreso	Tostado oscuro, de uso específico para máquinas de expreso	 Sabor quemado, fuerte y dulce

Figura 14 Coloración del Tostado ²⁰

Tabla 3 Grados de tueste ²⁶

Grado de tueste	Porcentaje de masa seca perdida	Temperatura aprox. ** (°C)
Claro	1-5	193
Medio	5-8	200
Obscuro	8-12	218
Muy oscuro	>12	>218

*En base seca del peso en café verde
**Datos página café punta del cielo.

La tercera y última etapa es la de enfriamiento, en la cual se detiene la reacción de la pirólisis en el café. Tan pronto como es alcanzado el grado de tostado deseado, se debe interrumpir la pirólisis rápidamente haciendo descender la temperatura a valores muy por debajo de ésta; es decir mínimo de 100°C. Se puede realizar de dos maneras: la primera consiste en hacer pasar una corriente de aire fría alrededor de los granos ya tostados, y en la segunda se realiza una aspersión de agua directamente sobre los granos (proceso conocido como quenching) ⁴⁴.

Enfocándonos ahora en el equipo de torrefacción, el más común para el café expreso son las máquinas de tambor giratorio. El tambor que contiene el café, gira y mezcla continuamente los granos encima de la llama, absorbiendo el aire caliente hasta que el café alcance la temperatura final deseada. El proceso dura alrededor de 15 a 20 minutos en total, lento precisamente para evitar diferencias de

temperatura que perjudicarían el sabor del café ^{20,44} Ver Tostador de tambor y fluidizado (freshlyroastedespressocoffee.co.uk y ashellc.com).

El equipo de estudio en este trabajo funciona por lecho fluidizado realizando la misma tarea y simplificando el diseño con tiempos de 4 a 6 minutos o menos, dado que el proceso de tostado es detenido por medio de corriente de aire o agua para enfriarlo rápidamente y no se sobre tueste, y altere la calidad del producto, ver Tostador de tambor y fluidizado (freshlyroastedespressocoffee.co.uk y ashellc.com) B.

El tiempo en el proceso de torrefacción, está determinado por la reacción pirolítica en el grano, en donde el grano alcanza la totalidad de su expansión celular, desarrolla su sabor y aroma característicos. Por lo que en el presente trabajo se eligió un proceso de torrefacción elaborado por Bottazzi, Farina, Milani, & Montorsi, (2012), donde se usa un ciclo de baja temperatura y tiempo largo, estableciendo la temperatura del gas en 260°C, como se muestra en la Figura 156.



Figura 15 Tostador de tambor y fluidizado (freshlyroastedespressocoffee.co.uk y ashellc.com)

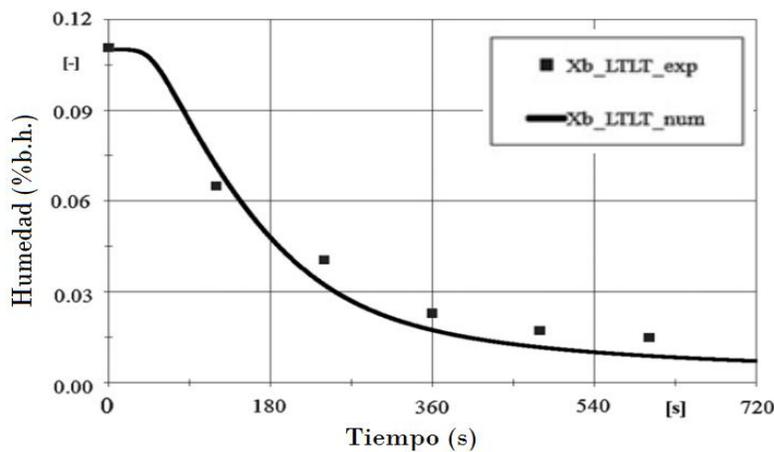


Figura 16 Proceso de tostado de café arábica a 260 °C ⁴³

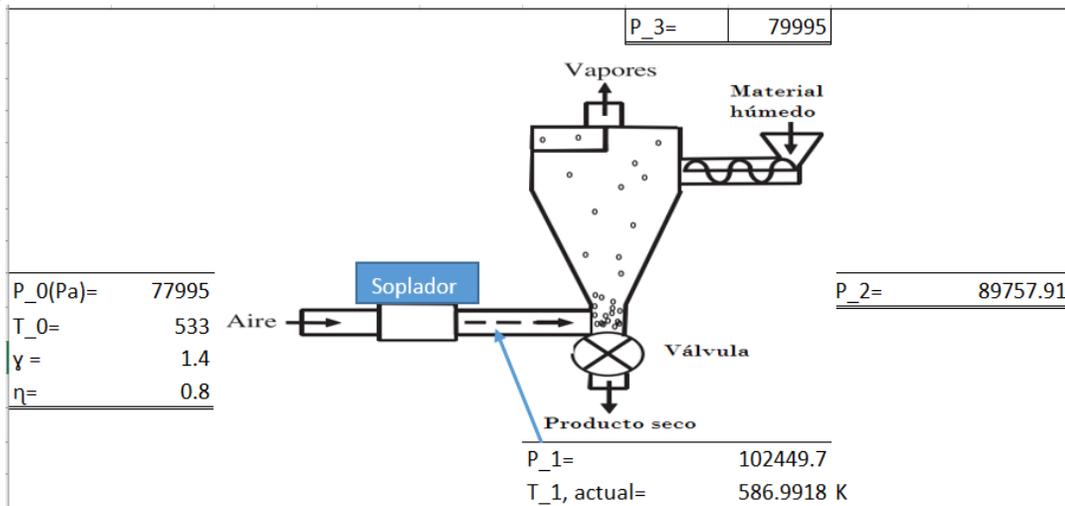
Diseño hidráulico

Como ya se ha mencionado, el equipo de torrefacción es spouted-bed y para este ejercicio de cálculo se tomaron las condiciones de operación y el tiempo de proceso de Bottazzi et al., (2012) por lo que solamente se expresarán resultados relevantes usando la misma metodología del proceso de secado.

Tabla 4 Datos recopilados de proceso de tostado^{39,41,43,45}

SOLIDO		Fluido en secado	
ρ_s partícula(kg/m ³)	1300	ρ_f (kg/m ³)	0.6599
$dp(m)$	0.006	μ (kg/m*s)	2.69E-05
ϕ	0.75	T (K)	533
ρ_{bulk}	320	C_p (J/kg*K)	1032.994
θ_{rep}	24.8		

- 1) $\varepsilon_{mf} = 0.501$
- 2) $u_{mf} = 2.204 \text{ m/s}$
- 3) $b = 1.31$
- 4) $L_{mf} = 1.03 \text{ m}$
- 5) $-\Delta P_M = 9762.9 \text{ Pa}$
- 6) $V_{bed} = 0.018 \text{ m}^3$
- 7) $m_{bed} = 8.72 \text{ kg}$
- 8) *Cálculo de Presiones*



- 9) *Cálculo de potencia*

Trabajo ideal

$\dot{W}_{s, ideal} = 1191.527 \text{ Watts}$

Trabajo actual

$\dot{W}_{s, actual} = 1489.408 \text{ Watts}$

COSTOS

Para determinar costos del calentador de aire de entrada se hizo uso del libro Peters, Timmerhaus, West, & Peters, (2003), el cual trae un compendio de curvas de costos de equipos y sus partes; se realizó una correlación de los puntos de las curvas para generar una ecuación por cada una de ellas.

Cálculo de costos fijos

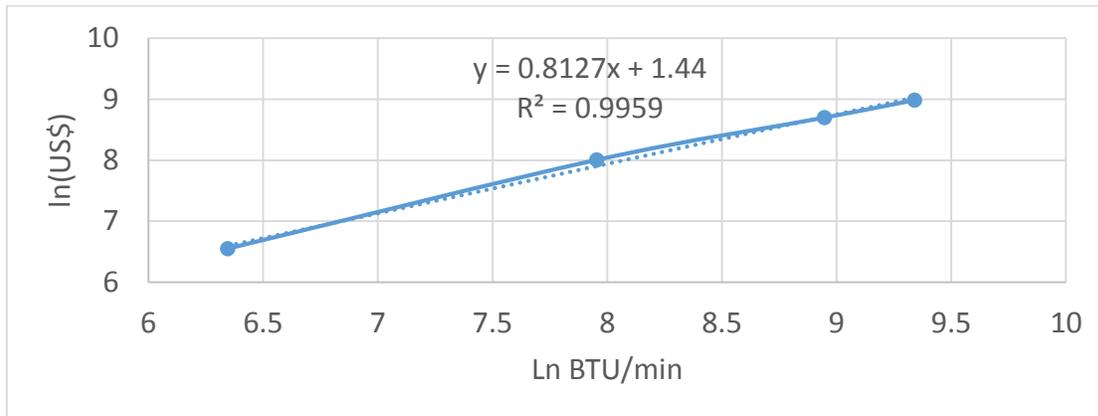


Figura 17 Cálculo de Ln(US\$) en función de energía Ln(BTU/min) ⁴⁶

Pasando de una humedad de 50 a 12% b.h. resulta 38% y un calor latente de vaporización de 2257 kJ/kg

$$q = 8.72kg * \frac{0.38}{1 - 0.38} * 2139.23BTU/kg = 11444.23 BTU \quad (24)$$

Usando la ecuación de la Figura 17 Cálculo de Ln(US\$) en función de energía Ln(BTU/min) ⁴⁶

Pasando de una humedad de 50 a 12% b.h. resulta 38% y un calor latente de vaporización de 2257 kJ/kg

:

$$US\$ = 10^{0.8127 \text{Ln}(12074.3BTU)+1.44} = 8764.2 \quad (25)$$

Se usó el gráfico de costo de ventiladores centrífugos con accionadores eléctricos:

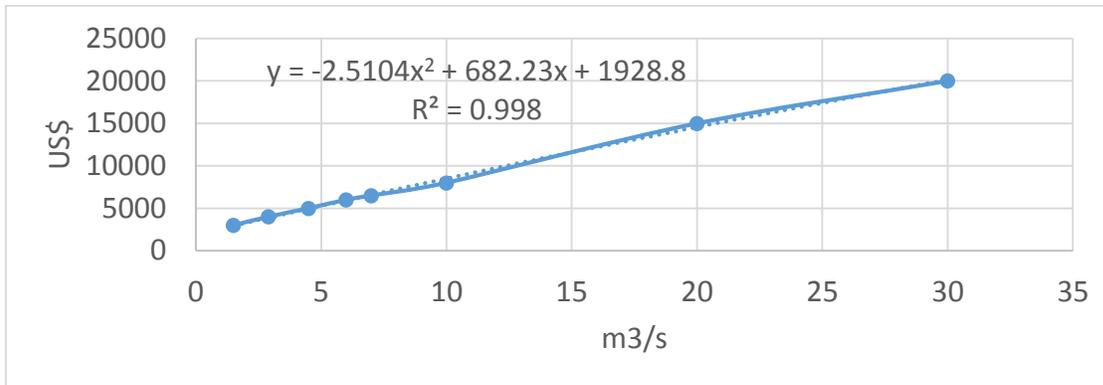


Figura 18 Costo de ventiladores centrífugos ⁴⁶

$$26. \quad US\$ = -2.5104 * 0.03794^2 m^3/s + 682.23 * 0.03794 m^3/s + 1928.8 = 1954.68$$

Se suman todos y se multiplica por un factor de 2, debido a costos de instalación y equipos complementarios como se sugiere en el libro Peters and Timmerhaus⁴⁶.

$$27. \quad \sum US\$ = 18729.44 * 2 = 37458.9$$

Costos Variables

La carga térmica del calentador del aire de entrada al lecho fluidizado es:

$$28. \quad Q_{aire} = 0.04215 kg/s * 1006.66 m^3/s * (323 - 298.15)^\circ C = 1054.52 W$$

Como dicho calentador funciona con resistencias eléctricas, se calcula el costo de la misma, siendo la tarifa de media tensión promedio de los últimos cinco meses del año 2017 en periodo de punta 2.3763 Mx\$/kWh ⁴⁷. Con tipo de cambio promedio de los últimos cinco meses 19.013 Mx\$/US\$. Y con un tiempo de secado de 30 min, el costo es:

$$29. \quad US\$ = \frac{1054.52 W * 30 min * 2.3763 Mx\$/kWh}{1000 * 60 min * 19.013 Mx\$/US\$} = 0.066$$

Se hace lo mismo para el tostado cambiando la carga energética requerida al igual que el tiempo de tostado por los datos elegidos de Bottazzi, Farina, Milani, & Montorsi, 2012

$$30. \quad Q = 8623.42 W$$

$$31. \quad US\$ = 0.17963$$

$$32. \quad \sum US\$ = 0.24552815$$

Siendo esto solamente un ciclo de producción, que conlleva 30 min de secado, 10 de tostado y 4 de enfriamiento ⁴⁸, con 16 min³³ para hacer actividades de carga, descarga y limpieza. Un total de 1 hora cumpliendo una jornada de 8 horas:

$$33. \quad US\$ = 0.24553US\$ * 8 = 1.9642$$

Procesando casi 70 kg de café en una sola jornada de trabajo.

Periodo de Recuperación

Se usa la ecuación del Valor Presente Neto (VPN) con la ayuda de la Tasa Interna de Retorno (TIR/12) para conocer el tiempo que se tarda un proyecto en recuperar la inversión.

$$VPN = Inversión + \sum \frac{Neto}{(1 + TIR/12)} = 0 \quad (26)$$

$$VPN = 37458.9US\$ + \sum \frac{651.49}{1 + TIR/12} = 0 \quad (27)$$

Obteniendo una TIR de 0.1404, la cual comparándola con la tasa de inversión del Banco que es 12%, el proyecto es rentable.

Gráficamente se observa en la Figura 19 Punto de equilibrio financiero el momento en que se recupera la inversión y comienza a haber ganancias, este cálculo fue considerando la producción al mes y vendiendo a un precio de 1.3 US\$ por libra.

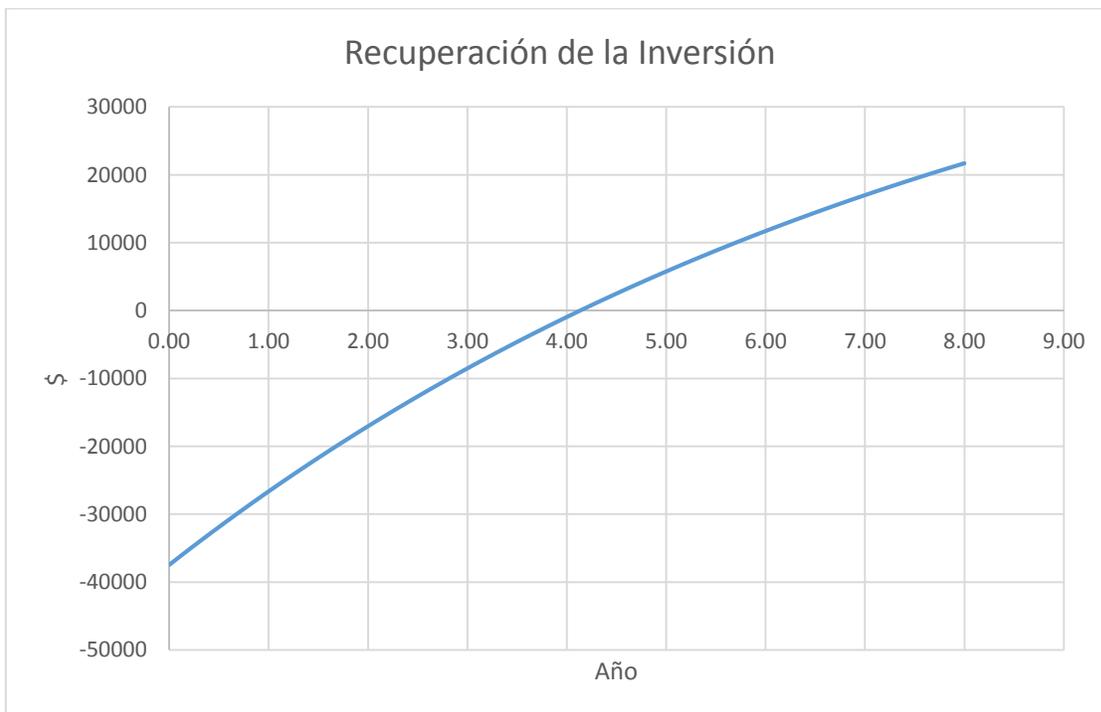


Figura 19 Punto de equilibrio financiero

CONCLUSIÓN

Se propuso una metodología de cálculo y diseño de un equipo spouted-bed para secado y torrefacción de granos de café arábica juntando parámetros reportados de diversas fuentes, resultando en un equipo de dimensiones: $D_i = 0.15$ casi una tubería de 6" de acero inoxidable, $D_{bed} = 0.362m$ y una altura de equipo $Leq = 1m$ para no interferir cuando las partículas se proyectan, para procesar en promedio 8.72 Kg de café por ciclo de proceso (secado y tostado) en una hora.

En cuanto al secado, se puede asegurar que es un proceso complejo, de crítica importancia, el cual afecta las propiedades de la comida de distintas maneras. Muchos de los cambios ocurridos al material durante la deshidratación son desventajosos para la calidad del producto final. Sin embargo, estos pueden ser minimizados mediante un diseño apropiado del proceso de secado ²⁹ los cuales dependen altamente de la heurística, esto debido a que no existe un manual general de recomendaciones para diseñar este tipo de equipos.

De acuerdo a la primera aproximación económica como referencia de inversión inicial, se establece que en un periodo de 4 años y vendiendo café a un precio de 1.3 US\$/lb, nos encontraremos en el punto de equilibrio, y en un tiempo de 8 años la ganancia podría ser de 21,691 US\$. Factor que se logra debido a la simpleza del diseño en el cual se llevan a cabo ambos procesos (secado y tostado), el equipo no presenta partes móviles por lo que los costos de mantenimiento y limpieza son menores; así como una disminución del tiempo de proceso y riesgo de contaminación al evitar el transporte del producto entre etapas. Beneficios que se ven directamente reflejados en el consumo de energéticos (gas y electricidad principalmente).

COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la investigación realizada en este proyecto y a declaraciones de los participantes en el Primer Foro Mundial de Países Productores de Café (PFMPPC), la rentabilidad del cultivo de café en muchos de los países productores presenta una situación crítica, incluso negativa debido a diversos factores como son: menor precio internacional que ha disminuido drásticamente y por consiguiente una disminución adquisitiva del cafecultor; la baja productividad agronómica y el aumento de los costos de producción asociados al cambio climático y el encarecimiento de la mano de obra para las labores como la recolección.

Si bien, los desarrollos de cafés en la última década, han generado ingresos extra a los productores, incitado a pensar que, al pagar extra por un café certificado con Comercio Justo, Plantación de sombra y Altura, están haciendo la diferencia en la vida de aquellos agricultores, estas aun no son suficientes para costear las certificaciones según un análisis hecho en el PFMPPC, resaltando además que la fracción del valor de la cadena global del café que le llega a los productores es muy baja en contraste con la que queda en poder de los comercializadores, la industria torrefactora y la distribución a los consumidores finales.

Claro que la finalidad de este estudio no es el deshacer todo lo bueno que varias agencias certificadas hacen alrededor del mundo, sino mejorar, haciendo de estos certificados herramientas útiles al crear una cadena de suministro sustentable; para que no se conviertan en situaciones de abuso comercial como el caso del Comercio Justo (Fair Trade) en países africanos. Dicho estudio fue realizado por la Asociación de Café de Especialidad SCAA y dirigido por investigadores de la Universidad de Londres, los cuales durante cuatro años hicieron encuestas de seguimiento además de recabar información de trabajadores en 12 regiones de cultivo con granjas certificadas y no certificadas ⁴⁹.

Los investigadores además de revisar estudios existentes, recolectaron nueva evidencia detallada, en la que revelaron que es común encontrar trabajadores asalariados en granjas de “pequeños productores” dentro de las áreas estudiadas, de los cuales, desde un tercio hasta la mitad de adultos recientemente son asalariados. La investigación denotó también que estos trabajadores agrícolas son mucho más pobres alrededor de organizaciones productoras del “comercio justo” que en sitios de productores con este certificado.

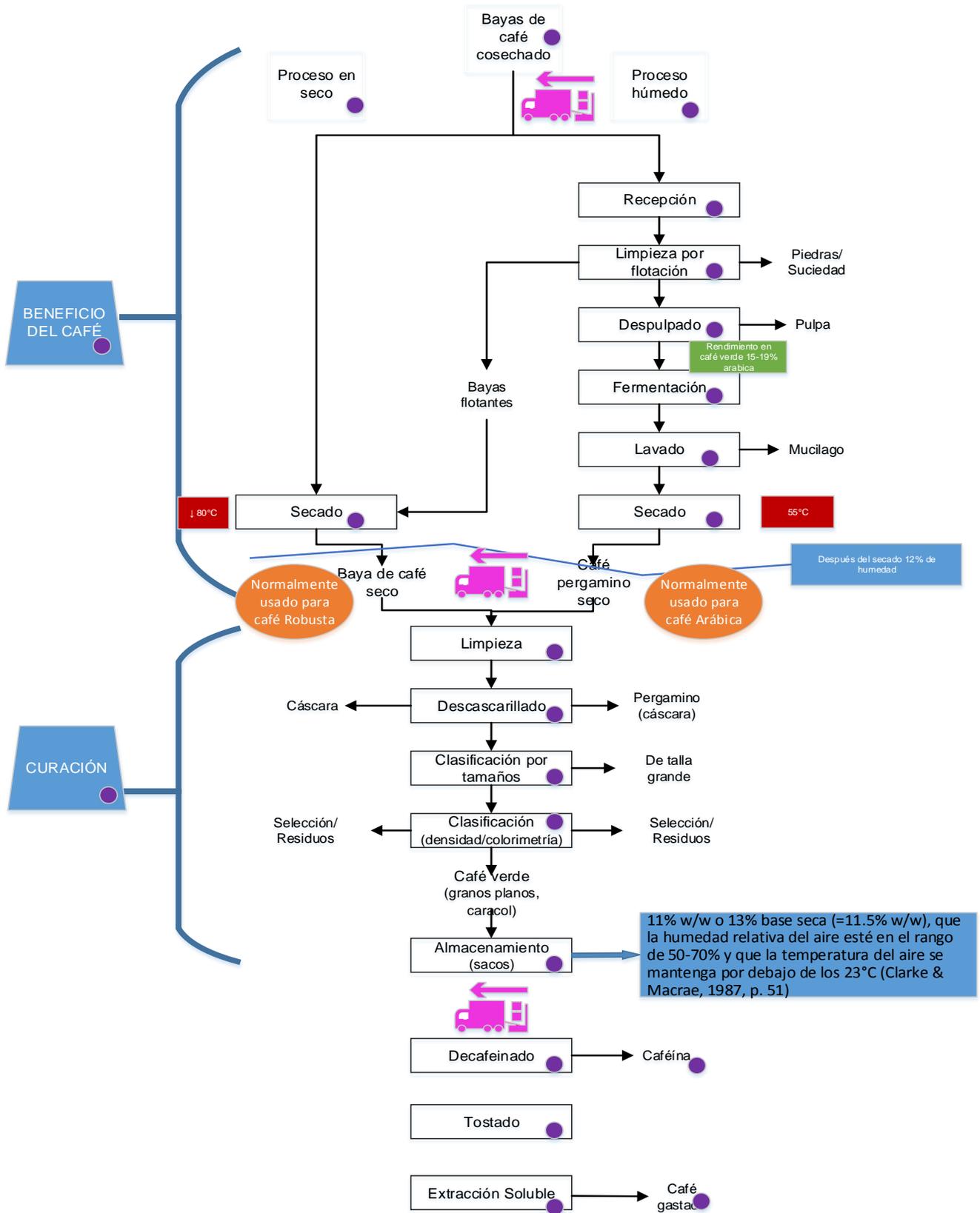
Por lo anterior se recomienda estar atentos siempre de las continuas tendencias, efectos del cambio climático, competencia e innovaciones que oscilan alrededor de este producto, dado que genera oportunidades de crecimiento y emprendimiento en más de un área de conocimiento.

Finalmente, se necesita promover en México un mayor consumo de cafés tostados y molidos atrayendo a más consumidores con más calidad y mejor preparación, con presentaciones más atractivas y con precios justos. Pues a medida que aumente el consumo de dicho grano, se logrará incentivar a los productores y a generar empleos, lo cual ayudaría a la economía de México. Es conveniente realizar estudios más profundos acerca de las variables que impactan directamente en el consumo del grano y posteriormente realizar estudios y propuestas de publicidad para incrementar su consumo.

Un conocimiento más profundo de pros y contras del proceso de secado es necesario para diseñar la transformación de los productos a una calidad deseada. Conociendo la manera en que el secado puede influenciar en las propiedades del alimento, puede usarse para eficientar la creación de nuevos atributos y funcionalidades del producto ²⁹ además de eliminar los problemas de inocuidad alimentaria ⁴.

ANEXO

Proceso de café



Método de Procesamiento en seco

Es el método más simple, consiste en secar toda la fruta después de la cosecha.

Recomendado cuando no se tiene la capacidad para asegurar que solo las frutas maduras sean cosechadas. Por los que se recolectan desde frutos inmaduros a pasados de madurez, de los cuales hasta 80% podrían no ser aptos.

De hecho, tal café se describe como “Duro”

El secado es llevado a cabo de forma “Natural” o artificial.

Secado Natural

Significa secado al sol, el cual no requiere ninguna especie de equipo, solo áreas extensas por la cantidad de materia y lo lento que es el secado de la pulpa, la cual contiene azúcares y pectinas.

Ya sea en concreto, suelo o bandejas limpias y secas, las bayas deben ser esparcidas en capas de solo 30-40 mm de espesor y así no ocurra la fermentación, ni decoloración por calentamiento que genera un brebaje insatisfactorio.

Es necesario el rastrillado continuo en la etapa húmeda para evitar el crecimiento del moho.

Las áreas de secado deben ser colocadas en áreas ventiladas y con condiciones ambientales favorables para el adecuado secado de las bayas.

Este café debe lavarse muy bien y con suficiente agua antes de que sobrepase 14 a 16 h de haberse depositado en el recipiente.

Secado Artificial

Usado para disminuir el costo y tiempo de la labor.

La temperatura de secado es el factor limitante en la velocidad de secado.

Más particularmente, es conocido que altas temperaturas al inicio del secado producen el llamado “stinker” (hedor), un sabor del café no deseado.

El control de la temperatura debe ser más estricto en el secado de la cereza del café que en el pergamino.

Varios autores recomiendan secar a bajas temperaturas. e. g. 55 °C y no sobrepasar los 80 °C, lo que provocaría un deterioro de sabor.

Método de procesamiento Húmedo

Esta técnica de proceso asegura una mayor calidad de producto.

Siempre es usada para preparar café arábica suave (mild arábica coffee).

Requiere equipo de procesamiento (limpiar/clasificar-despulpado-fermentación-lavado y secado) abundante agua limpia y la cosecha de frutos maduros solamente.

La cosecha debe ser llevada al centro de procesamiento lo antes posible (Una vez desprendidos de la baya, los frutos deben ser beneficiados en un lapso no mayor a las 24 horas) para evitar que la masa se caliente, resultando en la fermentación del producto provocando la transmisión de los almidones de la pulpa que lo contiene (decoloración de los granos y hedor de los mismos, entre otros.)

Son vaciados en un tanque recibidor (15 a 2 m³ por toneladas de bayas) equipado con un rebosadero para remover los flotadores.

El tanque tiene un sifón que transporta las bayas pesadas a la despulpadora.

Este simple sistema cumple muchas funciones como separar bayas que flotan de las que no, eliminar arena y piedras, además de ramas e insectos que hayan podido agregarse.

Las partes del fruto se separan mecánicamente para obtener la pulpa como producto secundario y el pergamino como producto principal. Éste sale cubierto de mucílago, que se puede descomponer por fermentación para después lavarse o eliminarse directamente por medios mecánicos, sin fermentación. Una vez eliminado o sin eliminar el mucílago, se acostumbra secar el pergamino de forma natural, artificial o conjuntamente.

Tomar en cuenta un adecuado tiempo de fermentado y más aún, de que todo el mucílago sea removido y el cual no genere sabores mohosos. (FAO, 2009)

Imágenes representación de bayas, capas y grados de tueste del café

El proceso de recolección de las bayas de café maduras, es un proceso fundamental para obtener una bebida de calidad, y para no dañar los equipos de proceso, esto porque las bayas inmaduras son más duras en sus capas.

Dentro del proceso del café se deben remover varias capas que se ejemplifican Ilustración 1 Capas bayas de café . La fruta madura tiene una piel roja que rodea la pulpa, entre carnosas y gelatinosas, dulce y de color amarillo claro. Allí se encuentran las semillas, es decir, los granos de café con sus lados convexos hacia afuera y los planos dispuestos el uno contra el otro. Una cáscara delgada de color amarillo pálido, el pergamino, rodea ligeramente a cada uno de los dos granos de café; a la cáscara apergaminada está adherida una capa gomosa, delgada y resistente denominado mucilago. La semilla está recubierta por una membrana plateada fina

⁴⁴.

Los grados de tueste es una tarea delicada que un maestro tostador logra expresar con experiencia y tiene la habilidad de detectar sabores y texturas mediante una catación del producto.

Las siguientes imágenes ejemplifican los resultados.

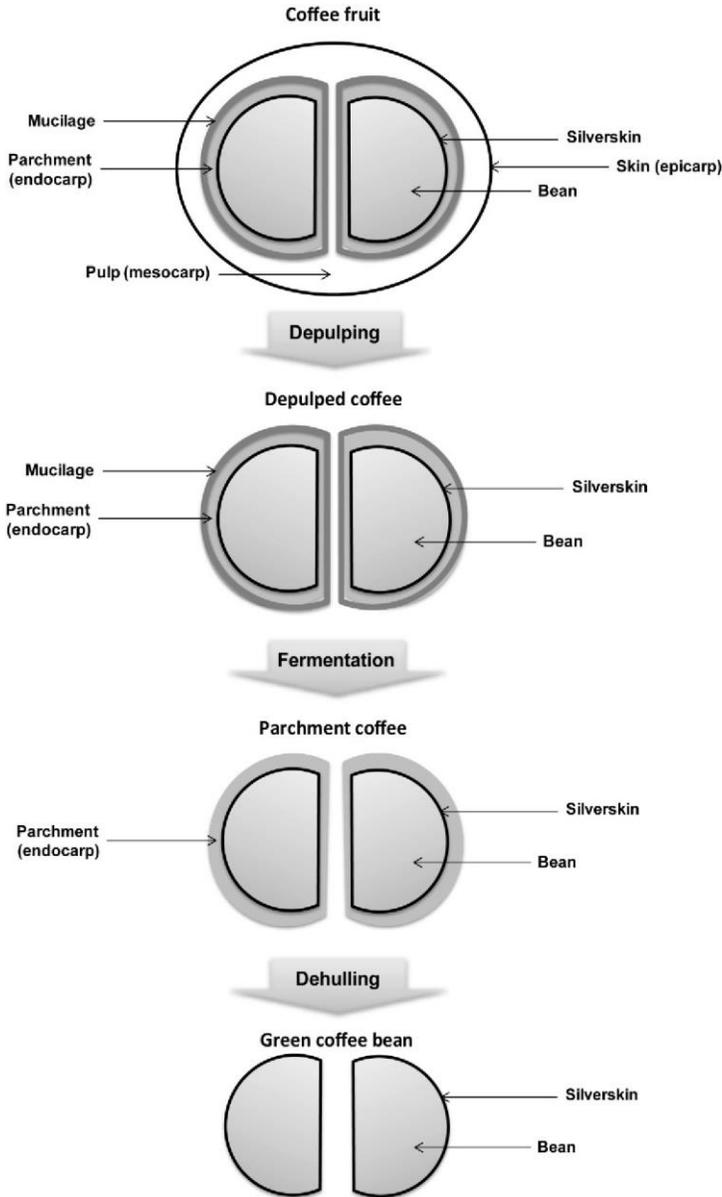


Ilustración 1 Capas bayas de café^{8,50}

BIBLIOGRAFÍA

1. Sfredo MA, Finzer JRD, Limaverde JR. Heat and mass transfer in coffee fruits drying. *J Food Eng.* 2005;70(1):15-25. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.09.008.
2. Muñoz KOG. Santa María Coixtepec , Oaxaca ”. 2008.
3. Velasco JST. SECADO DEL ORUJO EN LECHO-MOVIL. 2000.
4. Ghosh P, Venkatachalapathy N. Processing and Drying of Coffee - A review. *Int J Eng Res Technol.* 2014;3(12):784-794.
5. FIRA F instituidos en relación con la agricultura. Panorama Agroalimentario | Café 2016. 2016;2016. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200634/Panorama_Agroalimentario_Carne_de_Cerdo_2016.pdf.
6. FAO. FAO Coffee Pocketbook 2015. <http://www.fao.org/3/a-i4985e.pdf>.
7. Fadai NT, Melrose J, Please CP, Schulman A, Gorder RA Van. A heat and mass transfer study of coffee bean roasting. *Int J Heat Mass Transf.* 2016;104:787-799. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.083.
8. ICO. Datos históricos. http://www.ico.org/es/new_historical_c.asp.
9. Consumo nacional en los países productores. Centro Internacional de Comercio. <http://www.laguiadelcafe.org/guia-del-cafe/el-comercio-mundial-del-cafe/Consumo-nacional-en-los-paises-productores/>.
10. Coffee C ® Futures. *ICE Futur US.* https://www.theice.com/publicdocs/ICE_Coffee_Brochure.pdf. Accessed January 5, 2018.
11. Global Agricultural Information Network (GAIN). Mexico – Coffee Annual – Mexico launches new policies as rust continues to impact production. 2016;pp.10. [gain.fas.usda.gov/Recent GAIN Publications/Coffee Annual_Mexico City_Mexico_5-13-2016.pdf](http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Coffee%20Annual_Mexico_City_Mexico_5-13-2016.pdf) [http://gain.fas.usda.gov/Recent GAIN Publications/Coffee Annual_Mexico City_Mexico_5-13-2016.pdf](http://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Coffee%20Annual_Mexico_City_Mexico_5-13-2016.pdf).
12. Weiss J. As climate changes, Mexico struggles to keep coffee industry abuzz. Univisionnews. <http://www.univision.com/univision-news/environment/as-climate-changes-mexico-struggles-to-keep-coffee-industry-abuzz>. Published 2017. Accessed June 6, 2017.
13. SAGARPA. SIACON. 2016. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>.

14. Fairtrade Labelling Organizations International, E.V.
<https://www.fairtrade.net/products/coffee.html>.
15. Mario de Jesus Rojas JAPL. *Diseño de Una Planta de Beneficio de Café Por Vía Seca Utilizando Secadores de Lecho Vibrofluidizado.*; 2011.
16. Zavaleta N. Nestlé “sepulta” al café de Veracruz, acusan productores.
<http://www.proceso.com.mx/338553/nestle-sepulta-al-cafe-de-veracruz-acusan-productores>. Published 2013.
17. Cano Flores M, Delfín Pozos FL, Díaz Cerón AM, et al. Estudio de mercado sobre el consumo de café en la ciudad de Xalapa, Veracruz. 2007:108-127.
18. Contrabando e importaciones afectan producción de café en México, advierten. <https://www.diariodexalapa.com.mx/veracruz/contrabando-e-importaciones-afectan-produccion-de-cafe-en-mexico-advierten>. Accessed November 30, 2017.
19. Auffermann K. From Brew Boomers to the Gourmet Generation: National Coffee Drinking Trends 2017. Nationalcoffee.
<https://nationalcoffeeblog.org/2017/03/28/from-basic-boomers-to-specialty-snowflakes-national-coffee-drinking-trends-2017/>. Published 2017.
20. Rivera V. Extracción de tecnología de la cámara de tostado de un tostador de café. 2006.
21. Perfect_Daily_Grind. 59% of US Coffee Drinkers Choose “Gourmet.” NCA’s 2017 National Coffee Drinking Trends.
<https://www.perfectdailygrind.com/2017/03/usa-coffee-drinkers-choose-gourmet/>.
22. Giovannucci D. Encuesta sobre café sustentable en el mercado de especialidad de América del Norte. 2001:32.
<http://www3.cec.org/islandora/es/item/1700-sustainable-coffee-survey-north-american-specialty-coffee-industry-es.pdf>.
23. Brown N. First Global Study on Climate Change and Arabica Predicts “Severe Losses.” April 27, 2015.
<https://dailycoffeenews.com/2015/04/27/first-global-study-on-climate-change-and-arabica-predicts-severe-losses/>.
24. Epstein, N., Grace JR. *Spouted and Spout-Fluid Beds*. (Epstein N, Grace JR, eds.). Cambridge: Cambridge University Press; 2010.
doi:10.1017/CBO9780511777936.
25. Mujumdar AS, Molnár K, Pakowski Z, et al. Handbook of Industrial Drying. *Crc*. 2006:1279. doi:10.1080/07373938808916399.

26. Clarke RJ, Macrae R. *Coffee*. (Clarke RJ, Macrae R, eds.). Dordrecht: Springer Netherlands; 1987. doi:10.1007/978-94-009-3417-7.
27. *ISO 1446:2001 - Green Coffee -- Determination of Water Content -- Basic Reference Method.*; 2012. <http://www.iso.org/iso/home.htm>.
28. Oluleye, A. E. and Ogungbemi, A .A. and Anyaeche* CO, Ibadan) (Department of Industrial and Production Engineering University of. Design and Fabrication of a Low Cost Fluidized Bed Reactor. *Innov Syst Des Eng.* 2012;3(3):24-36.
29. Lewicki PP. Design of hot air drying for better foods. *Trends Food Sci Technol.* 2006;17(4):153-163. doi:10.1016/j.tifs.2005.10.012.
30. W.N. Hernández-Díaz, F.F. Hernández- Campos ZV-G. OPTIMIZACIÓN DEL SECADO DE GRANOS DE CAFÉEN UN SECADOR ROTATORIO. *Rev Mex Ing Química.* 2013;12(2):315-325. <http://www.rmiq.org/iqfvp/Pdfs/Vol. 12, No. 2/IP2/IP2.html>.
31. Paulo César Corrêa, Osvaldo Resende DMR. DRYING CHARACTERISTICS AND KINETICS OF COFFEE BERRY Paulo César Corrêa 1 , Osvaldo Resende 2 , Deise Menezes Ribeiro 3. *Rev Bras Prod Agroindustriais, Camp Gd.* 2006;v.8,(1):1-10.
32. López EM. Sistemas de lógica difusa en el proceso de secado de café en lecho fluidizado. *Ing e Investig.* 2005;25(3):84-91.
33. Mauricio E, Fontal L. Secado de café en lecho fluidizado Coffe drying on fluidised bed. 2006;26(1).
34. Carlos Alvarez Maciel. Diseño de un fasciculo sobre flujo de fluidos a dos fases. 2004.
35. Smith PG, ed. *Applications of Fluidization to Food Processing*. Oxford, UK: Blackwell Science Ltd; 2007. doi:10.1002/9780470995426.
36. Kunii D, Levenspiel O. *Fluidization Engineering*. (© Butterworth-Heinemann 1991, ed.); 1991. doi:10.1016/B978-0-08-050664-7.50002-0.
37. J. Sánchez-Ramírez, I. Anaya-Sosa MGv-M, Santiago-Pineda GG-L y T. ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DEL CAFÉ TOSTADO (*Coffea arabica* L.) EN LECHO FLUIDIZADO. *Rev Mex Ing Química.* 2007;6(núm. 2):185-192.
38. Antonio Valiente Balderas AEOV. *OPERACIONES UNITARIAS PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA (UN ENFOQUE BASADO EN COMPETENCIAS)*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

39. Clarke RJ, Vitzthum OG. *Coffee*. (Clarke RJ, Vitzthum OG, eds.). Oxford, UK: Blackwell Science Ltd; 2001. doi:10.1002/9780470690499.
40. Illy A, Viani R. *Espresso Coffee: The Science of Quality*. Elsevier Academic; 2005. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
41. Clarke RJ and RM, ed. *Coffee 1 Chemistry*. 1st ed. Springer Netherlands; 1985. doi:10.1007/978-94-009-4948-5.
42. ISO 1446:2001 - Green coffee -- Determination of water content -- Basic reference method. <https://www.iso.org/standard/34008.html>. Accessed November 27, 2017.
43. Bottazzi D, Farina S, Milani M, Montorsi L. A numerical approach for the analysis of the coffee roasting process. *J Food Eng*. 2012;112(3):243-252. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.04.009.
44. Peláez R A, Moreno G E. Vademecum del tostador Colombiano. *Div estrategia y Proy Espec Comer*. 1991:290. http://www.iue.edu.co/portal/images/negocios_internacionales/cafe/LACALIDADENLAINDUSTRIADELCAFE.pdf.
45. Sub H, Ji S, Jeong Y. The effect of air flow in coffee roasting for antioxidant activity and total polyphenol content. *Food Control*. 2017;71:210-216. doi:10.1016/j.foodcont.2016.06.047.
46. Peters M, Timmerhaus K, West R, Peters M. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5^o Edición. (McGraw-Hill, ed.); 2003.
47. Tarifas - CFE. http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=CMAMT&Anio=2017. Accessed November 28, 2017.
48. Schooley C. Cooling Methods and Their Impact From Roast to Cup. *HOW TO BE Cool*. August 2014:38-47. www.roastmagazine.com.
49. Zamora M. Inside the SCAA's "Blueprint" to End Hunger In the Coffeelands. *Dly Coffee News*. 2014. <http://dailycoffeenews.com/2014/05/15/inside-the-scaas-blueprint-to-end-hunger-among-coffee-farmers/>.
50. Galanakis C. *Handbook of Coffee Processing By-Products*. 1st ed. (Galanakis C, ed.). © Academic Press 2017; 2017. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811290-8.00014-1>.