

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química



Propuesta de planta piloto para
la producción de una infusión
a partir de pulpa de café

Trabajo de graduación
presentado por Natalia Mc.Colaugh Archila
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala
2022

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Química

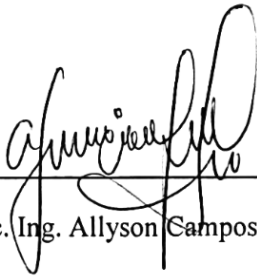


Propuesta de planta piloto para
la producción de una infusión
a partir de pulpa de café


Trabajo de graduación
presentado por Natalia Mc.Colaugh Archila
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Química Industrial

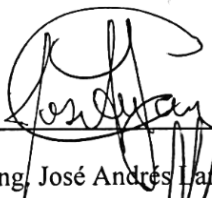
Guatemala
2022

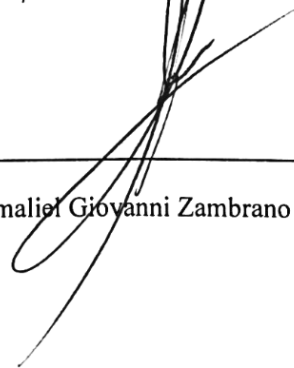
Vo. Bo.

(f) 
MSc. Ing. Allyson Camposeco

Terna examinadora

(f) 
MSc. Ing. Allyson Camposeco

(f) 
Ing. José Andrés Lam

(f) 
Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de enero de 2023

PREFACIO

La elaboración de este trabajo de graduación fue gracias al apoyo de mi familia, amigos, catedráticos y la Universidad del Valle de Guatemala.

Agradezco a mis padres Dannia y Roberto por haberme apoyado todos estos años de estudio y por darme las herramientas necesarias para salir adelante con la carrera. A mis hermanos Isa y Santi por hacer mejores los días difíciles y brindarme cariño en el proceso.

A Ricardo por su apoyo incondicional y confianza en mí. A mis amigos por su motivación diaria y acompañamiento en este trayecto de mi vida.

Agradezco al Ingeniero Gamaliel Zambrano y todos mis catedráticos por sus conocimientos, consejos y ayuda en estos años de estudio, y a la Universidad del Valle de Guatemala por las instalaciones en las que pude realizar mi trabajo de graduación.

CONTENIDO

PREFACIO	I
LISTADO DE FIGURAS	V
LISTADO DE TABLAS.....	IX
RESUMEN	XIII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS.....	3
A. General	3
B. Específicos.....	3
III. JUSTIFICACIÓN	5
IV. MARCO TEÓRICO	7
A. Historia del café.....	7
B. ¿Qué es el café?	8
C. Especies de café.....	9
D. Catación de café	10
E. Proceso del café.....	10
F. Secado.....	14
G. Almacenamiento y transporte.....	18
H. Empaque, llenado y sellado.....	20
I. Infusiones	20
J. Análisis fisicoquímicos	21
K. Balance de masa y energía	23
L. Análisis económico	24
M. Ecuaciones.....	24
V. ANTECEDENTES.....	27
A. Café.....	27
B. Subproductos del café.....	27
C. Usos de subproductos	28
VI. METODOLOGÍA.....	31
A. Revisión bibliográfica	31
B. Identificación de características a evaluar de la pulpa	31

C.	Selección de pulpa.....	32
D.	Caracterización de pulpa fresca y seca.....	32
E.	Elaboración de curva de secado de la pulpa de café	41
F.	Balance de masa y energía	43
G.	Dimensionamiento de equipos	44
H.	Análisis económico	45
VII.	RESULTADOS	47
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
IX.	CONCLUSIONES.....	71
X.	RECOMENDACIONES	72
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	73
XII.	ANEXOS.....	81
A.	Caracterización de pulpa	81
B.	Curva de secado.....	99
C.	Dimensionamiento de equipos	110
D.	Análisis económico	117
E.	Cálculos de muestra.....	132
XIII.	GLOSARIO.....	148

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Exportación de café en Guatemala, agosto 2021	7
Figura 2. Partes del grano de café.....	8
Figura 3. Cafeto con frutos, tipo Catuai Rojo.....	10
Figura 4. Despulpadora de tambor.....	11
Figura 5. Criba giratoria.....	12
Figura 6. Secador directo de bandejas por lotes	15
Figura 7. Curva de secado por lotes.....	16
Figura 8. Secador directo rotatorio continuo	17
Figura 9. Secador continuo tipo túnel.....	18
Figura 10. Transportador mecánico de tornillo	19
Figura 11. Transportador neumático de presión positive	19
Figura 12. Curva de secado a cada temperatura, en función del tiempo	30
Figura 13. Curva de secado de pulpa de café con aire a 75.2 ± 2.2 °C	48
Figura 14. Curva de calibración 1 para determinar antioxidantes en pulpa de café fresca	82
Figura 15. Curva de calibración 2 para determinar antioxidantes en pulpa de café fresca	83
Figura 16. Curva de antioxidantes en muestra 1 de pulpa de café fresca	83
Figura 17. Curva de antioxidantes en muestra 2 de pulpa de café fresca	84
Figura 18. Curva de antioxidantes en muestra 3 de pulpa de café fresca	84
Figura 19. Curva de antioxidantes en muestra 4 de pulpa de café fresca	85
Figura 20. Curva de calibración para determinar polifenoles, en términos de ácido gálico, en pulpa de café fresca y seca	86
Figura 21. Curva de calibración para determinar polifenoles, en términos de ácido tánico, en pulpa de café fresca y seca	86
Figura 22. Polifenoles totales, en términos de ácido gálico y tánico, en pulpa de café fresca	87
Figura 23. Curva de calibración para determinar cafeína en pulpa de café fresca y seca	88
Figura 24. Curva de calibración para determinar ácido clorogénico en pulpa de café fresca y seca	89

Figura 25. Cromatograma de ácido clorogénico en muestras de pulpa fresca y seca.....	89
Figura 26. Curva de calibración para determinar azúcares en pulpa de café fresca y seca	90
Figura 27. Curva de calibración para determinar antioxidantes en pulpa de café seca ...	92
Figura 28. Curva de antioxidantes en muestra 1 de pulpa de café seca.....	93
Figura 29. Curva de antioxidantes en muestra 2 de pulpa de café seca.....	93
Figura 30. Curva de antioxidantes en muestra 3 de pulpa de café seca.....	94
Figura 31. Curva de antioxidantes en muestra 4 de pulpa de café seca.....	94
Figura 32. Curva de polifenoles, en términos de ácido gálico y tánico, en pulpa de café seca.....	95
Figura 33. Comportamiento de actividad de agua, según el contenido de humedad en pulpa de café seca	99
Figura 34. Curva de secado de muestra 1.1 de pulpa de café fresca con aire a 77.0 ± 1.9 $^{\circ}\text{C}$	99
Figura 35. Curva de secado de muestra 1.2 de pulpa de café con aire a 77.0 ± 1.9 $^{\circ}\text{C}$.	100
Figura 36. Curva de secado de muestra 2 de pulpa de café con aire a 77.0 ± 1.5 $^{\circ}\text{C}$	100
Figura 37. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 2 de pulpa de café en secado a 77.0 ± 1.5 $^{\circ}\text{C}$	101
Figura 38. Curva de secado de muestra 3 de pulpa de café con aire a 77.2 ± 1.3 $^{\circ}\text{C}$	101
Figura 39. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 3 de pulpa de café en secado a 77.2 ± 1.3 $^{\circ}\text{C}$	102
Figura 40. Curva de secado de muestra 4 de pulpa de café con aire a 73.1 ± 1.1 $^{\circ}\text{C}$	102
Figura 41. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 4 de pulpa de café en secado a 73.1 ± 1.1 $^{\circ}\text{C}$	103
Figura 42. Curva de secado de muestra 5 de pulpa de café con aire a 73.6 ± 1.4 $^{\circ}\text{C}$	103
Figura 43. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 5 de pulpa de café en secado a 73.6 ± 1.4 $^{\circ}\text{C}$	104
Figura 44. Regresión de la curva de secado promedio del proceso con aire a 75.2 ± 2.2 $^{\circ}\text{C}$	105
Figura 45. Curva de secado de muestra de pulpa de café congelada con aire a 75.3 ± 2.2 $^{\circ}\text{C}$	106

Figura 46. Regresión de la curva de secado de pulpa congelada con aire a 75.3 ± 2.2 °C	107
Figura 47. Comportamiento de humedad absoluta de muestra congelada de pulpa en secado a 75.3 ± 2.2 °C	108
Figura 48. Curva de secado de muestra de pulpa de café congelada con aire a 65.3 ± 1.2 °C	109
Figura 49. Comportamiento de humedad absoluta de muestra congelada de pulpa en secado a 65.3 ± 1.2 °C	109
Figura 50. Balance de masa y energía de secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.....	111
Figura 51. Balance de masa y energía de secador de bandejas de planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de pulpa de café	113
Figura 52. Balance de masa y energía de secador tipo túnel de planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de pulpa de café, en finca de café localizada en Chimaltenango	114
Figura 53. Balance de masa y energía de llenadora y selladora de bolsas de planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de pulpa de café.....	115
Figura 54. Balance de masa y energía global de la planta piloto propuesta para la producción de una infusión a partir de pulpa de café	116
Figura 55. Propuesta de planta piloto para la producción de una infusión a partir de pulpa de café	117
Figura 56. Diagrama de ocupación de equipos.....	121
Figura 57. Análisis de sensibilidad – VPN	126
Figura 58. Análisis de sensibilidad – TIR.....	127
Figura 59. Análisis de sensibilidad – Período de recuperación	128
Figura 60. Preguntas del panel sensorial	129
Figura 61. Análisis por atributos de la muestra de infusión caliente	131
Figura 62. Análisis por atributos de la muestra de infusión fría.....	131
Figura 63. Resultados de preferencia de infusión de pulpa de café.....	132

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Actividad de agua en alimentos de consumo humano	23
Tabla 2. Factores de conversión para transformaciones entre estados del grano de café	27
Tabla 3. Análisis fisicoquímico de las bebidas alcohólicas obtenidas.....	29
Tabla 4. Análisis sensorial de las bebidas alcohólicas obtenidas	29
Tabla 5. Reactivos, materiales y equipos para la medición de humedad de la pulpa	32
Tabla 6. Reactivos, materiales y equipos para la medición de antioxidantes	33
Tabla 7. Reactivos, materiales y equipos para la medición de polifenoles.....	34
Tabla 8. Reactivos, materiales y equipos para la medición de cafeína.....	37
Tabla 9. Reactivos, materiales y equipos para la medición de ácido clorogénico	38
Tabla 10. Reactivos, materiales y equipos para la medición de azúcares.....	39
Tabla 11. Reactivos, materiales y equipos para la medición de actividad de agua	40
Tabla 12. Caracterización de pulpa de café tipo Catuai Rojo	47
Tabla 13. Parámetros de operación de secado	48
Tabla 14. Dimensionamiento de secador tipo túnel.....	49
Tabla 15. Dimensionamiento de elevador de cangilones.....	49
Tabla 16. Dimensionamiento de llenadora	50
Tabla 17. Dimensionamiento de selladora.....	50
Tabla 18. Análisis económico de la planta piloto propuesta para la producción de una infusión a partir de la pulpa de café	51
Tabla 19. Toxicidad de reactivos utilizados en las pruebas de antioxidantes, polifenoles, cafeína, ácido clorogénico y azúcares, para caracterización de la pulpa fresca y seca.....	81
Tabla 20. Equipos utilizados en la caracterización de la pulpa fresca y seca	82
Tabla 21. Antioxidantes en pulpa de café fresca	85
Tabla 22. Polifenoles en pulpa de café fresca.....	87
Tabla 23. Cafeína en pulpa de café fresca	88
Tabla 24. Ácido clorogénico en pulpa de café fresca	90
Tabla 25. Azúcares en pulpa de café fresca	91
Tabla 26. Características fisicoquímicas en pulpa de café fresca	91
Tabla 27. Actividad de agua de pulpa de café fresca.....	92
Tabla 28. Antioxidantes en pulpa de café seca	95

Tabla 29. Polifenoles en pulpa de café seca.....	96
Tabla 30. Cafeína en pulpa de café seca	96
Tabla 31. Ácido clorogénico en pulpa de café seca.....	97
Tabla 32. Azúcares en pulpa de café seca.....	97
Tabla 33. Características fisicoquímicas en pulpa de café seca.....	98
Tabla 34. Actividad de agua, según el contenido de humedad en pulpa de café seca	98
Tabla 35. Resumen de curva de secado de pulpa con aire a 75.2 ± 2.2 °C.....	105
Tabla 36. Tiempo promedio de secado a 75.2 ± 2.2 °C para obtención de pulpa a humedades específicas, a partir del secado de pulpa fresca.....	106
Tabla 37. Resumen de curva de secado de pulpa congelada con aire a 75.3 ± 2.2 °C ..	107
Tabla 38. Tiempo promedio de secado a 75.3 ± 2.2 °C para obtención de pulpa a humedades específicas, a partir del secado de pulpa previamente congelada	108
Tabla 39. Humedad en pulpa de café, según tiempo de secado a 75.2 ± 2.2 °C.....	110
Tabla 40. Especificaciones del calendario de cosecha y beneficio húmedo	110
Tabla 41. Balance de masa y energía de secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala.....	112
Tabla 42. Condiciones climáticas en Acatenango, Chimaltenango, durante los meses de cosecha.....	112
Tabla 43. Costo de equipos CIF y rubros para importación	117
Tabla 44. Inversión por equipos.....	117
Tabla 45. Inversión inicial	118
Tabla 46. Consumo energético.....	118
Tabla 47. Depreciación en línea recta del secador.....	119
Tabla 48. Depreciación en línea recta del elevador de cangilones	120
Tabla 49. Depreciación en línea recta de la llenadora y selladora.....	120
Tabla 50. Jornadas laborales en la planta piloto	121
Tabla 51. Horas laborales – jornada diurna	121
Tabla 52. Horas laborales – jornada intercalada, diurna y nocturna.....	122
Tabla 53. Salario mínimo y prestaciones de ley	122
Tabla 54. Costo de mano de obra.....	123
Tabla 55. Costo total de mano de obra, según programación de trabajo	124

Tabla 56. Costo de materia prima	124
Tabla 57. Material de empaque y operación	125
Tabla 58. Flujo de efectivo	125
Tabla 59. Catación de infusión de pulpa de café	129

RESUMEN

En el presente trabajo se llevó a cabo el secado de la pulpa de café tipo Catuai Rojo, proveniente de un beneficio húmedo, localizado en la región de Acatenango, Chimaltenango, Guatemala. El objetivo principal fue proponer una planta piloto para convertir este subproducto, por medio de un proceso de secado, en materia prima para una infusión. Se realizó una caracterización de la pulpa antes y después del proceso de secado, en la cual se determinó la humedad inicial de 85.23 ± 1.25 % y 15.78 ± 0.01 % del producto terminado. La pulpa seca de café contó con características beneficiosas por su actividad antioxidante de 1.6238 ± 0.1331 mg/ml, contenido de polifenoles de 8.4008 ± 0.4807 mg/g pulpa, 1507.7916 ± 133.2079 ppm de cafeína, 46.7949 ± 3.6369 ppm de ácido clorogénico y 0.568 % m/v de fructosa, minerales y nutrientes (6.65 % m/v y 139.66 ppm), y materia orgánica (93.00 %).

Se construyó una curva de secado con base en pruebas realizadas en el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Se secó la pulpa de café hasta obtener una tasa de evaporación del agua cercana a 0, lo cual indicaría la humedad en equilibrio del sólido. La temperatura de aire de secado promedio fue de 75.2 ± 2.2 °C. La curva obtenida fue útil para determinar el tiempo necesario de residencia de la pulpa de café en el equipo (96.78 ± 4.04 minutos), y para alcanzar una humedad de 15.78 ± 0.01 %. El punto crítico del secado de la pulpa de café fue (3.62963 kg de agua/kg de pulpa seca, 0.00037 kg de evaporado/m²s)

Según los valores obtenidos del balance de masa y energía del proceso, resultado de las pruebas de secado y proceso general, se dimensionaron los equipos necesarios para la planta piloto. El secador propuesto fue continuo de tipo túnel con capacidad de secado de 200.699 a 334.499 kg de pulpa/h para lograr humedad de 15 % a partir de 85 %, y capacidad de secado con 2345.419 a 7818.063 kg de aire seco/h. El requerimiento de temperatura fue 75.2 ± 2.2 °C y el tiempo de residencia definido fue de 96.33 minutos. Se dimensionó un elevador de cangilones para mover el material seco a una llenadora semiautomática, ambos con una capacidad de 33.828 a 112.761 kg de pulpa seca/h y para presentación de bolsas de 50 a 250 gramos. El último equipo propuesto fue una selladora manual para las bolsas, con capacidad de 2 a 40 bolsas/min.

Se realizó un análisis económico proyectado a 10 años de operación de la planta piloto propuesta, que consistió en la determinación del valor presente neto (Q 34,127.14), tasa interna de retorno (8.48 %), período de recuperación (7.24 años) y un análisis de sensibilidad, en el cual el precio de venta del producto terminado y el material de empaque y operación afectaron de mayor manera los valores anteriores.

I. INTRODUCCIÓN

En la Ingeniería Química, el término *infusión* se conoce como la extracción resultante de la solubilización de partes de un producto al introducirlo en agua a temperatura elevada. Sin embargo, comercialmente, este término se usa para referirse a la materia prima que se introduce en el agua caliente para la elaboración de bebidas. En este trabajo se referirá a *infusión* como la pulpa de café con humedad reducida, producto del proceso de secado.

El café es un producto mundialmente reconocido que se cultiva en más de 50 países, entre los cuales se encuentra Guatemala, con un total de 422,445 hectáreas productivas (INE, 2020). Para el éxito del cultivo se requiere una combinación favorable de clima, altura sobre el nivel del mar y nutrientes del suelo. El café en oro o verde Guatemalteco aumentó en exportaciones un 79 %, para febrero de 2022 (Agexport, 2022). Según la Organización Internacional del Café, se predice un aumento global en el consumo del producto, como se ha dado en los últimos años, con un crecimiento del 3.3 % del 2021 al 2022. (OIC, 2021)

Uno de los subproductos del proceso del café y el más abundante es la pulpa, consecuente del despulpado del grano al ser cosechado. Actualmente, en Guatemala, existe un plan de gestión ambiental de los procedimientos secundarios del proceso del café. En este se detallan las medidas de mitigación propuestas por Anacafé y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, para el manejo de la pulpa. Dentro de las alternativas están el aprovechamiento del subproducto como abono, para la producción de biogás, uso como combustible, y su tratamiento para una correcta disposición. Los usos de este subproducto se deben a características que posee, como su composición orgánica, capacidad de fermentación, alta actividad antioxidante, así como su disponibilidad en el beneficio húmedo del café. (Cenicafé, 2010)

Este trabajo consiste en la propuesta de una planta piloto para la producción de una infusión, a partir del tratamiento de la pulpa de café, uno de los subproductos más abundantes del beneficio húmedo. La propuesta busca una alternativa para revalorizar el material abundante y todavía útil, como materia prima para una infusión. En el siguiente documento se incluyen las secciones de marco teórico, antecedentes, resultados, análisis de resultados y anexos, las cuales proveen de más detalle acerca del estudio.

II. OBJETIVOS

A. General

- Proponer una planta piloto para la producción de una infusión a partir de pulpa de café.

B. Específicos

- Caracterizar la pulpa de café como materia prima, antes y después del proceso de secado para determinar sus propiedades fisicoquímicas.
- Realizar una curva de secado, a partir de las pruebas realizadas en el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, para determinar los parámetros de operación como humedad, temperatura y tiempo, del proceso del secado de pulpa de café.
- Proponer y dimensionar los equipos necesarios para la producción de la infusión a escala planta piloto, a partir del balance de masa y energía.
- Realizar un análisis económico para determinar la viabilidad de la producción de la infusión como uso alternativo de la pulpa proveniente del proceso de producción de café.

III. JUSTIFICACIÓN

La industria cafetalera en Guatemala ha tenido un crecimiento de exportaciones del 113% en los últimos 20 años. En el beneficio húmedo del café se utiliza agua para separar el grano de la pulpa y mucílago, lavarlo y fermentarlo. En esta etapa se desecha la pulpa, la cual representa aproximadamente un 40% m/m del fruto. En 2019, se exportó 4.5 millones de quintales de café de Guatemala, lo que equivale a 3 millones de quintales de pulpa desechados. (Agexport, 2021)

La pulpa es un subproducto que, de no ser tratado correctamente, contamina el ambiente por su alta demanda química de oxígeno y materia orgánica que conlleva a una degradación rápida. Actualmente, es un desecho que pocas veces es utilizado como abono orgánico y fuente de biogás (Rodríguez, 2010). Al utilizar este subproducto, como materia prima en un proceso de producción de un bien, se estaría disminuyendo la cantidad de materia orgánica que se desecha al ambiente, proveniente del beneficio húmedo. Como consecuencia, la demanda química de oxígeno en áreas de desecho también disminuiría, propiciando que el proceso de producción del café sea menos contaminante para el ambiente.

El productor de café se ve afectado por la volatilidad del precio de este *commodity*, ya que su valor fluctúa con el paso del tiempo, por factores como cambios de clima, demanda, nuevos productores, entre otros (Agexport, 2021). Utilizar la pulpa que proviene del proceso actual y revalorizarla por medio de su tratamiento y venta presentaría una oportunidad de ingresos económicos adicionales para los productores de café. Sería una alternativa viable para su aprovechamiento, expandiendo el mercado de los caficultores y proveyendo una fuente segura ante las fluctuaciones previamente mencionadas.

Adicionalmente, el uso propuesto de la pulpa de café representa una innovación en el tratamiento del desecho y subproducto en cuestión, proveniente del beneficio húmedo. Un beneficio agregado del uso de la pulpa como materia prima para infusión es el hecho que es una práctica poco experimentada y conocida en Guatemala, a pesar de la abundante disponibilidad y fácil acceso a la materia. Con poca presencia actual en el mercado, optar por un proyecto de este tipo, abriría las puertas del mundo del café e infusiones a una nueva creación con beneficios nutricionales, como antioxidantes, cafeína, azúcares naturales, y demás.

El uso propuesto de la pulpa en este trabajo es la producción de una infusión proveniente del secado de este subproducto de café. La pulpa es rica en antioxidantes, azúcares y minerales que dan valor agregado a la infusión propuesta para el consumo humano. El planteamiento del proceso de producción de una infusión a partir de la pulpa del café conlleva la caracterización química de la pulpa como materia prima, balances de materia y energía, elaboración de una curva de secado, establecer y dimensionar los equipos necesarios, y determinar la viabilidad económica de esta alternativa.

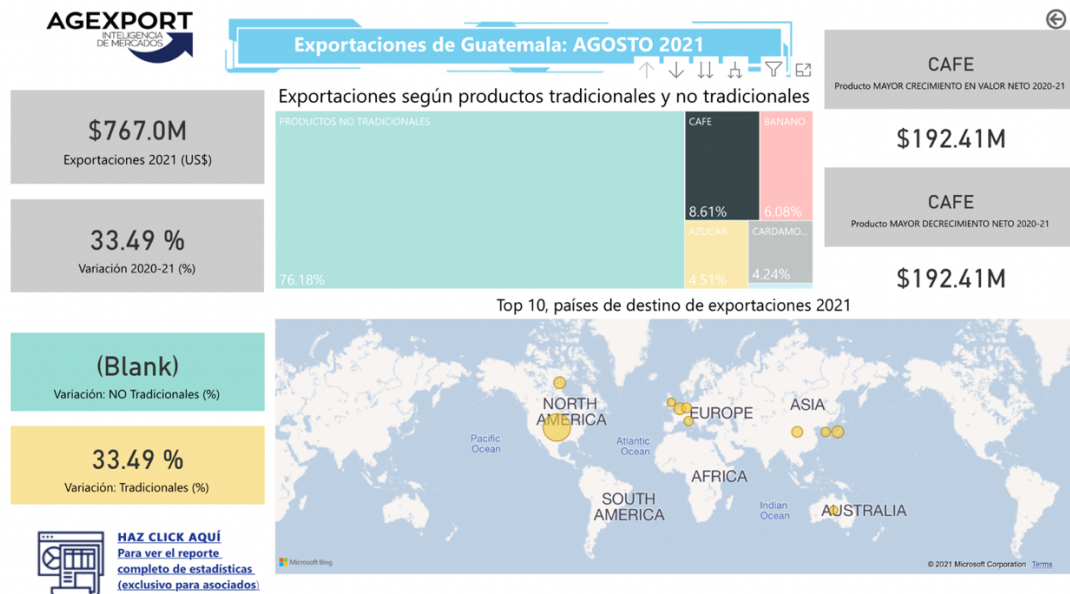
IV. MARCO TEÓRICO

A. Historia del café

Según historiadores, las primeras plantas de café surgieron en Etiopía en la provincia de Kaffa, antes del siglo IX, de donde se expandieron hacia la región de Yemen en la Península Arábiga. Su consumo inició en esta área, seguida por Ceilán e India. Varias muestras de la planta fueron llevadas a Holanda y Francia, en donde se extendió su consumo por toda Europa, hasta las colonias americanas, en el siglo XVII. Se estima que la llegada del café a Guatemala se dio alrededor de 1750. (Alvarado, 1994)

Inicialmente, el café era consumido directamente de la planta, sin tratamiento previo más que la eliminación de la pulpa. Posteriormente, se inició con la maceración de los granos, luego el secado y tostado de los mismos, hasta la preparación actual que se conoce (OIC, 2021). Mundialmente, es una bebida conocida que aumenta su popularidad y cuya producción es importante para la economía, siendo un producto primario de exportación en países como Guatemala. Como se observa en la Figura 1, para agosto del 2021, el café representaba un 8.61% de las exportaciones del país. (Agexport, 2021)

Figura 1. Exportación de café en Guatemala, agosto 2021



Fuente: Agexport, 2021

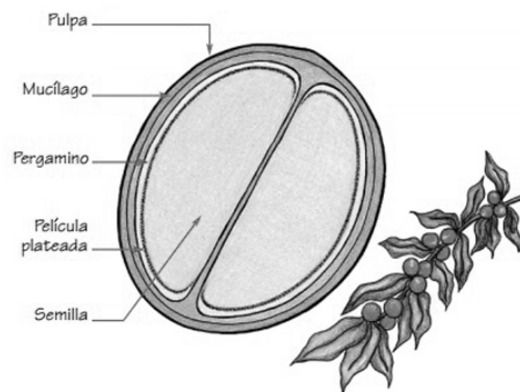
B. ¿Qué es el café?

El café es una bebida que se obtiene de los frutos de la planta de café, conocida como cafeto. Esta planta da su primer fruto del tercer al quinto año de vida y puede llegar hasta los 25 años según sus condiciones y cuidados. Sin embargo, generalmente los años más productivos del cafeto suelen ser del sexto al octavo. El crecimiento se da en dos fases: desarrollo vegetativo, en el cual se da la formación de raíces, hojas, ramas; y el desarrollo reproductivo, en el cual crece la flor y fruto. El proceso de deterioro del cafeto se conoce como fase de envejecimiento o senescencia. (Arcila et al., 2007)

El desarrollo vegetativo se da desde la germinación hasta la primera floración de la planta del café. Dado el crecimiento continuo de hojas, raíces, etc. del cafeto a lo largo de toda su vida, esta fase está en constante combinación con el desarrollo reproductivo. Este último inicia cuando crecen las flores en los cafetos. Comercialmente, el crecimiento de esta planta es más rentable y productiva comúnmente en los años 6 y 8, después de este período, se da la fase del envejecimiento, la cual depende de factores como la región, clima, disponibilidad de nutrientes, etc. (Arcila et al., 2007)

El fruto maduro del cafeto está compuesto por tres partes distintas: epicarpio, mesocarpio y endospermo. El epicarpio es la capa más externa conocida también como la piel del fruto, o pulpa del café, la cual varía en colores y tonos según el período de maduración en el que se encuentre y el tipo de café que esté creciendo. La capa que le sigue al epicarpio es el mesocarpio, el cual es comúnmente conocido como el mucílago. Por último, el endospermo es la semilla o grano de café cubierto por dos capas, una película plateada y pergamino. (Alvarado, 1994)

Figura 2. Partes del grano de café



Fuente: Rodríguez, 2010

C. Especies de café

Al rededor del mundo, existen más de 100 especies identificadas dentro del género *Coffea*, es decir, clasificadas como especies de café. Sin embargo, las especies con mayor importancia por su repercusión económica son la *coffea canephora* y *coffea arábica* (Velásquez, 2019). El primer tipo es la segunda especie de mayor producción global (alrededor de 40 %), conocida tradicionalmente como robusta. Este cafeto produce una bebida de menor calidad y es el comúnmente utilizado para venta a nivel industrial, dado su alto rendimiento en la cosecha. Sin embargo, esta tendencia ha mermado debido al creciente interés de los consumidores en conocer más acerca de los tipos de café de mejor calidad. El café robusta proviene de los frutos pequeños de un árbol que puede llegar a crecer hasta 10 metros, con raíz poco profunda. (Velásquez, 2019)

La especie arábica proviene de Etiopía, representa un 60 % de la producción mundial del café, es la especie más cosechada y de ella se obtiene una bebida con alta calidad y aceptación entre consumidores. Para que un cafeto pueda ser clasificada dentro de esta especie, la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales indica que debe ser una variedad homogénea, es decir cumplir y ser distinguible de otras especies, según las características y aspecto específico definido. Adicionalmente, debe ser una variedad estable, que permita la reproducción del cafeto por varias generaciones sin modificación de sus características. (World Coffee Research, s.f)

Dentro de los principales tipos de café arábica se encuentran la Raza Etíope, que es conocida por tener alta calidad de taza, pero ser susceptible a plagas, y los tipos Típica y Borbón. Ambas especies son tradicionales en América y surgieron a partir de semillas provenientes de Yemen. La primera fue transportada por India, posteriormente a Java, isla de Indonesia, por holandeses de donde surgió el nombre (“Typica”). Luego las semillas llegaron a Europa y finalmente se obtuvieron en América a raíz de las rutas comerciales coloniales del siglo XVIII. Las mismas semillas del cafeto proveniente de Yemen fueron llevadas a isla de Borbón, isla de las Malvinas, de donde obtuvo su nombre este tipo. La esta especie llegó al continente americano a través de Brasil. Ambas especies fueron conocidas en África luego de su cosecha en América. (World Coffee Research, s.f)

El Catuai es un tipo de café resultante del cruce entre dos cafetos distintos de la especie arábica, Caturra y Mundo Novo, en el Instituto Agronómico de Sao Paulo, Campinas, Brasil. El cafeto del Catuai es de tamaño pequeño, lo que permite aumentar la densidad de cosecha y rendimiento de una plantación, al sembrar las semillas más cerca entre sí. Sin embargo, es un tipo susceptible a la roya, la cual es una plaga que ataca las plantaciones de café, ya que es el único huésped conocido de este hongo. Este tipo de contaminación se previene por medio de la aplicación de fungicidas en los cultivos (CropLife, s.f). El tipo de cafeto Catuai fue introducido a los cultivos de Guatemala en 1970, y actualmente representa el 20 % de la producción nacional, a pesar de la poca presencia en otros países de Centroamérica. Se considera un café de taza buena y existe en

frutos de color amarillo y rojo. En la Figura 3 se muestra un cafeto del tipo Catuai Rojo. (World Coffee Research, s.f)

Figura 3. Cafeto con frutos, tipo Catuai Rojo



Fuente: World Coffee Research, s.f

D. Catación de café

Para determinar la calidad y notas características del café, en la industria se lleva a cabo una práctica conocida como catación. Esta consiste en una serie de evaluaciones sensoriales para calificar el aroma, sabor, apariencia, olor, y otros atributos, así como también defectos. La puntuación y características obtenidas dependen de muchos factores a lo largo del procesamiento del grano, como el tipo de café, desde la siembra del cafeto, hasta el tueste del grano trillado. Los catadores profesionales de café adquieren ese título por medio de cursos y entrenamiento para distinguir notas de las características variadas. Las cualidades calificadas del café son: aroma, acidez, cuerpo, sabor y retrogusto. (Rodríguez, 2010)

E. Proceso del café

1. Beneficio húmedo y beneficio seco

El proceso de transformación del fruto del cafeto a granos de café se conoce como beneficio. Este proceso se lleva a cabo de dos formas: por vía húmeda (uso de agua) o por vía seca. En el primer proceso, también llamado beneficio húmedo, se lleva a cabo la recolección y selección del fruto maduro, primer lavado, separación por peso, que permite segregar los granos buenos de los malos, conocidos como “flotes”, despulpado, fermentación, segundo lavado y secado. Por otro lado, en el beneficio seco se da el trillado, selección y clasificación de los granos según el tamaño y color. (Puerta – Quintero, 2000)

La recolección del fruto se da cuando este está maduro, generalmente de tonos rojo y corinto, y se conoce como cereza de café. Posteriormente, el lavado consiste en la separación de contaminantes como piedras,

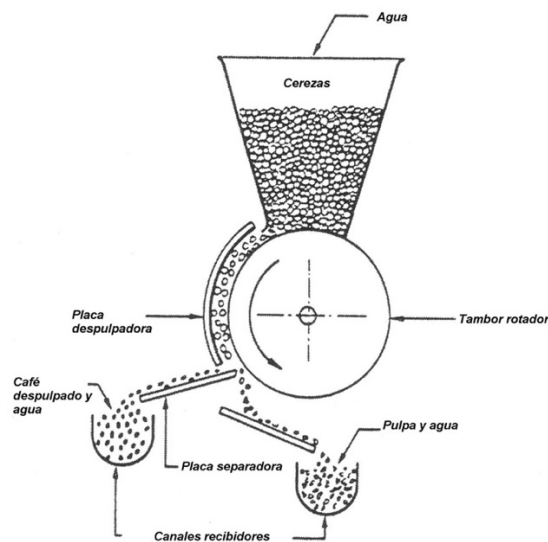
ramas, hojas, etc., de los frutos por medio del uso de agua. En este proceso se separan también los frutos verdes que no han madurado (menos pesados), de aquellos ya maduros. Seguidamente, en el proceso de despulpado se separa la pulpa del grano también con uso de agua a presión. Luego en la fermentación, los granos se acumulan por períodos de tiempo que varían dependiendo del método que se trabaje, y el mucílago se fermenta. El segundo lavado con agua se hace para separar el mucílago y granos resultantes de la fermentación. El secado de los granos previamente lavados se hace de manera natural, en patios expuestos a radiación solar, o en secadores con corrientes de aire caliente. Por último, la trilla se lleva a cabo para eliminar el pergamino y obtener el café verde sin más capas. (Puerta – Quintero, 2000)

2. Equipos del beneficiado de café

- **Despulpadora**

El despulpado es una operación cuyo objetivo es separar la pulpa del resto del fruto. Este proceso se hace mecánicamente por medio de un equipo que consiste en una tolva donde es introducido el fruto seleccionado, un tambor o disco rotatorio, con pequeñas cuchillas que remueven la pulpa, la bomba que acciona una correa, y salidas separadas para el café con mucílago y la pulpa. En este proceso se pierden algunos granos en buen estado, ya que se mezclan con la pulpa. Sin embargo, esto puede corregirse seleccionando los granos, previo a su despulpado, para ajustar la maquinaria a un tamaño específico. Funcionan con un motor que hace mover una banda para girar el tambor o disco. En la antigüedad, el proceso de despulpado se realizaba con maceración; el proceso manual en la actualidad consiste en un equipo similar al mecánico descrito anteriormente, con la diferencia que no hay bomba que induzca el giro del tambor. Los tres principales tipos de despulpadoras, según el mecanismo para remover la pulpa son de disco, helicoidal y de tambor (Ramos, 2022). En la Figura 4 se ilustra una despulpadora de tambor.

Figura 4. Despulpadora de tambor

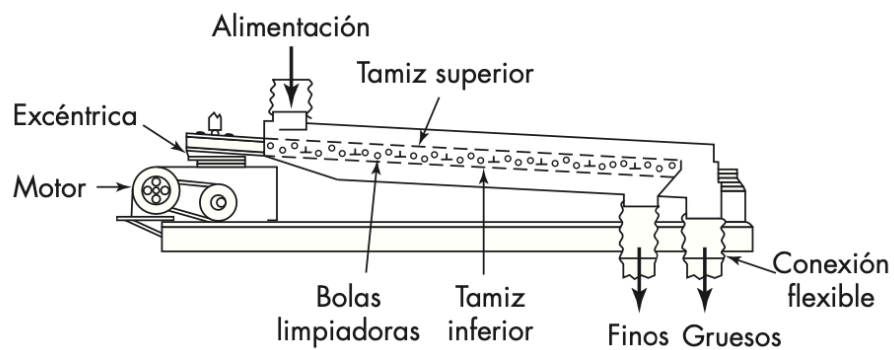


Fuente: Ramos, 2022

- **Criba**

La criba es un equipo de manejo de sólidos cuyo fin es separar los granos según tamaño. Consiste en una malla inclinada que se carga en la parte alta y descarga en la parte baja, la cual puede ser estática, giratoria (Figura 5) o vibratoria. El segundo tipo funciona con un tambor inclinado cubierto de malla, y el tercer tipo consiste en hacer vibrar la malla en distintos sentidos de manera mecánica o manual. En el proceso del café, se emplea una criba previo y posterior al despulpado. La criba antes de despulpar funciona para eliminar piedras, ramas, y restos de materiales extraños que pueden haberse mezclado en la cosecha de los granos. También es útil para la separación del café por tamaño de fruto. Adicionalmente, la criba posterior al despulpado permite la separación de granos con mucílago de restos de pulpa que pudieron haber pasado por el sistema. (McCabe, 2007)

Figura 5. Criba giratoria



Fuente: McCabe, 2007

- **Fermentador**

El proceso de fermentación del café permite la degradación de componentes como azúcares, proteínas, levaduras, ácidos, entre otros, para dar al café sabores y olores característicos. Estas fermentaciones pueden ser con o sin oxígeno. Comúnmente, las fermentaciones en el beneficio húmedo se llevan a cabo en piletas abiertas a la atmósfera, en las cuales permanece el café el tiempo necesario, según su tipo y proceso. En la actualidad, hay procesos en constante innovación que permiten controlar más rigurosamente las fermentaciones para lograr agregar valor al producto, según lo esperado. Estos nuevos procedimientos emplean el uso de reactores, generalmente sellados, en los cuales se fermenta el café y componentes adicionales que se agreguen. Por medio de este proceso se puede lograr que el café cuente con aromas y sabores específicos, entre ellos cítricos, frutales, dulces, etc. Los factores principales que influyen en la fermentación controlada del café son: tiempo, condiciones de temperatura de aire y calidad de agua, sistema de fermentación, y sustrato. (Puerta, 2015)

- **Patios de secado**

Los patios de secado son lugares posicionados estratégicamente para recibir luz solar, en donde se da el último paso del beneficio húmedo. El secado de los granos puede darse en secadores continuos o por lotes, y también se puede hacer al sol, en patios de secado, el cual es el proceso más común en los beneficios de café, en lugares donde las condiciones climáticas y de espacio lo permiten. En esta etapa de la producción se esparce el café en sobre el piso y se deja secar por el tiempo requerido o establecido previamente. Para que el secado sea homogéneo, se realizan movimientos a la pulpa conocidos como “volteos” a la pulpa, para que no quede área del grano sin secar. (Arroyo, 1988)

3. Subproductos

En el proceso del beneficiado de café, existen subproductos cuyo desecho posterior a la obtención de los granos es la práctica más común. Estos subproductos son en su mayoría pulpa proveniente del despulpado, agua con trazas de mucílago resultado de los lavados, y cascarilla que resulta del trillado del café pergamino. (Rodríguez, 2010)

- **Pulpa**

La pulpa representa aproximadamente un 43.2% m/m del fruto maduro. Este subproducto contiene compuestos como azúcares, cafeína y fenoles. Al no ser tratada previo a ser descartada, la pulpa puede contaminar el ambiente por su descomposición que provocan grandes cargas orgánicas. Las bacterias que se alimentan de la materia orgánica consumen oxígeno provocando agotamiento del elemento disuelto en el agua, acidificación y aumento de turbidez del agua. Debido a estos problemas de contaminación, se han buscado alternativas para el uso o tratamiento del subproducto. La pulpa ha sido utilizada como abono orgánico, fuente de producción de etanol, biogás, y como combustible directo, posteriormente a ser secado. (Borrayo et al., 2014)

- **Mucílago**

El mucílago, también conocido como mesocarpio, es la capa interna debajo de la pulpa y que es eliminada en el beneficio húmedo por medio de lavados. Representa un aproximado del 17 % m/m del fruto fresco. Al igual que la pulpa, este subproducto puede contaminar por sus grandes cargas orgánicas. Generalmente, el mucílago es desechado junto con el agua, formando una consistencia gelatinosa por las pectinas del agua y los azúcares de la fermentación de pulpa acumulada en el proceso. Este subproducto se ha utilizado como abono orgánico. (Rodríguez, 2010)

- **Cascarilla**

La cascarilla es el tercer subproducto más representativo del café, conformando un 4.2 % m/m del peso total del fruto fresco. Es la capa que va al interior del mucílago y que se desecha en el proceso de trillado, en el beneficio seco del café. Cuando el grano de café está conformado aún por esta parte, se le conoce como café pergamino. La cascarilla es utilizada como combustible por su alto poder calorífico. Adicionalmente, se ha estudiado la posibilidad de aglomerar el subproducto para formar utensilios. (Rodríguez, 2010)

F. Secado

El secado es un tipo de operación para la transferencia de masa. En la práctica, se basa en la puesta en contacto de un sólido de alta humedad con una corriente de aire o gas caliente para extraer la humedad de la sustancia sólida. La energía del aire caliente es utilizada por el agua para evaporarse y absorberse en la corriente del gas. Esta transferencia de masa resulta en el aire o gas saturado más frío a la salida del secador y un sólido seco a mayor temperatura a la que entró. Usualmente, la remoción de humedad en un equipo de secado no es del 100 %, pero se obtiene un producto con una humedad considerablemente reducida. Se logra la evaporación de la humedad libre, también conocida como humedad superficial, ya que el gradiente de concentración lo permite. (Treybal, 1997)

El secado de sólidos permite la operación con granos, cristales, escamas, polvos, láminas, hojas, etc. Según el tipo de sólido y el proceso, la humedad se encuentra dentro, en la superficie o en solución. Con base a la forma de los sólidos y el tipo de humedad que se quiera retirar, existen varios tipos de secados y condiciones para las necesidades según el proceso o industria. (McCabe, 2007)

1. Clasificación del secado según operación

La categoría principal del secado es según la operación: por lotes o continuo. El primer tipo, por lotes o batch, se emplea a pequeña escala y con una cantidad limitada y definida de material. Debido a que no hay flujos continuos de entrada al equipo, la composición cambia con el tiempo de estadía en el secador. La consideración más importante en el secado por lotes es el tiempo que toma la operación dentro del equipo, lo cual permitirá calcular costos y escalar las pruebas. (Treybal, 1997)

El secado continuo se da en estado estacionario, con flujos constantes de entrada y salida de aire o gas y sólidos. Por la naturaleza del proceso, la composición no varía con el tiempo. Los factores importantes para el secado continuo es el balance de masa y energía, y dimensionamiento del equipo. Este tipo de secado permite arreglos de flujo paralelo o en contracorriente, siendo este último el más eficiente para la remoción de la humedad en sólidos, siempre y cuando estos no sean sensibles al calor. Una clasificación de este tipo de secado es con base en las temperaturas de operación, y en relación con la humedad que se removerá. Con temperaturas altas, la transferencia de calor es mayor a la de masa; con temperaturas bajas, el secado es por transferencia de masa en su mayoría. (Treybal, 1997)

2. Clasificación del secado según transporte de calor

La subclasificación de secadores por lotes y continuos se da según la manera en la que se transporta el calor hacia el sólido húmedo en el equipo; directos o indirectos. El secado directo se da cuando la corriente de aire o gas caliente para evaporar el agua tiene contacto directo con el sólido que se secará; pasa por debajo,

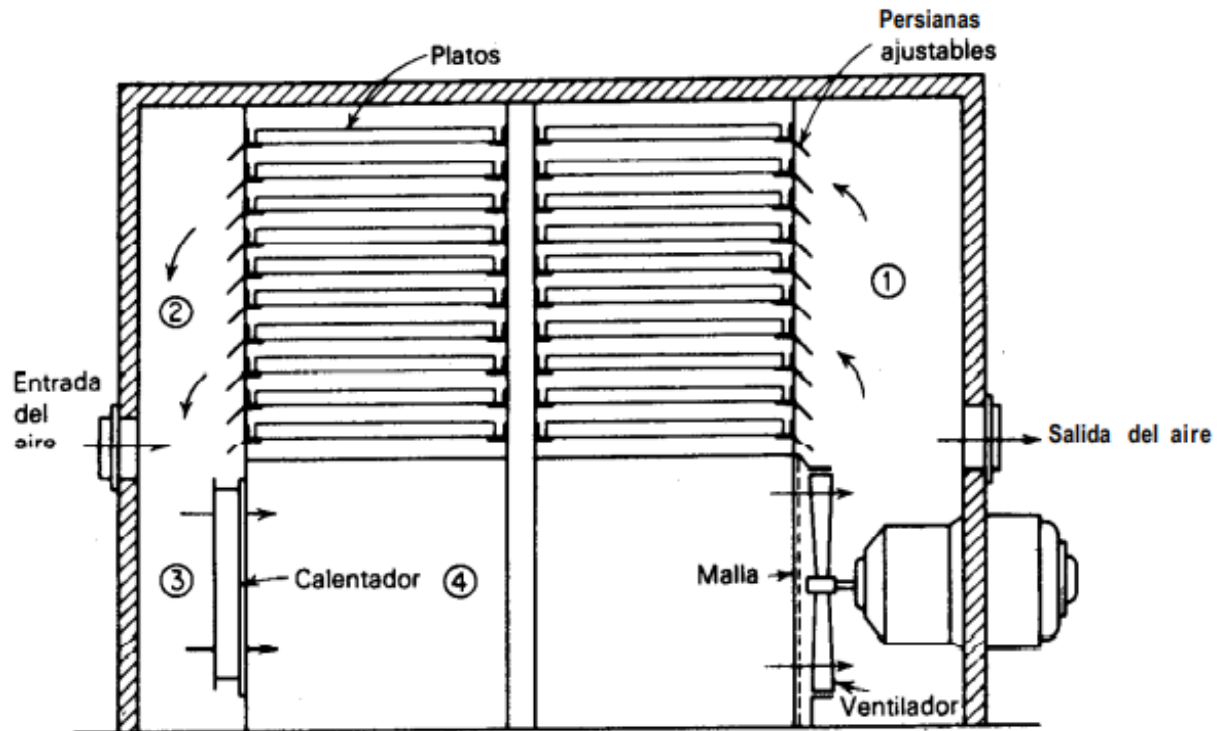
encima o a través de este. Por otro lado, los secadores indirectos emplean carcazas por las cuales circula agua o vapor caliente y transfieren ese calor por conducción al sólido que está sobre la estructura. (Treybal, 1997)

Los tipos de secadores directos, para procesos de secado por lotes se dividen en secadores de platos, de camión, y de circulación transversal. Para el mismo tipo de proceso, pero secadores indirectos existen los de anaqueles al vacío, de charola con agitación, giratorios de vacío, por circulación tangencial, por circulación transversal, y por congelación. Por otro lado, en el caso del secado continuo hay más variedad de equipos, entre los cuales se encuentran los secadores de túnel, tipo turbo, de circulación transversal, rotatorios, por aspersión, de tambor, neumáticos y de lechos fluidizados. (Treybal, 1997)

3. Secador de bandejas por lotes

En el caso del secador de bandejas de la Figura 6, el mecanismo de secado se realiza por lotes. Lo cual indica que las condiciones dentro del equipo varían conforme se ingresa o retira material. Este tipo de equipos es útil para dimensionar el equipo de secado y determinar tiempos de residencia dentro del mismo, bajo condiciones específicas de temperatura y velocidad del aire de secado, y humedad inicial y final del sólido a trabajar. Mediciones en este equipo puede proporcionar las bases para el dimensionamiento de equipos de secado continuo, como secadores rotatorios. (Treybal, 1997)

Figura 6. Secador directo de bandejas por lotes



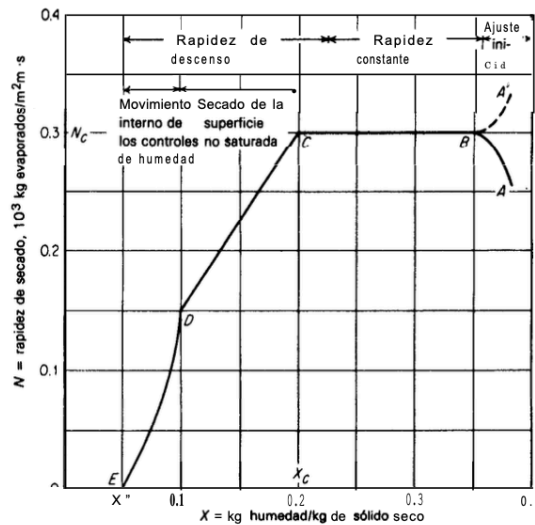
Fuente: Treybal, 1997

4. Curva de secado

Debido a la variación de condiciones internas en los equipos de secado por lotes, la velocidad de evaporación del agua en el sólido cambia. Para determinar el comportamiento de la humedad en el sólido y la rapidez de secado de este se lleva a cabo una curva de secado, como se observa en la Figura 7. La primera zona consiste en el aumento de la temperatura del sólido al ingresar al equipo (segmento AB), posteriormente, se llega al contenido crítico de humedad ya que la película superficial de agua disminuye y en el sólido se forman áreas secas (segmento BC). El final de esta sección existe un punto (X_c , N_c) el cual es el contenido de humedad crítica del sólido, a partir del cual surge un cambio de tendencia de una sección constante, a una sección decreciente. La disminución de la velocidad de secado ocurre, ya que el gradiente de humedad en el sólido cada vez es menor (segmento CD). Por último, se alcanza la humedad de equilibrio del sólido. (segmento DE) (Treybal, 1997)

La curva de secado se construye por medio de mediciones hechas a una muestra del sólido secado, con respecto al tiempo. El material debe ser secado bajo condiciones constantes y controladas de presión y temperatura. Estas mediciones consisten en pesos antes, durante y después del proceso de secado, con las cuales se obtiene la cantidad de humedad en el sólido, con respecto al material seco. Adicionalmente, se debe encontrar la rapidez o tasa de secado según el agua evaporada, con respecto al área y tiempo de secado. En la curva se grafica la humedad calculada en el eje X y la rapidez de secado (N) en el eje Y. Finalmente, estos puntos juntos conforman la curva de secado para el proceso y condiciones establecidas en la prueba. (Treybal, 1997)

Figura 7. Curva de secado por lotes

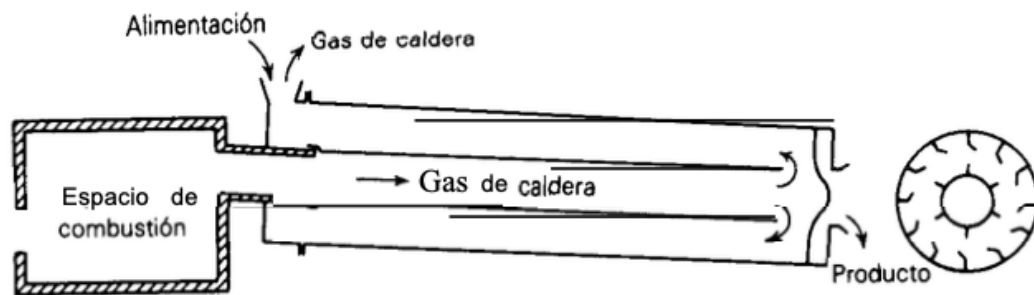


Fuente: Treybal, 1997

5. Secador rotatorio continuo

En la Figura 8 se observa un secador rotatorio continuo, el cual funciona con la constante entrada y salida de material que es secado a contracorriente con gas a mayor temperatura. Algunos de los beneficios de este tipo de equipos son el tamaño pequeño en relación con la cantidad de material a secar, menor costo de secado por unidad, mayor homogeneidad de secado en el sólido (contenido de humedad más uniforme). Estos secadores pueden trabajarse a contracorriente o corriente paralela, lo cual indicaría la dirección del flujo y del material a secar dentro del equipo. En este caso, el parámetro a determinar es el tiempo de retención dentro del secador, que será el tiempo de paso en el equipo desde la alimentación hasta la descarga. Este tiempo es el requerido para lograr llegar a la humedad deseada. (Treybal, 1997)

Figura 8. Secador directo rotatorio continuo

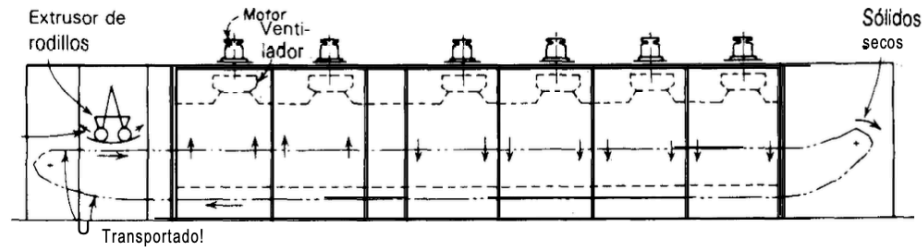


Fuente: Treybal, 1997

6. Secador continuo tipo túnel

Es un tipo de secador continuo que consiste en el paso de material sólido dispuesto en una banda sin fin móvil, a través del secador. Este tipo de secador se asemeja al secado por lotes en bandejas, ya que el material entra al secador en “camas” sobre la banda transportadora, pero funciona de manera continua. El aire caliente de secado puede entrar de manera paralela al flujo, a contracorriente, combinación de ambas o en corriente cruzada. Este tipo de secadores son utilizados en la industria alimenticia, para el secado o deshidratación de frutas, frituras, etc. En la Figura 9 se ilustra un secador tipo túnel de circulación transversal. (Treybal, 1997)

Figura 9. Secador continuo tipo túnel



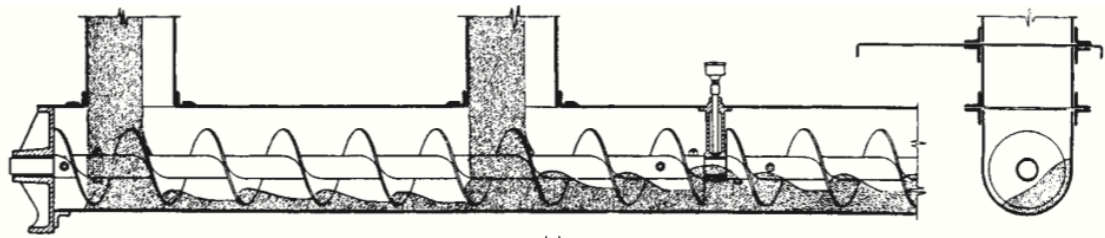
Fuente: Treybal, 1997

G. Almacenamiento y transporte

Existen tipos de sólidos, como el café, que no pueden almacenarse a la intemperie para evitar problemas de calidad, infestación por insectos, entre otros. El café cae dentro de esta categoría, ya que debe ser almacenado de manera en que las condiciones climáticas y del ambiente no afecten su apariencia, sabor, olor e inocuidad. Para almacenar el café se utilizan tolvas o silos, los cuales son recipientes que protegen el material de los factores que podrían afectarlo. En el caso de las tolvas, son depósitos con fondo oblicuo ideales para almacenamiento provisional y alimentación de algún equipo. Dentro de las tolvas, el sólido puede tener un flujo libre o de embudo; el primero indica que la tolva se vacía por completo. El flujo de embudo ocurre cuando se forma una especie de canal al centro del material y solamente una parte del sólido sale de la tolva, lo cual se traduce a acumulación dentro del equipo y pérdidas. El movimiento dentro del contenedor dependerá de las características del material, pero puede evitarse si se emplea una tolva vibratoria, en lugar de una estática. Por otro lado, los silos son recipientes para almacenamiento de sólidos por un intervalo de tiempo más prolongado, de forma cilíndrica, cerrados al ambiente, generalmente con una tapa en forma de domo, y fondo oblicuo. Ambos equipos de almacenamiento son cargados en la parte superior y se descargan en la parte inferior. (McCabe, 2007)

El transporte de sólidos de una etapa de la producción a otra se da por medio de equipos que varían según los requerimientos y características de los materiales. Puede ser mecánico, por acción de una bomba, o neumáticos, por corrientes de aire. Dentro de la primera clasificación están los transportadores de tornillo (Figura 10), cintas transportadoras y elevadores de cangilones. Los primeros consisten en una hélice montada en un eje cuyo giro permite el movimiento de las partículas hacia la dirección establecida. Este tipo de transportadores también funcionan como mezcladores, calentadores o enfriadores y pueden aislarse por medio de sellos. El segundo tipo de transporte mecánico consiste en cintas con cierto grado de inclinación y dirección intercambiable, y pueden usarse en cualquier aplicación de distancias cortas y velocidades lentas. Los elevadores de cangilones se emplean en aplicaciones de movimiento de sólidos verticalmente, y pueden funcionar cerrados o abiertos al ambiente. Las características de material y grosor de construcción, velocidad y tipo de transporte dependen del material que se desea trabajar. (McCabe, 2007)

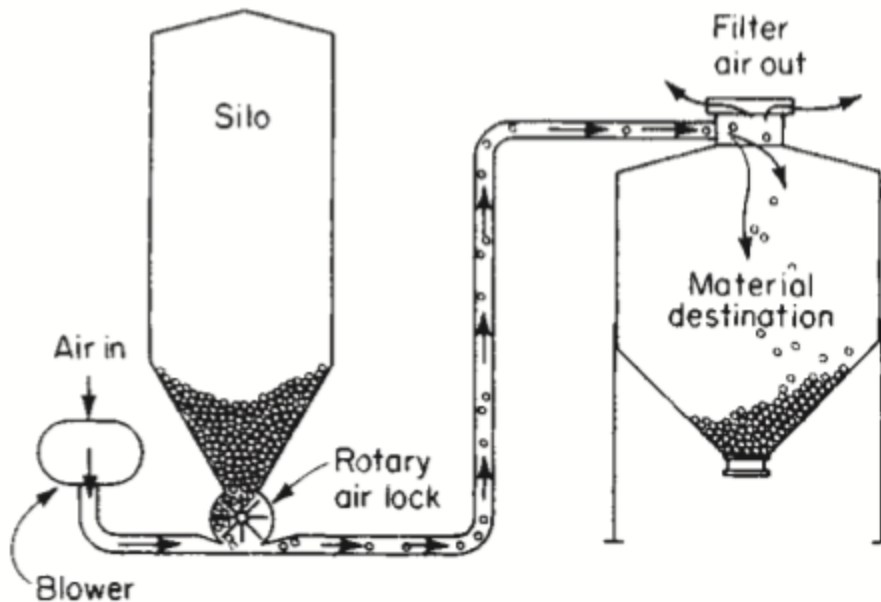
Figura 10. Transportador mecánico de tornillo



Fuente: Perry, 1994

El tipo de transporte neumático funciona por medio de un fluido en suspensión, generalmente aire, que mueve los sólidos de una etapa del proceso a otra. Se clasifican en sistemas de vacío o presión negativa, de presión positiva (Figura 11), de presión – vacío, y prefluidizados. En el primer tipo, el material es succionado en la línea de transporte y se detiene en un tanque al topar con un filtro para separar las corrientes. El segundo tipo consiste en el soplado del material en la corriente de transporte, por medio de un alimentador rotatorio, hasta topar también con un filtro separador. Los sistemas de presión – vacío son una combinación de los dos descritos previamente. Utilizan el vacío para mover el material dentro del transportador y a un separador, y la presión se emplea para mover el material después del separador a un alimentador rotatorio y una corriente de aire posterior. Para el diseño de sistemas de transporte neumático, es necesario emplear nomogramas que ayudarán a establecer parámetros de operación según requerimientos iniciales del proceso. (McCabe, 2007)

Figura 11. Transportador neumático de presión positiva



Fuente: Perry, 1994

H. Empaque, llenado y sellado

El empaque o embalaje es un paso en la producción de un bien, necesario para poder llevar el producto a la venta. Se lleva a cabo para preservar el producto tanto en las características físicas como químicas, en los procesos de carga, transporte, descarga, etc. Se divide en empaque primario, secundario y terciario. El empaque primario es el que está en contacto directo con el producto y es en el cual se da la venta individual del mismo. Estos empaques deben cumplir con normas de etiquetado, según estándares de los distribuidores, regiones o países de venta. El empaque secundario contiene varias unidades del producto en su empaque primario, con alguna información del producto. Este tipo de embalaje protege, facilita y maximiza la capacidad para su transporte y venta a distribuidores. Por último, el tipo terciario es el empaque que se emplea para proteger unidades del empaque secundario para transporte y venta al por mayor, o exportación. (Cervera, 2003)

En el caso del empaque primario, se logra por medio de equipos conocidos como llenadoras. Estos se encargan de distribuir la totalidad del flujo de entrada del material, en el empaque destinado, según la presentación del mismo. Existen llenadoras automáticas, semiautomáticas y manuales; todas cumplen la misma función, con diferencias en la rapidez de llenado (bolsas / min), capacidad de procesamiento (kg / h), presentaciones (g, kg), entre otras. Las llenadoras pueden ser empleadas para empaque de sólidos o líquidos. En el caso de las llenadoras de sólidos, están compuestas por una balanza para establecer el peso que debe ir en cada empaque. Este tipo de equipo se utiliza en la industria alimenticia para el empaque de golosinas, café, hierbas, etc. Para las llenadoras de líquidos, se trabajan generalmente con volumen, según la densidad del material y capacidad del empaque. Este tipo de llenadoras se emplea para bebidas gaseosas, jugos, etc (Oña, 2017). Para proteger los materiales de contaminantes en el ambiente, poder transportar los empaques y demás, se deben sellar de alguna manera. En el caso de bolsas de café, se utilizan selladoras automáticas incluidas en las llenadoras, semiautomáticas o manuales, para cerrar la bolsa. Este sello se lleva a cabo por resistencias y funde el plástico del empaque para evitar la salida del material, sin ser abierto por el consumidor final. (Sedesol, 2008)

I. Infusiones

Las infusiones son un tipo de bebida obtenidas a partir de partes de un fruto y su mezcla con agua caliente. Generalmente, las partes de los frutos que se emplean para hacer infusiones son la cáscara o las hojas, ya que cuentan con la mayor cantidad de beneficios. Generalmente, se seca la parte de la planta o fruto y se obtiene la materia para la infusión. Al ser un producto natural con muchas características fisicoquímicas, al introducirse en agua caliente, se desprenden propiedades, olores y sabores característicos de la infusión. Existen muchas infusiones según su origen, dentro de las cuales se encuentran el té y el café. Las características de las infusiones permiten ser incluidas en dietas nutricionales y de salud, por los beneficios a corto y largo plazo que tienen. Por ejemplo, la actividad antioxidante de las infusiones ayuda a la reducción

de enfermedades crónicas, las propiedades digestivas de estas bebidas permiten evitar malestar gastrointestinal, y otros compuestos como aminoácidos y fibras ayudan al sistema inmune. (Boxler, s.f)

J. Análisis físicoquímicos

1. Humedad

La humedad en un gas es el vapor acompañante de una unidad de masa del gas libre. Para los sólidos, la humedad se refiere al agua que acompaña una unidad de masa del sólido. La humedad relativa es la relación entre la presión parcial del vapor en un gas y la presión de vapor del líquido a la temperatura del gas. Por otro lado, la humedad absoluta es la cantidad de vapor en un gas por unidad de ese gas seco (McCabe, 2007). La determinación de la humedad de un alimento es útil para determinar si cumple con parámetros establecidos, evitar formación de mohos y levaduras, y contar con puntos de partida para un proceso de secado. El equipo para medir esta propiedad es la balanza de humedad, la cual seca el material por medio de resistencias. En esta se establece temperatura y el método de secado, se introduce la muestra, y se hace la lectura del resultado al finalizar el secado. (PCE Ibérica, 2014)

2. Antioxidantes y polifenoles

Los antioxidantes son compuestos que interactúan con radicales libres para neutralizarlos. Existen muchas enfermedades causadas por el ataque de radicales libres a las células, degradando los tejidos humanos y alterando la capacidad de los mismos de regenerarse. Ejemplos de esto son el cáncer, hipertensión arterial y enfermedades cardiovasculares. Sin embargo, estos radicales aportan en procesos saludables del cuerpo humano, por lo cual es necesario un balance que ayude a disminuir la cantidad de perjuicios a la salud. Los polifenoles conforman una subclasificación de antioxidantes de origen vegetal, exclusivamente. Estos compuestos se encuentran en la piel o cáscara de muchas frutas y verduras (Causse, 2010). La medición de antioxidantes y polifenoles es importante para determinar beneficios y valor agregado de los productos. Un método para la determinación de antioxidantes es por medio de la interacción de estos compuestos con radicales libre de DPPH. Para la medición de polifenoles, se lleva a cabo la reacción entre estos compuestos y el reactivo Folin – Ciocalteu. Ambas lecturas corresponden a la absorbancia de la solución, posterior a 30 minutos de reacción, en un espectrofotómetro, y se corrige según la curva de calibración adecuada. (Rosales, 2019)

3. Cafeína

La cafeína es un alcaloide químico con fórmula $C_8H_{10}N_4O_2$. Esta molécula estimula el sistema nervioso central, provocando cambios de ánimo, carácter y energía, por un intervalo de tiempo. También tiene efectos diuréticos, evita la fatiga y la somnolencia. Las moléculas de cafeína bloquean los receptores de adenosina, la cual es un regulador de la actividad cerebral y del sueño (Spiller, 2019). La medición de cafeína es necesaria para determinar valor agregado del producto, y que este valor esté dentro de un rango saludable.

Un método para la determinación de cafeína es por medio de la lectura un cromatograma resultante del análisis de soluciones en un HPLC. (Torres, 2018)

4. Ácido clorogénico

El ácido clorogénico es un tipo de ácido polifenólico químico con fórmula $C_{16}H_{18}O_9$. Es un compuesto representativo del café, ya que el grano verde es la fuente principal de estas moléculas. Son considerados agentes hipotensores, que también reducen la absorción de glucosa, inhiben la formación de factores cancerígenos en el ADN, y reducen ansiedad (Gil, 2010). La medición de ácido clorogénico es útil para indicar un valor agregado en el producto. Al igual que la cafeína, un método para cuantificar el ácido clorogénico es por medio de la lectura un cromatograma resultante del análisis de soluciones en un HPLC. (Torres, 2018)

5. Azúcares

Los azúcares son moléculas químicas conocidas como monosacáridos o polisacáridos. Los primeros son cadenas formadas por átomos de carbono con grupos $-OH$, que forman aldehídos o cetonas, en cada carbono. Los monosacáridos son carbohidratos sencillos, es decir, azúcares simples. Por otro lado, los polisacáridos moléculas formadas por muchos monosacáridos juntos; un conjunto de azúcares simples unidas. Los azúcares se dividen en naturales y añadidos, siendo los primeros los que están contenidos en los alimentos de manera natural. Alimentos con este tipo de azúcares son beneficiosos en la salud ya que son fuente de fibra, minerales, vitaminas y proteínas (Peña, 2002). La cuantificación de azúcares totales es útil para la identificación de tipos de mono y polisacáridos presentes, y sus beneficios. Un método conocido para cuantificar azúcares consiste también en la lectura un cromatograma resultante del análisis de soluciones en un HPLC (Torres, 2018).

6. Actividad de agua

Muchas propiedades de los alimentos dependen de la cantidad de agua que está presente en ellos. Sin embargo, es un aspecto que debe controlarse, ya que podría propiciar cambios de estabilidad y degradación del producto, y disminuir su vida útil. La actividad de agua es la fracción de humedad libre, es decir no ligada, al alimento, que puede provocar estas variaciones. En la Tabla 1 se observa que, en los alimentos para el consumo humano, la actividad de agua varía de 0.97 en frutas frescas enlatadas, a 0.10 en el azúcar. Para los frutos secos, el valor de la actividad de agua debe estar en 0.73 para evitar crecimiento de bacterias en el producto. La medición de esta característica puede darse por medio de un higrómetro de punto de rocío, equipo que equilibra la humedad relativa de la cámara y la muestra para determinar su potencial hídrico. (Becerra, 2016)

Tabla 1. Actividad de agua en alimentos de consumo humano

Alimento	Aw
Frutas frescas enlatadas	0.97
Verduras	0.97
Jugos	0.97
Huevos	0.97
Carne	0.97
Queso	0.95
Pan	0.94
Mermeladas	0.86
Frutas secas	0.73
Miel	0.70
Huevo en polvo (5 % de humedad)	0.40
Galletas, cereales	0.35
Azúcar	0.10

Fuente: Badui, 2006

NOTAS

*El valor mínimo de actividad de agua para el crecimiento de microorganismos de importancia en alimentos se encuentra en el rango de 0.6 a 0.96. (Becerra, 2016)

K. Balance de masa y energía

Debido a la ley de conservación de materia, es necesario emplear balances para corroborar que, durante un proceso, no hay generación o pérdida de masa. Esto es debido a que la masa permanece constante, no se crea ni se destruye, solamente se transforma y transfiere. En cualquier parte del equipo o proceso en general, se deben cumplir los balances de masa, tanto para la materia transformada, como para compuestos que atraviesan el sistema sin ser modificados. En casos en los cuales no hay reacción química, el balance se reduce a que las entradas serán iguales a las salidas más la acumulación que se da en el sistema. Por otro lado, si existe reacción química, se debe agregar la generación del componente. Al igual que en el balance de masa, las entradas deben coincidir con las salidas en un balance de energía, cumpliendo con la ley de conservación de la energía. De igual manera debe englobar todo el sistema y cumplirse para cada equipo o parte también. En este caso, las formas de energía que son pertinentes y deben incluirse son la cinética, potencial, entalpía, el calor y trabajo. En este caso, el balance indica que el cambio neto de energía es igual a la diferencia entre la energía que entra al sistema y la que sale de este. (McCabe, 2007)

L. Análisis económico

Un análisis económico es un estudio que involucra los aspectos financieros de una inversión, con el fin de establecer aspectos como la rentabilidad o viabilidad de un proyecto. Dentro de este tipo de evaluación se da la interacción de factores característicos, según el nivel de detalle correspondiente, como el costo de los equipos, mano de obra, materia prima, entre otros. Dicha relación resulta en indicadores que definen los beneficios o productividad de una inversión. Estos indicadores pueden ser la tasa interna de retorno, el tiempo de recuperación de inversión, punto de equilibrio, flujos de caja, etc. Según los datos anteriores, un inversionista o empresa puede tomar la decisión de optar o no por nueva maquinaria, planta, proyecto, etc. (Blank, 2012)

M. Ecuaciones

Ecuación 1. Tasa de evaporación de humedad durante el proceso de secado de pulpa de café

$$N = \frac{m_{H_2O}}{\Delta t * A}$$

*En donde: m_{H_2O} representa la cantidad de agua evaporada en un intervalo de tiempo Δt , por unidad de área de pulpa A.

Ecuación 2. Humedad restante en la muestra de pulpa de café durante el proceso de secado

$$X_i = \frac{m_0 - m}{m_s}$$

*En donde: m_0 representa la masa inicial de la muestra, m la masa en el momento del pesaje y m_s la masa de pulpa seca en su totalidad.

Ecuación 3. Humedad absoluta en la pulpa de café durante el proceso de secado

$$X = \frac{x}{1 - x}$$

*En donde: x representa la humedad relativa del agua en el sólido.

*La misma ecuación es aplicable para calcular la humedad absoluta del aire de secado.

Ecuación 4. Cantidad de pulpa en base seca para balances de masa

$$S_S = (m_p) * (1 - x)$$

*En donde: m_p representa la masa o flujo de pulpa, según corresponda, y x es la humedad contenida en la pulpa.

Ecuación 5. Agua evaporada en el proceso de secado de pulpa de café

$$H_2O = (S_S) * (x_0 - x_1)$$

*En donde: S_S representa la cantidad de pulpa en base seca, x_0 es la humedad inicial y x_1 la humedad final contenida en la pulpa.

Ecuación 6. Entalpía del aire de secado

$$H'_G = (1005 + 1884 * Y_i) * T_{Gi} + 25023000 * Y_i$$

*En donde Y_i es la humedad absoluta del aire y T_{Gi} es su temperatura.

*La ecuación presentada es utilizada para sistemas aire – agua (Treybal, 1997).

Ecuación 7. Entalpía de la pulpa de café en el proceso de secado

$$H'_S = (C_{Ps} * \Delta T) + (X_0 * C_{Pa}) * (T_0 - T_{ref})$$

*En donde C_{Ps} es la capacidad calorífica de la pulpa, ΔT es su cambio de temperatura en el proceso, X_0 es la humedad absoluta del sólido y T_0 es su temperatura inicial y T_{ref} es la referencia de los datos (0 °C).

Ecuación 8. Balance de masa del proceso de secado a corriente cruzada

$$G_S(Y_1 - Y_0) = S_S(X_0 - X_1)$$

*En donde: G_S representa la cantidad de aire en base seca, Y_1 es la humedad absoluta del aire de salida y Y_0 es la humedad absoluta del aire de entrada. X_0 representa la humedad absoluta de la pulpa a la entrada y X_1 es la humedad absoluta de la pulpa a la salida del secado.

Ecuación 9. Balance de energía del proceso de secado a corriente cruzada

$$G_S(H_{G1} - H_{G0}) + Q = S_S * (H_{S0} - H_{S1})$$

*En donde: G_S representa la cantidad de aire en base seca, H_{G1} es entalpía del aire de salida y H_{G0} es la entalpía del aire de entrada. H_{S0} representa la entalpía de la pulpa a la entrada, H_{S1} es la entalpía de la pulpa a la salida del secado y Q representan las pérdidas de calor.

Ecuación 10. Largo de un secador de túnel con aire a corriente cruzada

$$Z = N_{TOG} * H_{TOG}$$

* N_{TOG} se refiere a la cantidad de unidades de transferencia de calor y H_{TOG} es la altura de cada una de las unidades de transferencia de calor.

V. ANTECEDENTES

A. Café

En abril de 2008, la Federación Nacional de Cafetaleros en Colombia publicó un estudio realizado para establecer características y las relaciones entre las diferentes partes del grano y este mismo en diferentes etapas. Se determinó también propiedades como densidad, peso, calidad, y conversiones para los granos de café. La experimentación consistió en la recepción del café recién cosechado, despulpado, fermentación, lavado y secado, tomando en cuenta pesos, dimensiones, volúmenes y demás. Dentro de muchos de los resultados, se encuentran características de densidad, dimensiones y pesos, así como conversiones a partir del fruto a algún componente específico. (Tabla 1) (Montilla, 2008)

Tabla 2. Factores de conversión para transformaciones entre estados del grano de café

Para convertir de	A	Café seleccionado	Café sin seleccionar
Cereza	Pergamino	0.20	0.20
	Baba	0.55	0.55
	Almendra	0.16	0.16
	Húmedo	0.39	0.41
	Pulpa fresca	0.43	0.43

Fuente: Montilla, 2008

En relación al proceso de beneficio, la Federación Nacional de Cafetaleros en Colombia realizó una investigación acerca de la etapa de fermentación del café, publicada en abril de 2015. Dados los avances tecnológicos y de innovación en este campo, esta parte del beneficio ha tomado importancia en muchas regiones. Esto ha permitido la experimentación con fermentaciones controladas para lograr notas de olor y sabor según requerimientos o añadidura de frutos o nutrientes adicionales. Se demostró que el control más riguroso de parámetros como el tiempo en el fermentador, condiciones de temperatura, tipo de sistema y el sustrato, permite dar al producto final un valor agregado. Según la variación de estos factores, se lograron notas diferentes entre dulces, cítricos, frutales y tostados. (Puerta – Quintero, 2000)

B. Subproductos del café

La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia publicó en marzo de 2010 un estudio acerca de los usos de subproductos del café, con enfoque en la generación de energía renovable. En el caso de la pulpa, se evaluó su uso como combustible, para producción de biogás y de bioetanol. En el caso del mucílago, los usos

planteados fueron producción de biogás, bioetanol y de etanol. Para la cascarilla se experimentó con su uso directo como combustible. (Valencia, 2010)

C. Usos de subproductos

En Guatemala, se ha llevado a cabo varios estudios acerca de alternativas de uso de los desechos del café. Entre estos se encuentra la investigación realizada por el Ingeniero Gamaliel Zambrano, del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, junto con el Fondo Nacional de la Ciencia y Tecnología: Determinación y evaluación de la producción de biodiésel a partir de desechos de extracción de la bebida de café. El proyecto se basó en el uso de aceite del subproducto conocido como “shinga” o poso del café, el cual es obtenido después del proceso de extracción de la molienda con agua caliente. Este trabajo se realizó con el objetivo de proponer un uso alternativo del desecho mencionado, cuyo aceite sería la materia prima para la producción local de biodiésel, dada la alta demanda de combustibles importados, derivados del petróleo (Zambrano, 2015). En línea con lo mencionado anteriormente, en el mismo departamento, se realizó una investigación similar cuyo resultado de extracción fue 15.58 ± 0.01 % m/m de la “shinga” del residuo de extracción de la bebida tipo espresso. (González, 2015)

Adicional a los estudios descritos con anterioridad, en el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, se evaluó la producción de etanol a partir de la pulpa del café de la variedad Bourbon. La experimentación se realizó por medio de una hidrólisis ácida de la muestra de pulpa previamente prensada, fermentación de la solución obtenida con *Saccharomyces cerevisiae*. Los métodos de extracción fueron dos distintos; el primero se basó en el uso de la pulpa fresca proveniente del beneficio húmedo y el segundo se basó en el secado y molienda de la pulpa previo al prensado. Los resultados fueron una producción de 17.0 ± 0.2 g de etanol/kg de pulpa de café y 16.1 ± 0.2 g de etanol/kg de pulpa de café, para el primer y segundo método, respectivamente. (Vásquez, 2021)

En el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, se realizó la extracción de ácido clorogénico de la pulpa de café, con el fin de evaluar una alternativa para su aprovechamiento y proponer una planta piloto para la extracción del compuesto. Se llevó a cabo la experimentación de extracciones con agua destilada y con solución de etanol al 60 % v/v. El resultado más alto de extracción fue 789.02 ± 9.73 ppm de ácido clorogénico (en extracción con etanol). La planta piloto propuesta consistió en tanques de almacenamiento para pulpa fresca y solución de ácido clorogénico, tornillo sin fin para transporte del material, molino húmedo para la molienda de la pulpa, tanque de mezclado con sistema de agitación y calentamiento, y un filtro para la remoción de sólidos. (Garzaro, 2021)

En la Universidad del Valle de Guatemala, en el departamento de Ingeniería en Ciencias de los Alimentos, se llevó a cabo una investigación y experimentación acerca de la producción de harina a partir de la pulpa del café. Adicionalmente a la propuesta de la metodología, se realizó una caracterización del

producto final, la cual resultó en actividad de agua de 0.380 ± 0.003 y humedad de 7.01 ± 0.07 %. Posterior a la caracterización mencionada, se formuló la producción de galletas y se hizo un análisis sensorial del producto. El rubro con puntaje más alto en el análisis organoléptico fue el color de las muestras, con un valor de 7.22 ± 1.49 (Pacay, 2019). En la misma facultad y departamento del estudio anterior, se realizó un estudio acerca de la producción de pan a partir de pulpa de café tipo arábica. El resultado principal fue la determinación de la fibra en el pan francés, de 34.73 %. (Joachín, 2004)

Según un estudio publicado en 2021, por la editorial digital MDPI con sede en Suiza, se experimentó la producción de una bebida alcohólica con pulpa y mucílago provenientes del proceso del café. Se llevó a cabo una fermentación de estos componentes por un intervalo de tiempo de 12 a 16 días. Se realizó un análisis fisicoquímico cuyos datos están en la Tabla 2, para las bebidas alcohólicas provenientes de pulpa (AP), mucílago (AM) y mucílago con granos de café. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis sensorial para las tres bebidas obtenidas resultando en los datos de la Tabla 3. (KC, 2021)

Tabla 3. Análisis fisicoquímico de las bebidas alcohólicas obtenidas

Detalle	AP	AM	AMS
Metanol (mg/L)	335 ± 1.21	298.9 ± 0.28	313.2 ± 1.81
Ésteres (ppm)	70.58 ± 1.45	38.21 ± 6.09	33.86 ± 3.29
Aldehídos (ppm)	9.15 ± 0.877	22 ± 0.4	42.94 ± 1.5
Alcohol (ABV %)	8.867 ± 0.067	8.707 ± 0.092	8.25 ± 0.026
Acidez (%)	0.411 ± 0.02	0.393 ± 0.005	0.443 ± 0.011
Cafeína (ppm)	30.94 ± 0.674	21.29 ± 0.643	42.44 ± 0.737
Polifenoles (mg GAE/g extracto seco)	845.7 ± 14.36	554 ± 7.93	709.7 ± 4.5

Fuente: KC, 2021

Tabla 4. Análisis sensorial de las bebidas alcohólicas obtenidas

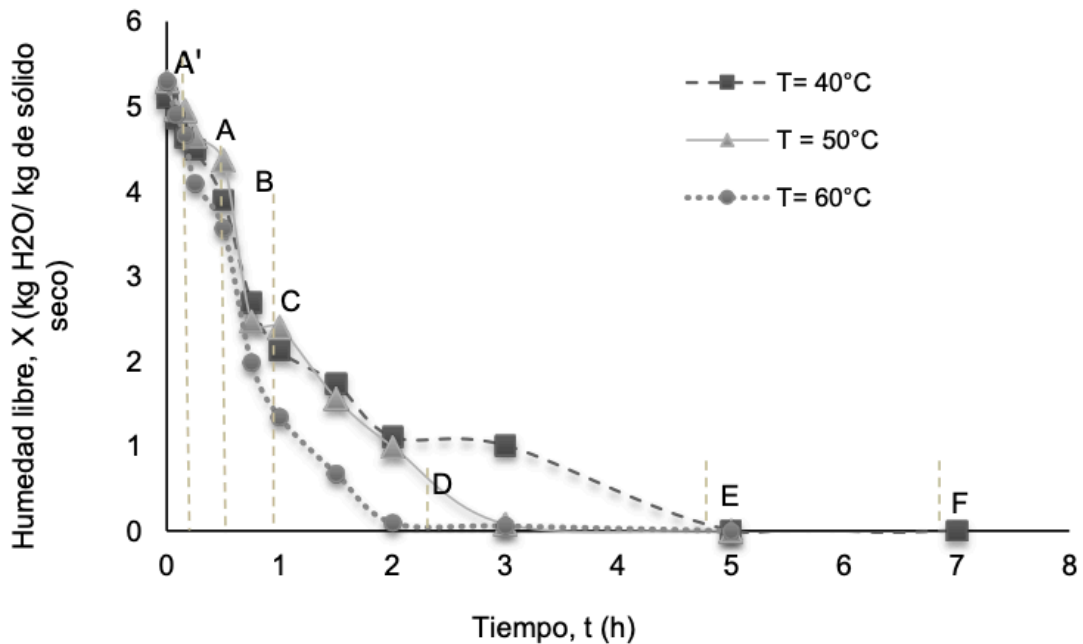
Detalle	Apariencia	Aroma	Sabor	Regusto	Aceptación general
AM	9.03 ± 2.53	18.89 ± 4.9	21.21 ± 3.73	10.32 ± 2.32	6.35 ± 1.25
AMS	9.07 ± 2	20.11 ± 5.07	21.96 ± 4.17	11.11 ± 3.17	6.32 ± 1.56
AP	11.07 ± 2.19	21.86 ± 3.71	23 ± 2.34	12.21 ± 1.67	8.25 ± 0.7

Fuente: KC, 2021

Un estudio de 2018, realizado por estudiantes de la Universidad la Gran Colombia, se basó en el aprovechamiento de la pulpa de café para la producción de una infusión. Se secó la pulpa en una estufa a 60 °C, por 420 minutos. El producto obtenido se colocó en tela filtrante y se evaluó sus propiedades antioxidantes sumergiendo muestras en agua variando tiempos, según las diferentes temperaturas del líquido. La determinación de la actividad antioxidante fue por el método de DPPH, resultando en alta capacidad antioxidante de 2024.26 $\mu\text{M ET/g}$. También para determinar los antioxidantes de la pulpa en su uso como infusión, se realizó un estudio en la Universidad Nacional de Colombia, seguido de un análisis sensorial. En este caso, la pulpa se liofilizó y los resultados fueron punteos de 3.51 a 4.04, en una escala del 1 a 5 en la catación del producto, lo cual indicó una buena aceptación del mismo ante los panelistas. Los resultados demostraron que el subproducto puede ser revalorizado y utilizado como materia prima para producir otro bien de consumo humano, con buena aceptación en el mercado. (Serna, 2018)

Se llevó a cabo un secado de pulpa de café, en la Universidad la Gran Colombia, con el fin de establecer las condiciones del proceso y el efecto en las propiedades fisicoquímicas de la pulpa. La experimentación consistió en realizar curvas de secado a 40, 50 y 60 °C, hasta lograr humedad de 13.5 % en la pulpa. En la Figura 12 se observa la relación de la humedad libre en la pulpa y el tiempo de secado. Se observa en la gráfica, el aumento de tiempo de residencia en el equipo de secado a medida que disminuye la temperatura. En secadores por lotes, el aumento de tiempo de secado se traduce a una disminución de eficiencia y aumento del costo de energía eléctrica del equipo. (Torres, 2018)

Figura 12. Curva de secado a cada temperatura, en función del tiempo



Fuente: Torres, 2018

VI.METODOLOGÍA

A. Revisión bibliográfica

- Realizar una revisión de literatura acerca del proceso de producción del café, sus tipos y características. Investigar también acerca del beneficio húmedo y seco, sus equipos, subproductos generados y las posibles alternativas de uso para estos materiales.

B. Identificación de características a evaluar de la pulpa

- Definir las características a evaluar de la pulpa previo y posterior al proceso de secado:
 - Por medio de HPLC:
 - Cafeína
 - Ácido clorogénico
 - Azúcares
 - Por medio de espectrofotometría UV – VIS
 - Antioxidantes
 - Polifenoles
 - Por medio de digestión y determinación por método Duma
 - Nitrógeno
 - Por medio de digestión ácida con microondas y lectura de espectrometría de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente
 - Fósforo
 - Potasio
 - Calcio
 - Magnesio
 - Azufre
 - Cobre
 - Hierro
 - Manganeso
 - Zinc
 - Por medio de gravimetría
 - Cenizas
 - Carbono orgánico
 - Materia orgánica
 - Por medio de potenciometría

- pH
- Por medio de balanza de humedad
 - Humedad
- Por medio de higrómetro de punto de rocío
 - Actividad de agua

C. Selección de pulpa

- Visitar el beneficio húmedo de una finca localizada en la región de Acatenango, Chimaltenango, durante la cosecha de café.
- Obtener bolsas de 50 libras de pulpa fresca correspondiente al tipo de café Catuai Rojo, que representa el 85 % de la producción de la finca de café en cuestión, para la caracterización del subproducto y elaboración de las curvas de secado.
- Al finalizar el período de la cosecha, acumular pulpa fresca en bolsas de plástico de 50 libras y guardar en el cuarto congelado del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Someter la pulpa congelada a un proceso de descongelamiento para su posterior uso en la caracterización del producto final, luego del proceso de secado, para pruebas y curvas de secado.

D. Caracterización de pulpa fresca y seca

1. Análisis fisicoquímico de la pulpa fresca y seca

- Medición de humedad de la pulpa fresca y seca

Tabla 5. Reactivos, materiales y equipos para la medición de humedad de la pulpa

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Humedad	-	Balanza de humedad marca OHAUS modelo MB120

- Encender la balanza de humedad y programar un método estándar de secado para pulpa de café a 120 °C y modo de desconexión de 1 mg / 120 s.
- Colocar el plato dentro del equipo y cerrar para tarar.
- Agregar de 1 a 3 gramos de la muestra de pulpa fresca o seca sobre el plato del equipo y cerrar la tapa.
- Realizar la lectura del dato en el equipo cuando la alarma de finalización de medición se active y en la pantalla se muestre la humedad final.

- Repetir el procedimiento anterior en cuadruplicado.
- **Medición de antioxidantes de la pulpa fresca y seca**

Tabla 6. Reactivos, materiales y equipos para la medición de antioxidantes

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Antioxidantes	Pulpa fresca Pulpa seca Metanol 80 % v/v Agua destilada DPPH Ácido ascórbico Filtros circulares con poro de 90 mm	Balanza analítica marca OHAUS modelo PA 11 Espectrofotómetro UV – VIS marca Thermo Spectronic modelo Genesys 20

- Preparar una solución de metanol al 80 % v/v, vertiendo 200 ml de metanol en un balón de 250 ml y aforar con agua destilada.
- Preparar cuatro muestras triturando aproximadamente 5 gramos de pulpa para cada una y extraerlos en 50 ml de la solución de metanol al 80 % v/v, en beakers.
- Agitar cada beaker en una estufa con sistema de agitación, sin calor, por 60 minutos y filtrar la solución de cada muestra en embudos con papel filtro de 90 mm.
- Colocar cada solución en un frasco ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y guardar en la nevera a 4 °C para preservarla.
- Preparar una solución de reactivo DPPH, pesando 0.0244 g del reactivo y aforar en un balón de 100 ml con metanol, verter en un frasco color ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y colocar en la nevera a 4 °C.
- Preparar una solución de ácido ascórbico, pesando 0.0100 g del reactivo y aforar en un balón de 100 ml con agua destilada, cubrir el balón con papel aluminio para evitar reacciones con fotones de luz.
- Construcción de curva de calibración con la solución de ácido ascórbico para la determinación de antioxidantes
 - Verter 100 µL de ácido ascórbico en un tubo de ensayo, añadiendo 2900 µL de la solución de metanol y 1000 µL de la solución de DPPH.
 - Agitar y dejar en un área en ausencia de luz por 30 minutos, para que la reacción de inhibición dé en su totalidad.
 - Repetir el procedimiento anterior, haciendo soluciones con 100 µL más de ácido ascórbico, 100 µL menos de metanol y la misma cantidad de solución de DPPH.

- Llenar la celda del espectrofotómetro con cada solución de muestra, cuidadosamente hasta la marca de aforo, y colocar en el compartimiento para la muestra.
 - A una longitud de onda de 517 nm, tomar nota de la lectura de absorbancia.
 - Realizar la curva de calibración con las soluciones que contengan hasta 700 μL de ácido ascórbico.
 - Construcción de curva para la determinación de antioxidantes de cada muestra
 - Verter 50 μL de la solución de muestra en un tubo de ensayo, añadiendo 2950 μL de la solución de metanol y 1000 μL de la solución de DPPH.
 - Agitar y dejar en un área en ausencia de luz por 30 minutos, para que la reacción de inhibición dé en su totalidad.
 - Repetir el procedimiento anterior, haciendo soluciones con 75 μL más de solución muestra, 75 μL menos de metanol y la misma cantidad de solución de DPPH.
 - Llenar la celda del espectrofotómetro con cada solución de muestra, cuidadosamente hasta la marca de aforo, y colocar en el compartimiento para la muestra.
 - A una longitud de onda de 517 nm, tomar nota de la lectura de absorbancia.
 - Realizar la curva de mediciones de muestras, con las soluciones que contengan hasta 500 μL de solución muestra.
 - Obtener el coeficiente de correlación de la curva y su ecuación de regresión, para determinar el IC 50 de antioxidantes totales en cada muestra.
 - Realizar la lectura y determinación del indicador de antioxidantes, en duplicado para cada muestra.
- Medición de polifenoles de la pulpa fresca y seca

Tabla 7. Reactivos, materiales y equipos para la medición de polifenoles

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Polifenoles	Pulpa fresca Pulpa seca Metanol 80 % v/v	Balanza analítica marca OHAUS modelo PA 11

Agua destilada	Espectrofotómetro
Folin – Ciocalteu 10 % v/v	UV – VIS marca Thermo
Carbonato de sodio 7.5 % m/v	Spectronic modelo Genesys
Ácido tánico	20
Ácido gálico	
Filtros circulares con poro de 90 mm	

- Preparar una solución de metanol al 80 % v/v, vertiendo 200 ml de metanol en un balón de 250 ml y aforar con agua destilada.
- Preparar cuatro muestras triturando aproximadamente 5 gramos de pulpa para cada una y extraerlos en 50 ml de la solución de metanol al 80 % v/v, en beakers.
- Agitar cada beaker en una estufa con sistema de agitación, sin calor, por 60 minutos y filtrar la solución de cada muestra en embudos con papel filtro de 90 mm.
- Colocar cada solución en un frasco ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y guardar en la nevera a 4 °C para preservarla.
- Preparar una solución de carbonato de sodio al 7.5 % m/v, pesando 7.502 g del reactivo y aforar en un balón de 100 ml con agua destilada, verter en un frasco color ámbar para evitar reacciones con fotones de luz.
- Preparar una solución del reactivo Folin – Ciocalteu al 10 % v/v, vertiendo 10 ml del reactivo y aforar en un balón de 100 ml con agua destilada, verter en un frasco color ámbar para evitar reacciones con fotones de luz.
- Construcción de curva de calibración con la solución de ácido tánico para la determinación de polifenoles
 - Preparar una solución de ácido tánico, pesando 0.10 g de ácido tánico y aforar con agua destilada en un balón de 100 ml.
 - Verter 100 µL de ácido tánico en un tubo de ensayo, añadiendo 900 µL de agua destilada, 2000 µL de carbonato de sodio y 2500 µL de la solución del reactivo Folin – Ciocalteu.
 - Repetir el procedimiento anterior, haciendo soluciones con 100 µL más de ácido tánico, 100 µL menos de agua destilada, 2000 µL de carbonato de sodio y 2500 µL de la solución del reactivo Folin – Ciocalteu.
 - Agitar y dejar en un área en ausencia de luz por 30 minutos, para que la reacción de inhibición dé en su totalidad.
 - Llenar la celda del espectrofotómetro con cada solución de muestra, cuidadosamente hasta la marca de aforo, y colocar en el compartimiento para la muestra.
 - A una longitud de onda de 765 nm, tomar nota de la lectura de absorbancia.

- Realizar la curva de calibración con las soluciones que contengan hasta 900 μL de ácido tánico.
 - Construcción de curva de calibración con la solución de ácido gálico para la determinación de polifenoles
 - Preparar una solución de ácido tánico, pesando 0.10 g de ácido gálico y aforar con agua destilada en un balón de 100 ml.
 - Verter 100 μL de ácido gálico en un tubo de ensayo, añadiendo 900 μL de agua destilada, 2000 μL de carbonato de sodio y 2500 μL de la solución del reactivo Folin – Ciocalteu.
 - Repetir el procedimiento anterior, haciendo soluciones con 100 μL más de ácido gálico, 100 μL menos de agua destilada, 2000 μL de carbonato de sodio y 2500 μL de la solución del reactivo Folin – Ciocalteu.
 - Agitar y dejar en un área en ausencia de luz por 30 minutos, para que la reacción de inhibición dé en su totalidad.
 - Llenar la celda del espectrofotómetro con cada solución de muestra, cuidadosamente hasta la marca de aforo, y colocar en el compartimiento para la muestra.
 - A una longitud de onda de 765 nm, tomar nota de la lectura de absorbancia.
 - Realizar la curva de calibración con las soluciones que contengan hasta 900 μL de ácido gálico.
 - Construcción de curva para la determinación de polifenoles de cada muestra
 - Verter 200 μL de la solución de muestra en un tubo de ensayo, añadiendo 800 μL de agua destilada, 2000 μL de la solución de carbonato de sodio y 2500 μL de la solución del reactivo Folin – Ciocalteu.
 - Agitar y dejar en un área en ausencia de luz por 30 minutos, para que la reacción de inhibición dé en su totalidad.
 - Llenar la celda del espectrofotómetro con cada solución de muestra, cuidadosamente hasta la marca de aforo, y colocar en el compartimiento para la muestra.
 - A una longitud de onda de 765 nm, tomar nota de la lectura de absorbancia.
 - Realizar las mediciones de todas las muestras y corregir las lecturas con las ecuaciones de regresión de las curvas de calibración de ácido gálico y tánico.
 - Realizar la lectura y determinación de polifenoles, en duplicado para cada muestra.
 - Sumar los valores correspondientes de cada par de muestras para determinar los polifenoles totales, en términos de ácido gálico y tánico, en las muestras de pulpa de café.

- **Medición de cafeína de la pulpa fresca y seca**

Tabla 8. Reactivos, materiales y equipos para la medición de cafeína

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Cafeína	Pulpa fresca Pulpa seca Cafeína Metanol 80 % v/v Agua destilada Filtros circulares con poro de 90 mm	Balanza analítica marca OHAUS modelo PA 11 HPLC marca Perkin Elmer

- Preparar una solución de metanol al 80 % v/v, vertiendo 200 ml de metanol en un balón de 250 ml y aforar con agua destilada.
- Preparar cuatro muestras triturando aproximadamente 5 gramos de pulpa para cada una y extraerlos en 50 ml de la solución de metanol al 80 % v/v, en beakers.
- Agitar cada beaker en una estufa con sistema de agitación, sin calor, por 60 minutos y filtrar la solución de cada muestra en embudos con papel filtro de 90 mm.
- Colocar cada solución en un frasco ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y guardar en la nevera a 4 °C para preservarla.
- Colocar la solución en un frasco ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y guardar en la nevera a 4 °C para preservarla.
- Construcción de curva de calibración para la determinación de cafeína
 - Pesar 0.00250 gramos de cafeína en un beaker para hacer la solución madre de 100 ppm.
 - Trasvasar el contenido en un balón de 25 ml y aforar con agua destilada.
 - Agitar la solución y realizar diluciones con agua destilada, correspondientes para 5, 10, 15, 20 y 25 ppm.
 - Filtrar las soluciones con filtros tipo jeringa de 0.45 µm y trasvasar a viales.
 - Introducir los viales al equipo para su análisis en el HPLC, con agua ultrapura como fase móvil.
 - Obtener cromatogramas relacionando el tiempo de retención en el equipo (eje x) y la absorbancia (eje y), para cada solución.
 - Para cada cromatograma, determinar el área bajo la curva correspondiente al pico de la cafeína, empleando la fórmula del área de un triángulo.
 - Construir la curva de calibración para la cafeína.
- Medición de cafeína en muestras
 - Realizar dilución de 2500 µm de cada solución muestra de pulpa fresca en balones de 25 ml y aforar con agua destilada.

- Realizar dilución de 400 μm de cada solución muestra de pulpa seca en balones de 25 ml y aforar con agua destilada.
 - Filtrar las soluciones con filtros tipo jeringa de 0.45 μm y trasvasar a viales.
 - Introducir los viales al equipo para su análisis en el HPLC, con agua ultrapura como fase móvil.
 - Obtener cromatogramas relacionando el tiempo de retención en el equipo (eje x) y la absorbancia (eje y), para cada solución.
 - Para cada cromatograma, determinar el área bajo la curva correspondiente al pico de la cafeína, empleando la fórmula del área de un triángulo.
 - Corregir la concentración de cada solución, con la ecuación de regresión de la curva de calibración.
- Medición de ácido clorogénico de la pulpa fresca y seca

Tabla 9. Reactivos, materiales y equipos para la medición de ácido clorogénico

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Ácido clorogénico	Pulpa fresca Pulpa seca Ácido clorogénico Metanol 80 % v/v Agua destilada Filtros circulares con poro de 90 mm	Balanza analítica marca OHAUS modelo PA 11 HPLC marca Perkin Elmer

- Preparar una solución de metanol al 80 % v/v, vertiendo 200 ml de metanol en un balón de 250 ml y aforar con agua destilada.
- Preparar cuatro muestras triturando aproximadamente 5 gramos de pulpa para cada una y extraerlos en 50 ml de la solución de metanol al 80 % v/v, en beakers.
- Agitar cada beaker en una estufa con sistema de agitación, sin calor, por 60 minutos y filtrar la solución de cada muestra en embudos con papel filtro de 90 mm.
- Colocar cada solución en un frasco ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y guardar en la nevera a 4 °C para preservarla.
- Construcción de curva de calibración para la determinación de ácido clorogénico
 - Pesar 0.00250 gramos de ácido clorogénico en un beaker para hacer la solución madre de 100 ppm.
 - Trasvasar el contenido en un balón de 25 ml y aforar con agua destilada.
 - Agitar la solución y realizar diluciones con agua destilada, correspondientes para 5, 10, 20 y 25 ppm.
 - Filtrar las soluciones con filtros tipo jeringa de 0.45 μm y trasvasar a viales.

- Introducir los viales al equipo para su análisis en el HPLC, con agua ultrapura como fase móvil.
 - Obtener cromatogramas relacionando el tiempo de retención en el equipo (eje x) y la absorbancia (eje y), para cada solución.
 - Para cada cromatograma, determinar el área bajo la curva correspondiente al pico del ácido clorogénico, empleando la fórmula del área de un triángulo.
 - Construir la curva de calibración para el ácido clorogénico.
 - Medición de ácido clorogénico en muestras
 - Realizar dilución de 245 μm de cada solución muestra de pulpa fresca y pulpa seca en balones de 25 ml y aforar con agua destilada.
 - Filtrar las soluciones con filtros tipo jeringa de 0.45 μm y trasvasar a viales.
 - Introducir los viales al equipo para su análisis en el HPLC, con agua ultrapura como fase móvil.
 - Obtener cromatogramas relacionando el tiempo de retención en el equipo (eje x) y la absorbancia (eje y), para cada solución.
 - Para cada cromatograma, determinar el área bajo la curva correspondiente al pico del ácido clorogénico, empleando la fórmula del área de un triángulo.
 - Corregir la concentración de cada solución, con la ecuación de regresión de la curva de calibración.
- Medición de azúcares de la pulpa fresca y seca

Tabla 10. Reactivos, materiales y equipos para la medición de azúcares

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Azúcares	Pulpa fresca	Balanza analítica marca OHAUS modelo PA 11 HPLC marca Perkin Elmer
	Pulpa seca	
	Agua destilada	
	Filtros circulares con poro de 90 mm	

- Preparar cuatro muestras triturando aproximadamente 5 gramos de pulpa para cada una y extraerlos en 50 ml de agua destilada, en beakers.
- Agitar cada beaker en una estufa con sistema de agitación, sin calor, por 60 minutos y filtrar la solución de cada muestra en embudos con papel filtro de 90 mm.
- Colocar cada solución en un frasco ámbar para evitar reacciones con fotones de luz y guardar en la nevera a 4 °C para preservarla.
- Construcción de curva de calibración para la determinación de sacarosa, glucosa y fructosa

- Preparar soluciones al 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 % m/v de fructosa, pesando de 0.2500 en 0.2500 gramos de sacarosa, glucosa o fructosa, según corresponda, en una balanza analítica y aforar en balones de 25 ml con agua destilada.
 - Filtrar las soluciones con filtros tipo jeringa de 0.45 μm y trasvasar a viales.
 - Introducir los viales al equipo para su análisis en el HPLC, con agua ultrapura como fase móvil.
 - Obtener cromatogramas relacionando el tiempo de retención en el equipo (eje x) y la absorbancia (eje y), para cada solución.
 - Para cada cromatograma, determinar el área bajo la curva correspondiente al pico de la sacarosa, glucosa o fructosa, según corresponda, empleando la fórmula del área de un triángulo.
 - Construir las curvas de calibración para la sacarosa, glucosa y fructosa.
 - Medición de sacarosa, glucosa y fructosa en muestras
 - Filtrar las soluciones con filtros tipo jeringa de 0.45 μm y trasvasar a viales.
 - Introducir los viales al equipo para su análisis en el HPLC, con agua ultrapura como fase móvil.
 - Obtener cromatogramas relacionando el tiempo de retención en el equipo (eje x) y la absorbancia (eje y), para cada solución.
 - Para cada cromatograma, determinar el área bajo la curva correspondiente al pico de la sacarosa, glucosa o fructosa, según corresponda, empleando la fórmula del área de un triángulo.
 - Corregir la concentración de cada solución, con la ecuación de regresión de la curva de calibración correspondiente.
- Medición de actividad de agua de la pulpa fresca y seca

Tabla 11. Reactivos, materiales y equipos para la medición de actividad de agua

Análisis	Reactivos y materiales	Equipos
Actividad de agua	Pulpa fresca Pulpa seca	Higrómetro de punto de rocío marca AquaLab modelo Serie 3

- Encender el higrómetro de punto de rocío, calibrar vertiendo solución de verificación de 8.57 mol/kg de cloruro de litio (LiCl) en el recipiente de muestras y ajustar la lectura de actividad de agua (a_w) a 0.500.
- Limpiar el recipiente de muestra para iniciar las mediciones.
- Colocar la muestra en el recipiente y cerrar el compartimiento.
- Tomar nota de la lectura mostrada en el equipo cuando la alarma de finalización de la lectura se active y la luz verde se encienda tres veces seguidas.
- Repetir el procedimiento anterior en triplicado para cada muestra.

E. Elaboración de curva de secado de la pulpa de café

1. Secado de pulpa fresca

- **Preparación**
 - Introducir una muestra de la pulpa fresca en la balanza de humedad, seleccionar el método de secado previamente programado y hacer la lectura de la humedad inicial.
 - Pesar una muestra de la pulpa fresca, antes de introducir al secador, en una balanza analítica.
 - Colocar uniformemente toda la pulpa fresca sobre la bandeja, hasta cubrir el área completa.
 - Preparar visualmente el área de la muestra inicial que pesar, enmarcándola con cinta adhesiva, para identificarla y tomarla en cada intervalo de tiempo.
 - Encender el equipo y establecer la temperatura de secado de la pulpa en 75 °C.
 - Colocar la bandeja dentro del equipo cuando se alcance la temperatura e iniciar el cronómetro.
 - Al finalizar las mediciones, apagar el equipo y limpiar las bandejas utilizadas.
- **Toma de muestras**
 - Cada 5 minutos, tomar la muestra previamente identificada, colocar dentro de un recipiente cerrado y pesar en la balanza analítica.
 - Devolver rápidamente la muestra al área asignada dentro de la bandeja y cerrar el secador.
 - Realizar este procedimiento hasta que la masa de la muestra en la balanza sea constante y la tasa de evaporación calculada sea cercana a 0.
- **Humedad de pulpa seca**
 - Introducir la muestra final seca en la balanza de humedad, seleccionar el método de secado previamente programado y hacer la lectura de la humedad alcanzada después del proceso de secado.

- Realizar las curvas de secado en cuadruplicado, secando varias muestras de la pulpa de café, a la misma temperatura del aire de secado.

2. Secado de pulpa congelada

- **Descongelamiento de material**
 - Retirar una bolsa que contenga pulpa congelada del cuarto congelado del Laboratorio de Operaciones Unitarias.
 - Dejar la bolsa con pulpa congelada en un recipiente cerrado a temperatura ambiente (25 °C), por 24 horas para descongelar.
- **Preparación**
 - Introducir una muestra de la pulpa fresca en la balanza de humedad marca OHAUS modelo MB120, seleccionar el método de secado previamente programado, a 120 °C y modo de desconexión de 1 mg / 120 s, y hacer la lectura de la humedad inicial.
 - Pesar una muestra de la pulpa fresca, antes de introducir al secador, en una balanza analítica marca OHAUS modelo PA 11.
 - Colocar uniformemente toda la pulpa fresca sobre la bandeja, hasta cubrir el área completa.
 - Preparar visualmente el área de la muestra inicial que pesar, para tomarla en cada intervalo de tiempo.
 - Encender el equipo y establecer la temperatura de secado de la pulpa en 75 °C.
 - Colocar la bandeja dentro del equipo cuando se alcance la temperatura e iniciar el cronómetro.
 - Al finalizar las mediciones, apagar el equipo y limpiar las bandejas.
- **Toma de muestras**
 - Cada 5 minutos, tomar la muestra previamente identificada, colocar dentro de un recipiente cerrado y pesar en la balanza analítica.
 - Devolver rápidamente la muestra al área asignada dentro de la bandeja y cerrar el secador.
 - Realizar este procedimiento hasta que la masa de la muestra en la balanza sea constante y la tasa de evaporación calculada sea cercana a 0.
- **Humedad de pulpa seca**
 - Introducir la muestra final seca en la balanza de humedad marca OHAUS modelo MB120, seleccionar el método de secado previamente programado, a 120 °C y modo de desconexión de 1 mg / 120 s, y hacer la lectura de la humedad alcanzada después del proceso de secado.

F. Balance de masa y energía

- Tomar como base de cálculo para este caso la cosecha de café completa
 - 4 meses de cosecha
 - 120 días de cosecha
 - Trabajo de lunes a domingo
 - 2500 quintales totales de café pergamino en la cosecha
- Tomar conversiones de estudios de café para determinar la cantidad de fruto que entra al beneficio húmedo y la pulpa resultante del proceso
 - 1 pergamino equivale a 4.94 cereza
 - 1 pergamino equivale a 2.15 pulpa
 - 1 cereza equivale a 0.43 pulpa
- Definir el uso de la pulpa de café como 30 % por hora.
- Con base en los parámetros de humedad inicial y final de la pulpa, tiempo y temperatura de secado, obtenidos de la curva de secado promedio, llevar a cabo un balance de masa y energía para determinar los flujos de entrada y salida de la pulpa, agua, aire de secado y energía consumida en el equipo.
- Realizar el balance de masa y energía para el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Realizar el balance de masa y energía para el secador propuesto tipo continuo de túnel en la región de Acatenango, Chimaltenango.
- Realizar el balance de masa y energía para la llenadora semiautomática y selladora manual de empaques de la planta piloto propuesta en la región de Acatenango, Chimaltenango.
- Finalmente, realizar el balance de masa y energía global de la planta piloto propuesta para la producción de una infusión a partir de la pulpa de café, en la región de Acatenango, Chimaltenango.
- Elaborar un diagrama de equipos y del proceso de la planta piloto, para obtener la infusión a partir de la pulpa de café como materia prima.
 - Los equipos seleccionados para la planta de infusión son un secador continuo tipo túnel, elevador de cangilones, llenadora semiautomática y selladora manual.

G. Dimensionamiento de equipos

1. Secador continuo tipo túnel

- Según los parámetros de humedad inicial y final de la pulpa, temperatura, velocidad del aire de secado y tiempo de secado de la pulpa, dimensionar un secador continuo tipo túnel.
 - Tomar como base el flujo de entrada de café cereza por unidad de tiempo, al utilizar el 30 % de la pulpa del beneficio.
 - Con los datos de flujos obtenidos del balance de masa del secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, determinar el flujo necesario para el secador continuo tipo túnel para la planta piloto.
 - Con el flujo de aire de secado definido, completar los requerimientos de parámetros del secador.

2. Elevador de cangilones

- Según el flujo de salida de pulpa seca obtenido del balance de masa y energía del secador continuo tipo túnel, dimensionar un elevador de cangilones.
 - Tomar como base el flujo de salida del secador por unidad de tiempo.
 - El elevador de cangilones propuesto funciona para trasladar la pulpa hacia la tolva de alimentación de la llenadora.

3. Llenadora

- Según los requerimientos de presentación de la bebida infusión de la finca de café, dimensionar una máquina llenadora semiautomática.
 - Tomar como base el flujo de salida de pulpa seca del secador, por unidad de tiempo, que corresponde a la misma capacidad de transporte del elevador de cangilones.
 - Con los datos de flujos obtenidos del balance de masa de la llenadora, definir las características necesarias para su funcionamiento en la planta piloto.

4. Selladora

- Con base en el funcionamiento de la llenadora semiautomática, definir la necesidad de una selladora manual.
 - Definir una merma por acumulación de pulpa del 2 % dentro del elevador de cangilones y la llenadora.
 - Tomar como base el flujo saliente de la llenadora y calcular la velocidad necesaria de sellado de bolsas para su funcionamiento en línea con el resto del equipo.

H. Análisis económico

1. VPN

- Cotizar los equipos propuestos para la planta piloto de producción de infusión a partir de la pulpa del café.
- Calcular el costo de la inversión inicial utilizando factores de conversión.
- Calcular la depreciación del equipo de forma línea recta, para los años de vida útil propuestos por el proveedor.
- Determinar la mano de obra necesaria para la producción del bien final.
- Cotizar la materia prima a utilizar en la planta piloto.
- Calcular el precio de venta, con base en un margen de 35 % de utilidad.
- Definir una TMAR base de 7.55 %, valor de la inflación acumulada en Guatemala durante el año 2022.
- Realizar un flujo de efectivo del proyecto a 10 años de operación y calcular el valor presente neto del mismo.

2. TIR

- Con base en el flujo de efectivo del proyecto a 10 años de operación, calcular la tasa interna de retorno.

3. Período de recuperación de la inversión

- Con base en la inversión inicial y el flujo de efectivo promedio del proyecto a 10 años de operación, calcular el período de recuperación de la inversión.

4. Análisis de sensibilidad

- Realizar un análisis de sensibilidad del valor presente neto y la tasa interna de retorno, variando los valores del precio de venta, costo de materia prima, material de empaque y operación, personal, servicios y depreciación del equipo.

VII. RESULTADOS

Tabla 12. Caracterización de pulpa de café tipo Catuai Rojo

Propiedad	Pulpa fresca	Pulpa seca
Antioxidantes IC 50 (mg/ml) ¹	6.1024 ± 0.4756	1.6238 ± 0.1331
Polifenoles (mg/g pulpa) ¹	3.2420 ± 0.2007	8.4008 ± 0.4807
Cafeína (ppm) ²	254.1724 ± 19.9789	1507.7916 ± 133.2079
Ácido clorogénico (ppm) ²	67.6250 ± 6.7041	46.7949 ± 3.6369
Sacarosa (% m/v) ²	0.169	0.576
Glucosa (% m/v) ²	0.266	1.082
Fructosa (% m/v) ²	0.259	0.568
Nitrógeno (%) ³	1.86	1.81
Fósforo (%) ³	0.29	0.26
Potasio (%) ³	3.54	3.47
Calcio (%) ³	0.69	0.79
Magnesio (%) ³	0.26	0.19
Azufre (%) ³	0.16	0.13
Cobre (ppm) ³	11.45	10.73
Hierro (ppm) ³	686.30	103.90
Manganeso (ppm) ³	34.75	16.60
Zinc (ppm) ³	13.80	8.43
Ceniza (%) ³	76.00	7.00
Materia orgánica (%) ³	24.00	93.00
Carbono orgánico (%) ³	13.33	51.67
pH ³	4.44	3.90
Humedad (%) ³	86.30	15.99
Actividad de agua	0.963	0.662

NOTAS

*Resultados de la caracterización de pulpa de café, antes y después del proceso de secado.

*La humedad promedio de la pulpa fresca fue de 85.23 ± 1.25 %.

*La humedad promedio de la pulpa seca fue 15.78 ± 0.01 %.

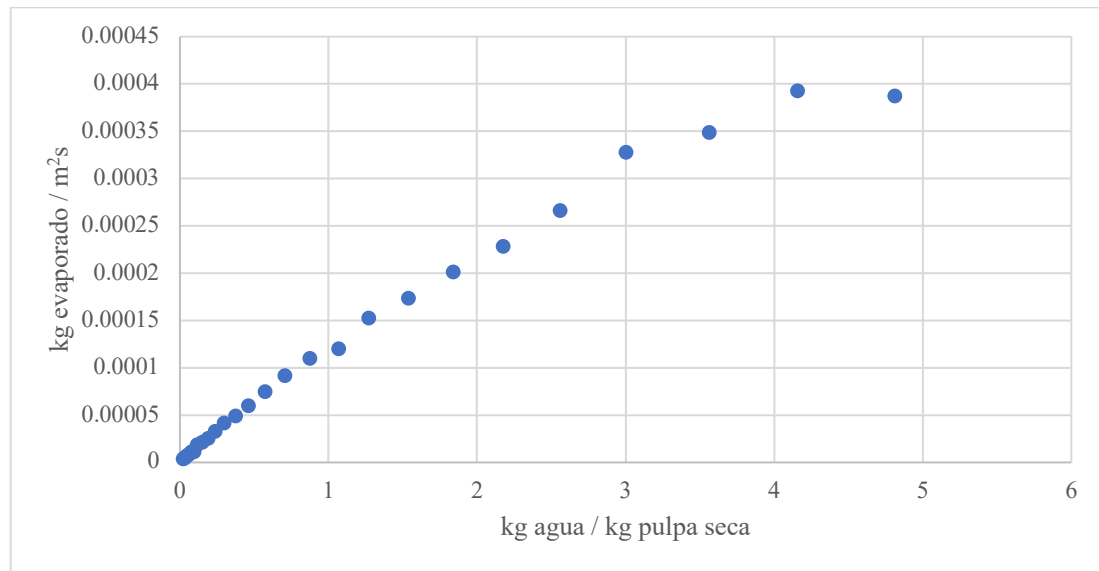
*Los datos están dados en base fresca.

1. Muestras extraídas por 1 hora en metanol al 80 % v/v, analizadas en espectrofotómetro.

2. Muestras extraídas por 1 hora en metanol al 80 % v/v, analizadas en HPLC.

3. Muestras analizadas en laboratorio externo, Analab, Anacafé, Guatemala.

Figura 13. Curva de secado de pulpa de café con aire a 75.2 ± 2.2 °C



NOTAS

- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente promedio de 23.8 ± 1.3 °C y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue 85.23 ± 1.25 %.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.
- *La curva presentada se construyó a partir de cuatro pruebas realizadas del secado de pulpa de café.
- *Se observa la tendencia constante y decreciente de la tasa de evaporación de agua proveniente de la pulpa de café, durante el proceso de secado.
- *El punto crítico de la operación de secado fue (3.62963 kg de agua/kg de pulpa seca, 0.00037 kg de evaporado/m²s).
- *El coeficiente de transferencia de masa en la operación fue $k_y = 0.00526413$ kg/m²s.

Tabla 13. Parámetros de operación de secado

Parámetro	Valor
Humedad inicial de la pulpa (%)	85.23 ± 1.25^1
Humedad final de la pulpa (%)	15.78 ± 0.01
Temperatura (° C)	75.2 ± 2.2
Tiempo (min)	96.78 ± 4.04^2

NOTAS

- *Los parámetros descritos fueron obtenidos de pruebas de secado de 1.5 kg de pulpa fresca de café tipo Catuai Rojo en el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.
- 1. Dato según las pruebas en el secador de bandejas, no la caracterización en laboratorio externo.
- 2. Dato sin aplicar el sobredimensionamiento propuesto por el Manual del Ingeniero Químico (Perry, 1994); 1.5 – 2 veces el tiempo de secado obtenido en las pruebas.

Tabla 14. Dimensionamiento de secador tipo túnel

Requerimiento	Mínimo	Máximo	Cotizado
Capacidad (kg/h)	200.699	334.499	180 – 220 ¹
Aire (kg/h)	2345.419	7818.063	1935 - 9675
Temperatura (°C)	73.0	77.4	40 – 120
Tiempo de secado (min)	92.74	100.82	60 – 360 ²
Humedad sólido (%)	15.00	85.00	7 – 90
Potencia (kW)	-	-	72
Dimensiones (m)	Largo de 4.32	-	5 x 1.7 x 2.5 ³
Material	-	-	Acero inoxidable 304 ⁴

NOTAS

*El proveedor del secador seleccionado fue Shouchuang Technology, de Nanchong City, China.

1. El equipo cotizado cubre el porcentaje de uso de pulpa establecido (30 % de la pulpa/cosecha).
2. Referencia al tiempo de ciclo.
3. Dimensiones en largo x ancho x alto.
4. Material apto para el manejo de alimentos.

Tabla 15. Dimensionamiento de elevador de cangilones

Requerimiento	Cotizado
Capacidad (kg/h)	0 – 675
Volumen de tolva (m ³)	0.15
Potencia (kW)	2
Dimensiones (m)	2.6 x 0.8 x 2.3 ¹
Material	Acero inoxidable 304 ²

NOTAS

*El rango de capacidad requerido es 33.838 – 112.761 kg/h.

*El proveedor del elevador de cangilones seleccionado fue Zheng Zhou Hongle Machinery Equipment Co. LTD, China.

1. Dimensiones en largo x ancho x alto.
2. Material apto para el manejo de alimentos.

Tabla 16. Dimensionamiento de llenadora

Requerimiento	Mínimo	Máximo	Cotizado
Presentación (g)	50.00	250.00	30 – 2000
Precisión (%)	-	-	0.2 – 0.5
Capacidad (kg/h)	33.828	112.761	0 – 675
Capacidad (bolsas/min)	2	40	0 - 45 ¹
Volumen de tolva (m ³)	-	-	0.2
Potencia (kW)	-	-	2.6
Dimensiones (m)	-	-	1.2 x 0.76 x 2.3 ²
Material	-	-	Acero inoxidable 304 ³

NOTAS

*El proveedor de la llenadora semiautomática seleccionada fue Zheng Zhou Hongle Machinery Equipment Co. LTD, China.

1. Según ficha técnica del proveedor, para bolsas de 500 g, la velocidad promedio es de 6 bolsas / min.

2. Dimensiones en largo x ancho x alto.

3. Material apto para el manejo de alimentos.

Tabla 17. Dimensionamiento de selladora

Requerimiento	Cotizado
Capacidad (bolsas/min)	0 - 45
Ancho de sellado (mm)	10
Temperatura (°C)	0 - 300
Potencia (kW)	0.1
Dimensiones (m)	0.844 x 0.555 x 0.8 ¹

NOTAS

*El rango de capacidad requerido es 2 – 40 bolsas/min.

*El proveedor de la selladora manual seleccionada fue Guangzhou Yeto Machinery Co., Guangzhou, China.

1. Dimensiones en largo x ancho x alto.

Tabla 18. Análisis económico de la planta piloto propuesta para la producción de una infusión a partir de la pulpa de café

Detalle	
VPN	Q 34,127.14
TIR	8.48%
Período de recuperación	7.24 años

NOTAS

*La TMAR utilizada fue 7.55 % y representa la inflación acumulada de Guatemala para agosto, 2022.

*El período de recuperación fue calculado para encontrar el tiempo de recuperación de la inversión inicial, sin utilidades.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El objetivo de este trabajo fue proponer una planta piloto para la producción de una infusión a partir de pulpa de café tipo Catuai Rojo. Se tomó esta materia como base del análisis, ya que el cultivo de café en Guatemala es muy común por las condiciones climáticas favorables en varias regiones del país, lo cual hace de la pulpa un subproducto abundante y disponible de la mayoría de beneficios productores en Guatemala. Normalmente, el uso de la pulpa posterior a su separación del grano es casi nulo, ya que la práctica común consiste descartar o utilizar la pulpa como abono. Lo mencionado anteriormente, hace posible innovar en alternativas de uso para revalorizar el subproducto.

Se caracterizó la pulpa de café tipo Catuai Rojo de una finca de cultivo de café localizada en la región de Acatenango, Chimaltenango, previo y posterior al proceso de secado. Cabe notar que la caracterización de la pulpa seca fue realizada posterior a la obtención del producto final en las pruebas de secado, utilizando como guía la curva de secado promedio construida. Se construyó la curva de secado del material a 75.2 ± 2.2 °C a partir de pruebas en el secador de bandejas y se determinó el tiempo de residencia dentro del equipo (96.78 ± 4.04 minutos) para la obtención de pulpa a 15.78 ± 0.01 %, partiendo de material a 85.23 ± 1.25 % de humedad. Con base en los parámetros de operación y un balance de masa del secador por lotes, se determinó y dimensionó los equipos necesarios en la planta piloto: secador tipo túnel, elevador de cangilones, llenadora semiautomática y selladora manual. Por último, se llevó a cabo un análisis económico para establecer la viabilidad del proceso de secado de pulpa de café para la producción de una infusión.

Inicialmente, se realizó una caracterización para determinar propiedades fisicoquímicas del producto, antes y después del proceso de secado. En el caso de la pulpa fresca, se realizó la preparación y extracción de muestras obtenidas del beneficio húmedo. Es importante mencionar que la pulpa obtenida del proceso del café fue acumulada posterior a la selección de los granos, proceso realizado previo al despulpado. Esto evitó la contaminación de las muestras con materiales extraños como ramas, basura, hojas, entre otros. La caracterización de la pulpa fresca se llevó a cabo con pulpa directamente del beneficio húmedo en marzo y abril, lo cual evitó el congelamiento y descongelamiento del material. Sin embargo, debido a la finalización del período de cosecha y falta de pulpa fresca para las pruebas de secado, la caracterización de la materia seca se llevó a cabo con muestras del subproducto congelado en los últimos días de la cosecha. El tratamiento de congelación fue útil para la preservación y disponibilidad del material para su uso en pruebas posteriores a la finalización de la cosecha.

Para determinar la actividad antioxidante de la pulpa de café fresca y seca, se relacionó el porcentaje de inhibición de radicales libres de DPPH y la concentración de la solución. La primera curva de calibración

para el procedimiento se hizo con ácido ascórbico como analito por su capacidad antioxidante, y se observa en la Figura 14, en la sección de anexos. Resultó en un coeficiente de correlación bajo de 0.8969, el cual se dio ya que el porcentaje de inhibición de los radicales libres se hizo constante en las últimas tres lecturas. Dicho punto indicó un límite en la capacidad de inhibición de radicales libres del ácido ascórbico en las soluciones. Debido a lo mencionado con anterioridad, se hizo una segunda calibración con soluciones de menor concentración de analito. Con la curva de la Figura 15 se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9916, el cual mejoró debido a la tendencia de crecimiento lineal de la gráfica, sin alcanzar la sección constante de inhibición de los radicales libres. Para las mediciones de las muestras de pulpa seca se realizó la curva de calibración de la Figura 26 de la sección de anexos, con la cual se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.9916. Esta nueva curva se realizó porque la pulpa seca tenía más masa, lo que aumentaría la cantidad de antioxidantes para la inhibición de radicales libres en las soluciones, disminuyendo los valores en el eje x de la calibración previa. La elaboración de la nueva curva de calibración permitiría una regresión adecuada para la corrección de los datos obtenidos en las mediciones de antioxidantes en las muestras de pulpa seca.

La determinación de la actividad antioxidante, en términos de ácido ascórbico, de muestras de pulpa fresca, con humedad promedio de 85.23 ± 1.25 %, se observan en las Figuras 16, 17, 18 y 19 de la sección de anexos. En el caso de las submuestras 1 y 4, se observa que los dos últimos puntos tendieron a un porcentaje de inhibición constante, demostrando el límite de inhibición mencionado anteriormente para la primera curva de calibración. Para el caso de la pulpa seca (15.78 ± 0.01 %), la relación de inhibición y concentración de las muestras se encuentra en la sección de anexos, Figuras 27, 28, 29 y 30, en las cuales se obtuvo una mejor linealización que en el caso de la pulpa fresca y nula tendencia a la sección constante de capacidad de inhibición de los antioxidantes. Esto se debe a que la determinación se inició con una dilución menor de la solución muestra, evitando así comportamiento constante de inhibición en la gráfica. Para ambos estados de la pulpa se calculó el IC_{50} , valor que indica la concentración necesaria de antioxidantes en la pulpa para inhibir el 50 % de los radicales libres de DPPH en la solución. El contenido promedio en la pulpa fresca fue 6.1024 ± 0.4756 mg/ml en base húmeda y de la pulpa seca fue 1.6238 ± 0.1331 mg/ml en base húmeda, Tabla 12 en la sección de resultados. Se dio un aumento significativo de la capacidad antioxidante de la pulpa, luego del proceso de secado, ya que con 4.4786 mg menos de pulpa, se logró la inhibición del 50 % de radicales de DPPH en la solución. El factor que fomentó la diferencia entre el valor de los IC_{50} fue la eliminación de gran parte del contenido del agua de la pulpa y consecuente aumento de la masa de pulpa en el extracto del análisis.

Para la determinación de polifenoles, se elaboró curvas de calibración con dos analitos característicos del conjunto de polifenoles, ácido gálico (Figura 20 sección de anexos) y ácido tánico (Figura 21 sección de anexos), con coeficientes de correlación de 0.9984 y 0.9994, respectivamente. Ambas se realizaron con los mismos volúmenes de las soluciones de analito. En la Tabla 12 de la sección de resultados, se encuentran las

cantidades de polifenoles presentes, en términos de ácido gálico y tánico, por unidad de masa de la pulpa fresca y seca, 3.2420 ± 0.2007 y 8.4008 ± 0.4807 mg/g en base húmeda, respectivamente. Se observa que, en la pulpa seca, similar al caso de los antioxidantes, la cantidad de polifenoles presentes aumentó en 5.1588 mg de polifenoles por unidad de pulpa. Este aumento también se dio por la ausencia de agua en los extractos y aumento de la masa de pulpa. Los resultados de los análisis descritos anteriormente concuerdan con lo esperado, debido a que los polifenoles son un tipo de antioxidantes, presentes en la materia vegetal. Las características de ambos componentes presentes en el producto final, la pulpa de café seca, para el consumo humano indican la capacidad de inhibir radicales libres en el cuerpo. Por lo tanto, si en la pulpa seca hay 8.4008 mg de polifenoles por cada gramo de pulpa, la infusión propuesta en una taza de 250 ml contendrá alrededor de 210 mg polifenoles, que pueden cumplir con la función de propiciar oxidaciones celulares más lentas, lo cual previene enfermedades cardiovasculares, degenerativas, aumenta la capacidad antiinflamatoria, tiene efecto prebiótico, y mejora los niveles hormonales.

Se realizó una curva de calibración, Figura 23 en la sección de anexos, con coeficiente de correlación de 0.9986, para la determinación de la cafeína en la pulpa de café. En las muestras de pulpa fresca, la concentración de cafeína fue 254.1724 ± 19.9789 ppm y en la pulpa seca, 1507.7916 ± 133.2079 ppm, ambos valores en base húmeda (Tabla 12 sección de resultados). El aumento de 1253.6192 mg de cafeína por L de solución, se dio por la ausencia de agua y presencia de más masa de pulpa en el extracto de la muestra. En una taza de 250 ml de la infusión de pulpa seca, el contenido de cafeína sería aproximadamente 376 mg. Los beneficios para el consumidor del producto, en relación a este compuesto, son la estimulación del sistema nervioso central, aumento de energía y presión arterial, efectos diuréticos, liberación de ácidos, y absorción de calcio en el cuerpo. Según la Administración de Alimentos y Medicamentos, la dosis recomendada de cafeína al día para adultos son 400 mg, lo cual indicaría que una taza del producto final cubriría gran parte de la dosis necesaria para el cuerpo.

Se realizó una curva de calibración de ácido clorogénico como analito, que tuvo un coeficiente de correlación de 0.99984, Figura 24 sección de anexos. Esta determinación se llevó a cabo ya que el ácido clorogénico, conjunto de ésteres, es un componente importante y conocido del fruto del café. La concentración en la pulpa fresca y seca fue 67.6250 ± 6.7041 y 46.7949 ± 3.6369 ppm, respectivamente, Tabla 12 de la sección de resultados. En contraste con los resultados de los análisis descritos anteriormente, el contenido de ácido clorogénico de la pulpa disminuyó luego del proceso de secado. Este tipo de ácido en los granos de café se descompone en el proceso de tostado del grano, y el secado de la pulpa fue un proceso similar de calor en contacto directo con el material. Las moléculas formadas tras la descomposición del ácido clorogénico son compuestos fenólicos, solubles en agua, lo cual indicó su evaporación junto con el agua durante el proceso del secado. Adicionalmente, la degradación de la molécula en ácido quínico y cafeico, disminuye su peso posibilitando así el arrastre de los ácidos durante el secado. Debido a lo descrito con anterioridad, la pulpa seca contiene una menor cantidad del ácido que la pulpa fresca. Cabe notar que el ácido

restante en la pulpa seca resulta en 11.6987 mg por taza de infusión, lo cual mantuvo el pH de la materia prima en un nivel bajo. Con el proceso de secado se eliminó gran parte del agua y aumentó la masa de pulpa en base seca, haciendo el ácido clorogénico más representativo. Esto resultó en la disminución del pH de 4.44 a 3.90. En la infusión de pulpa seca, el ácido clorogénico da beneficios antivirales, mejora el metabolismo, reduce el colesterol y regula la glucosa en el cuerpo. Este compuesto en la pulpa también tiene función antioxidante en el cuerpo y por su naturaleza ácida, reduce la acumulación de grasas en el hígado.

Para la determinación de azúcares en las muestras de pulpa de café, se llevó a cabo curvas de calibración de sacarosa, glucosa y fructosa, mostradas en la sección de anexos Figura 26, con coeficiente de correlación 0.9812, 0.9946 y 0.9982, respectivamente. El análisis de azúcares presentes en la pulpa de café se muestra en la Tabla 12 de la sección de resultados. Previo al proceso de secado, la materia contaba con 0.169, 0.266 y 0.259 % m/v de sacarosa, glucosa y fructosa, correspondientemente. Al secarse, los valores del contenido de azúcares aumentaron a 0.576, 1.082 y 0.568 % m/v, respectivamente. Esto se dio por la eliminación de agua de la pulpa en el secador de bandejas, lo cual cambió la proporción de la masa de pulpa en la muestra. En la muestra de pulpa fresca, gran parte del peso era agua, disminuyendo la concentración de azúcar. Luego de la evaporación de parte de la humedad, la masa seca en la pulpa fue más representativa en la muestra, aumentando así el valor de la concentración de los compuestos. La sacarosa, glucosa y fructosa son tipos de azúcares presentes en la pulpa de café y proporcionan gran parte de la energía para el funcionamiento de los músculos, órganos y cerebro; son útiles también para la formación de tejidos. El consumo de la infusión a partir de la pulpa de café puede resultar beneficiosa para lograr la ingesta de azúcar natural proveniente de un fruto. En una taza de 250 ml de infusión, el contenido de azúcar sería aproximadamente de 5.56 gramos (1.44, 2.71 y 1.42 gramos de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente), lo cual está por debajo de la ingesta diaria recomendada de azúcares (25 gramos). El consumo de una taza diaria proporcionaría parte de la energía para actividades del día a día, sin superar el límite saludable de consumo de azúcar establecido por la Organización Mundial de la Salud.

En relación con el contenido porcentual, presentado en la Tabla 12 de la sección de resultados, de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio magnesio y azufre, los valores disminuyeron en la pulpa de café posterior al secado. El nitrógeno de la pulpa (1.81 – 1.86 % m/m) es un constituyente importante en el cuerpo humano para la producción proteínas, las cuales son esenciales para el mantenimiento y funcionamiento de órganos, formación de hormonas, aminoácidos y anticuerpos. Es el cuarto elemento más contenido en el cuerpo. En el caso del fósforo (0.26 – 0.29 % m/m), es un mineral necesario para la formación de proteínas, y conforma la composición de huesos y dientes. Es necesario en el cuerpo para producir la energía requerida para actividades diarias. El potasio (3.47 – 3.54 % m/m) es un mineral que ayuda a mantener el funcionamiento saludable del corazón, sistema nervioso, músculos y riñones. Ayuda también como impulsor de nutrientes a través de las células y a la expulsión de desechos celulares. Otro mineral contenido en la pulpa de café y de mucha importancia en la alimentación humana es el calcio (0.79 – 0.69 % m/m). Es el más abundante en el

cuerpo y es vital para la formación y mantenimiento de los huesos y dientes. Adicionalmente, permite el movimiento de músculos, funcionamiento del sistema nervioso y circulación de la sangre. El magnesio contenido en la pulpa de café (0.26 – 0.19 % m/m) es un nutriente necesario para la salud del cuerpo, por medio de la regulación del sistema nervioso, niveles de azúcar y presión sanguínea. Este elemento es necesario para la formación de proteínas y ADN. El magnesio está presente en agua en forma de iones poco estables, lo cual explica la leve disminución de concentración debido a la evaporación de humedad en el proceso de secado. Por último, el azufre (0.13 – 0.16 % m/m), es un mineral necesario en la piel, ligamentos, tendones, y demás, por medio de la producción natural de colágeno en el cuerpo. Este elemento se encuentra en el hígado y es componente de algunos aminoácidos. Al igual que los casos descritos anteriormente, el cobre presentado tuvo un contenido similar en la pulpa de café fresca y seca. El cobre presente (10.73 – 11.45 ppm) es un mineral utilizado en el cuerpo humano para la producción de energía, mantenimiento del sistema nervioso e inmune, y para el desarrollo del cerebro. La ingesta de este elemento ayuda a la prevención de Alzheimer y a mejorar la salud del corazón.

En el caso del zinc contenido en la pulpa de café, presentado en la Tabla 12 de la sección de resultados, disminuyó con mayor notoriedad, de 13.80 a 8.43 ppm, respectivamente. El hierro en la pulpa de café fresca y seca también cambió significativamente de 686.30 a 103.90 ppm, y el manganeso de 34.75 a 16.60 ppm, respectivamente. Estos elementos están presentes y son característicos del color aparente del agua, lo cual explica la disminución de su concentración posterior al proceso de secado de la pulpa de café fresca. El zinc en la pulpa es un nutriente necesario presente en las células del cuerpo y en el sistema inmune. Ayuda en la producción de ADN, proteínas y en el funcionamiento de los sentidos del olfato y el gusto. El hierro es un mineral necesario para el desarrollo del cuerpo saludable, por medio de la fabricación de hemoglobina y mioglobina, hormonas y tejidos. Se considera esencial para prevenir la anemia ferropénica. El manganeso en el cuerpo produce energía, fortalece los huesos, protege las células y ayuda al sistema inmune. Funciona también como componente y activador de enzimas, y como antioxidante en las células. Como resumen de los compuestos inorgánicos previamente mencionados, se determinó el contenido de cenizas totales para la pulpa de café fresca y seca, mostrado en la Tabla 12 de la sección de resultados. El análisis indicó una disminución sustancial de 76.00 a 7.00 %. Lo anterior confirma la disminución de los minerales y nutrientes descritos con previamente. Durante el secado de la pulpa, se eliminó agua por medio de evaporación, la cual es catalogada como una sustancia inorgánica, ya que solamente contiene moléculas de hidrógeno y oxígeno. Este fue el componente con mayor influencia en el cambio del porcentaje de cenizas.

En la Tabla 12 de la sección de resultados se observa también los resultados del análisis de materia orgánica y carbono orgánico de la pulpa de café antes y después del proceso de secado. El primer concepto incluye al segundo, y se refiere al contenido general de los elementos orgánicos: carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en la pulpa. De 24.00 % m/m, la materia orgánica aumentó a 93.00 % m/m. Esto concuerda con lo discutido en el párrafo anterior acerca de la naturaleza inorgánica del agua, de modo que el carbono

orgánico también aumentó su proporción en la pulpa de café, de 13.33 a 51.67 % m/m. En la muestra de pulpa fresca, el contenido alto de humedad (86.39 %), era significativamente mayor a la materia orgánica presente. Sin embargo, la evaporación del agua en el proceso de secado resultó en un cambio de proporción de la materia en la pulpa. El contenido de agua eliminado se tradujo en más masa de pulpa representada en la muestra seca analizada (15.99 %). La cantidad de agua disponible para la reproducción de levaduras, mohos, bacterias y demás microorganismos, se analizó por medio de la actividad de agua, resultando en 0.963 y 0.662, para la pulpa fresca y seca respectivamente. El primer valor se posicionó por encima de los mínimos indicados por literatura, en relación a la reproducción de la mayoría de microorganismos. Por otro lado, la actividad de agua de la pulpa seca se encontró por debajo de todos los mínimos a excepción del determinado para levaduras osmófilas (0.600).

Según resultados del análisis en un laboratorio externo, Tabla 12 de la sección de resultados, la humedad de la pulpa fresca, 86.3 %, concordó con la humedad determinada en mediciones con la balanza de humedad, 85.23 ± 1.25 %. El dato de la humedad final de la pulpa seca obtenido del laboratorio externo fue 15.99 % y también se acercó al valor experimental obtenido de 15.78 ± 0.01 %. Era de esperarse que el contenido de humedad disminuyera con el proceso de secado, ya que lo que se busca es eliminar parte del agua de la pulpa para la obtención del material seco. La humedad final que contendría el producto final para la infusión se eligió al evaluar la actividad de agua de muestras, por medio de un higrómetro de punto de rocío, a diferentes concentraciones de humedad, Tabla 34 de la sección de anexos. Con base en datos de literatura, Tabla 1 de la sección de marco teórico, un nivel máximo de actividad de agua recomendado para alimentos de consumo humano es 0.900, pero para frutos secos, debe estar en un rango de 0.85 a 0.60. Las muestras 5 a 8 en la Tabla 34 de la sección de anexos (27.55 ± 0.01 , 19.14 ± 0.01 , 14.09 ± 0.01 y 11.35 ± 0.01 % de humedad) cuentan con actividad de agua dentro del rango mencionado, (0.863, 0.730, 0.616 y 0.715, respectivamente). En el caso de la muestra 5, según su actividad de agua de 0.863, se compararía con embutidos como jamón Serrano y queso tipo Cheddar, cuya actividad de agua se encuentra en un rango de 0.93 y 0.85. Las muestras 6 a 8, se clasificarían en el grupo de futas secas, cereales, quesos maduros y nueces, al que corresponde un valor de actividad de agua entre 0.85 y 0.60.

En la Figura 33 de la sección de anexos se ilustró la relación de la actividad de agua, según la humedad de la pulpa. Se observan dos datos atípicos que, a pesar de contar con mayor tiempo de secado, muestran mayor porcentaje de humedad en la pulpa. Esto se debe a que el equipo para la determinación de humedad de las muestras se encontraba lejos del secador de bandejas, lo que permitió transferencia de humedad del ambiente a la pulpa durante su almacenamiento y transporte. La transferencia de humedad del ambiente hacia la muestra también se dio por la apertura del equipo de secado al extraer la pulpa del mismo. Se definió que la pulpa seca como materia prima para la infusión debía corresponder con las características de la muestra 6 de la Tabla 34 de la sección de anexos, la cual contaba con 14.09 % de humedad y 0.616 de actividad de agua. Este contenido de humedad fue similar al contenido de una presentación comercial actualmente a la

venta en el mercado Guatemalteco ($17.10 \pm 0.44 \%$), y actividad de agua se encuentra cercana al mínimo del rango establecido para frutos secos. Este análisis fue útil para disminuir la cantidad de agua restante en el producto final que fomentara la formación de mohos, bacterias y demás microorganismos en la pulpa seca, y para encontrar la combinación adecuada de humedad y actividad de agua para el producto final.

Se recomienda utilizar tipos diferentes de pulpa de café para evaluar y comparar las características fisicoquímicas de cada una. También hacer un análisis de óxidos para evaluar el efecto del aire caliente en los componentes de la pulpa de café, así como las reacciones que pudieran darse en el proceso de secado, para la comparación de características contenidas en la pulpa fresca y seca. Adicionalmente, un estudio de la vida útil del producto final y variación de la humedad hasta el momento del consumo, con humedad inicial de $15.78 \pm 0.01 \%$, sería recomendable para la determinación de su vida de anaquel y requerimientos de empaque, en caso fuera necesario un tipo material de empaque específico, sistemas al vacío o de refrigeración, entre otros.

Adicional a la caracterización de la pulpa de café antes y después del proceso de secado, se llevó a cabo pruebas en el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Estas experimentaciones fueron útiles para la construcción de curvas de secado que funcionaron como guía para determinar el tiempo de residencia de la pulpa dentro del equipo, según la combinación adecuada de humedad y actividad de agua de la pulpa seca. La curva promedio se utilizó para un posterior balance de masa y dimensionamiento del equipo necesario para la planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de la pulpa de café.

Se realizó una prueba con aire de secado a $77.0 \pm 1.9 \text{ }^\circ\text{C}$ en el secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, que consistió en la toma de pesos de dos muestras, simultáneamente, cada 15 minutos. En las Figuras 34 y 35 se observa el comportamiento de la tasa de evaporación de agua en función de la concentración restante de humedad en las muestras, a medida que transcurre el intervalo entre medición. Sin embargo, la curva no dio resultados claros, y difirió un poco de la tendencia esperada de la teoría. Se puede observar en las Figuras la falta de una sección de comportamiento constante de evaporación para contenidos de agua mayores. Debido a los pocos puntos e intervalos de tiempo extensos entre cada medición, esta sección no se visualizó más que como una parábola invertida conformada, de derecha a izquierda, por un punto inicial que indicó el calentamiento de la pulpa, el siguiente punto representó la sección de evaporación constante, y el último, una guía del punto crítico de humedad y tasa de evaporación del agua. Se repitió la prueba, disminuyendo el intervalo de tiempo entre mediciones a cinco minutos, para determinar gráficamente y con mayor claridad las secciones de la curva y el punto crítico del proceso de secado de la pulpa, en el cual la humedad libre se habría evaporado por completo.

En el mismo secador se realizaron las pruebas posteriores, correspondientes a las curvas de secado de las Figuras 36, 38, 40 y 42 en la sección de anexos. En estos casos, se analizó solamente una muestra y los pesos de la pulpa se tomaron cada cinco minutos, para contar con más datos al construir la curva de secado. En las Figuras se observa la evaporación de agua de la muestra y el comportamiento de la curva visualiza de mejor manera, asemejándose más a la tendencia esperada de la Figura 7, en la sección del marco teórico. Al evaluar las curvas de mayor a menor contenido de agua en el sólido seco, a la derecha se puede identificar la sección constante de la velocidad o flux de evaporación de película superficial de humedad, hasta llegar al contenido crítico de esta en el secado de la pulpa de café. Seguidamente, a la izquierda y posterior al punto crítico, se observa el cambio de comportamiento de la tasa de evaporación a una línea decreciente. Cabe notar que, en todas las pruebas, se tomó toda la sección desde el punto crítico hasta la humedad en equilibrio, como una sola sección decreciente.

El cambio de intervalos de tiempo de medición mejoró la forma de la gráfica, sin embargo, el comportamiento de cada gráfica no es idéntico entre todas y tampoco al de una curva teórica de secado, ya que hay factores en la práctica que afectaron los resultados. Por ejemplo, a pesar de que la toma de muestras fue realizada rápidamente, la temperatura y humedad del aire de secado varió dentro del equipo, por la necesidad de abrir y cerrar el equipo cada cinco minutos, lo que modificó los tiempos necesarios para el secado, condiciones de salida de la pulpa y humedad cambiante del producto final. Se dio la transferencia de calor y humedad del aire del ambiente hacia el aire de secado debido a la fuerza motriz causada por la diferencia de concentraciones de agua en los flujos. Por último, la toma de muestras y transporte de la muestra del área de secado al área de pesaje en las diferentes mediciones expuso la muestra a la transferencia de humedad con el ambiente.

A partir de las pruebas mencionadas con anterioridad, se construyó una curva promedio del secado de pulpa de café de 85.23 ± 1.25 a 15.78 ± 0.01 % de humedad, con aire caliente a 75.2 ± 2.2 °C, mostrada en la Figura 13 de la sección de resultados. En la primera parte, la de evaporación constante, se eliminó la humedad superficial en la pulpa por medio de la transferencia de agua entre la pulpa y el aire caliente. El aire fue calentado por medio de resistencias, a una temperatura promedio de 75.2 ± 2.2 °C, con el fin de disminuir su humedad y lograr una diferencia de concentración de humedad significativa entre el gas y el sólido, para funcionar como fuerza motriz de la operación de secado. En este caso, se eligió la temperatura que actualmente se utiliza en el secador rotatorio del beneficio de la fina en Acatenango, 75 °C. Debido a esto, la transferencia inició de la superficie de la pulpa al aire, del punto inicial de la curva de secado promedio (5.667 kg agua / kg pulpa seca, 0.00039 kg evaporado / m²s) al punto crítico. La disminución en la velocidad de la evaporación se dio porque se formaron puntos secos no uniformes en cada unidad de pulpa seca. En la siguiente etapa del secado, la humedad no ligada debió ser transferida desde el centro de la pulpa hacia afuera y luego al aire de secado. En este proceso, la tasa de evaporación de humedad de la pulpa decreció, hasta un punto de equilibrio en el cual ya no se lograría disminuir más la humedad en el sólido por medio del mismo

método de secado. En este punto, se detuvo cada prueba y se obtuvo la humedad restante por medio del uso de una balanza de humedad, 4.41 ± 0.01 % en promedio. Los parámetros de operación del proceso de secado de la pulpa de café se describen en la Tabla 13 de la sección de resultados.

Se determinó la regresión de esta curva, Figura 44 de la sección de anexos, para calcular el punto crítico del secado (3.62963 kg de agua/kg de pulpa seca, 0.00037 kg de evaporado/m²s). Este punto representa el momento del secado en el cual restaba por evaporar 3.62963 kg de agua por kg de pulpa seca dentro del equipo. El flux de secado constante hasta el punto crítico indicó que, por unidad de tiempo y unidad de área de pulpa de café dentro del secador, se evaporarían 0.00037 kg de agua de la humedad superficial, dejando puntos secos, hasta pasar este punto. Posterior a esto, la tasa de evaporado por unidad de área y tiempo disminuyó hasta $3.78333 \cdot 10^{-6}$ kg. En la Tabla 35 de la sección de anexos, se detalla el resultado del cálculo del coeficiente de transferencia de masa en el secado, 0.0052641 kg/m²s, para el proceso de secado de 85.23 ± 1.25 % a 15.78 ± 0.01 % de humedad. Este valor indicó que el aire de secado absorbería 0.0052641 kg de agua proveniente de la pulpa, por unidad de tiempo y área. Adicionalmente, se detalla también el contenido de la humedad superficial (2.141 kg agua / kg pulpa seca), no ligada (3.606 kg agua / kg pulpa seca) y ligada (0.022 kg agua / kg pulpa seca), de la pulpa de café en las pruebas de secado. Utilizando la curva de secado promedio, se calcularon los tiempos necesarios 80.55 ± 4.13 , 87.79 ± 4.00 , 96.78 ± 4.04 , 108.58 ± 4.41 minutos, para obtener humedades de 25, 20, 15 y 10 %, respectivamente. Sin embargo, la materia prima ingresada al secador estaba previamente congelada, lo cual dificultó la obtención de la pupa con estas humedades en los tiempos previamente determinados.

Se realizó una curva de secado específicamente para la pulpa que estaba congelada, ya que el proceso de descongelamiento afectó el resultado de corridas basadas en los datos anteriores. Posterior al descongelamiento por 24 horas, se construyó la curva de secado en la Figura 45 de la sección de anexos. Esta proporcionó los tiempos más adaptados a la realidad (60.90 , 68.68 , 78.09 y 90.59 minutos) para obtener las humedades mencionadas previamente, para la pulpa que estaba congelada. En la Tabla 37 de la sección de anexos se detalla el resultado del cálculo de la humedad superficial (0.208 kg agua / kg pulpa seca), no ligada (3.453 kg agua / kg pulpa seca) y ligada (0.002 kg agua / kg pulpa seca), de la pulpa de café congelada. Contrario a lo esperado, la pulpa congelada contenía una humedad inicial menor a la de la pulpa fresca (78.76 ± 0.01 %). Eso fue debido a que el tratamiento para mantener la pulpa sin fermentarse permitió que parte de la humedad se eliminara de la pulpa por medio del congelamiento. Por las fibras de la pulpa, se dio una transferencia de la humedad interna hacia el hielo formado en la superficie exterior, por medio de capilaridad. Cuando la pulpa se descongeló, parte de la humedad superficial e interna de la pulpa se derritió y se disminuyó el contenido restante en el sólido. El coeficiente de transferencia de masa calculado fue de 0.008089 kg/m²s, lo cual indica mayor rapidez en la evaporación de la humedad del sólido, y confirma el menor tiempo de retención de la pulpa en el secador.

Se realizó una regresión del comportamiento de la humedad restante en la pulpa en función del tiempo de secado de esta curva, con coeficiente de correlación de 0.9918, para estimar el tiempo necesario de secado (78.09 minutos), Figura 47 de la sección de anexos. Como se mencionó en párrafos pasados, la pulpa seca debía contar con 15 ± 0.01 % de humedad, para cumplir con los parámetros de actividad de agua discutidos. Con esta curva de guía, se obtuvo la pulpa seca con 15.78 ± 0.01 % de humedad, secando con aire a temperatura promedio de 74.9 ± 1.7 °C, en 80 minutos. La diferencia entre el tiempo de secado de la pulpa congelada experimental y el tiempo calculado previamente fue de solamente de 1.91 minutos. Esta variación es mínima, dado que, tanto la curva como la prueba, se realizaron con pulpa congelada. Sin embargo, existe este error por la naturaleza variable de la pulpa de café, ya que es un material cuyas propiedades varían con cambios pequeños en las condiciones de congelamiento, descongelamiento, transporte, entre otros.

Como complemento a los resultados previamente descritos, se llevó a cabo una curva de secado a temperatura promedio de 65.3 ± 1.2 °C, Figura 48 de la sección de anexos. Se realizó una regresión para demostrar el comportamiento de la humedad restante en la pulpa en función del tiempo de secado, Figura 49 de anexos, con la cual se determinó el tiempo necesario (73.40 minutos) para lograr una humedad de 15.00 ± 0.01 %. El tiempo es menor al requerido en el secado a 75.2 ± 2.2 °C, debido a dos factores determinantes, uno dependiente del otro. En primer lugar, la pulpa utilizada en la elaboración de la curva fue pulpa congelada, lo cual varió las condiciones iniciales de secado. Consecuentemente, la humedad inicial cambió y resultó en 75.94 ± 0.01 %. Adicionalmente, la curva de secado a 65.3 ± 1.2 °C obtenida no cuenta con el comportamiento esperado. La sección constante del flux de evaporación no se ilustra, lo cual indica la poca humedad superficial que contenía la pulpa luego del descongelamiento. Es de esperarse que, una muestra de pulpa fresca con las mismas condiciones iniciales de secado tarde más en secar a 65 °C que a 75 °C.

Se recomienda hacer pruebas en el secador rotatorio actual de la finca y un balance del mismo con el fin de establecer los parámetros de salida de la pulpa para corroborar si se podría utilizar el equipo para el secado de la pulpa.

Posterior a la elaboración de las curvas de secado, se realizó un balance de masa y energía del secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias, según los parámetros de operación determinados en las pruebas anteriores. La propuesta de la piloto para la producción de infusión a partir de pulpa de café incluyó el dimensionamiento y cotización de los equipos requeridos para determinar el flujo del proceso de la planta piloto, y el análisis económico de la inversión para establecer la viabilidad del proyecto. Debido a esto, fue necesario elaborar y utilizar el balance de masa fue para el dimensionamiento de los diferentes equipos propuestos para la planta piloto. El dimensionamiento se llevó a cabo tomando en cuenta los requerimientos de flujos y temperaturas, según la producción por cosecha de la finca, utilizando un 30 % de la pulpa desechada como subproducto.

El balance de masa y energía correspondiente a las pruebas realizadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, a 23.8 °C y 84.6 kPa, se muestra en la Figura 50 y Tabla 41 de la sección de anexos. Los parámetros de operación fueron obtenidos de las pruebas anteriores y la curva promedio de secado; una temperatura promedio del aire de secado de 75.2 ± 2.2 °C, tiempo de secado de 96.78 ± 4.04 minutos o 1.61 ± 0.07 horas, humedad inicial de la pulpa de 85.23 ± 1.25 % y humedad final de 15.00 ± 0.01 %. Cabe notar que el tiempo de ciclo se sobredimensionó un 100 % con base en lo mencionado en el *Manual del Ingeniero Químico*, debido a la diferencia en tiempos de preparación y la operación de secado en un equipo de pruebas por lotes y un equipo de secado continuo. Dado que el secado de la pulpa en el secador de bandejas de la Universidad del Valle de Guatemala es por lotes, pero el paso de aire funciona de manera continua, se calculó el equivalente de las cantidades de pulpa en términos de flujos de un sistema continuo, para un balance correcto. Esto fue por medio del uso del tiempo de secado sin sobredimensionamiento, determinado con la curva de secado promedio descrita con anterioridad (1.61 horas), como base de cálculo del balance. Se realizó el balance de masa y energía para flujos a contracorriente, ya que el aire ascendía y se asumió un flujo horizontal de la pulpa que se secó en las bandejas.

El flujo de pulpa fresca fue 0.929 kg/h, con composición de 5.770 kg de agua por unidad de pulpa seca, obtenido de la multiplicación del tiempo de secado con la masa de pulpa ingresada al secador. Se secó 1.500 kg de pulpa fresca en bandejas agujereadas de metal, con el fin de promover el secado en toda el área superficial de la pulpa, ya que los agujeros permitieron el paso de aire a través de la pulpa, de arriba hacia abajo y viceversa. Al eliminar el agua para lograr un producto seco con 15 % de humedad, se obtuvo un flujo de 0.157 kg de pulpa seca por hora de secado. La energía a la entrada y salida de la pulpa fue de 83.393 y 19.989 kJ/h, respectivamente. El requerimiento del aire se determinó por medio de la resolución del balance de humedad del sistema a contracorriente, resultando en 10.904 kg por hora de secado. Debido a que el secador de bandejas era cerrado al ambiente, se supuso que todo el flujo de aire entrante al equipo salió en la misma cantidad. Sin embargo, el aire saliente contenía agua, lo cual aumentó su humedad absoluta (0.129 kg de agua / kg de aire seco), resultando en un flujo de 11.677 kg de aire húmedo por hora de secado. La energía del aire entrante y saliente fue 2767.789 y 5073.453 kJ/h, respectivamente.

Según el consumo del equipo, 29.67 kWh, establecido en el contador del secador, se calculó un consumo energético de 66221.898 kJ/h. Las pérdidas de calor en el equipo fueron de 63979.639 kJ/h, las cuales se dieron por el calentamiento de las bandejas de metal y las superficies internas del secador. Durante las pruebas, al sacar las muestras de pulpa siendo secada, el metal estaba caliente por su alta capacidad de conducción del calor. Esto indica que gran parte de la energía del aire de secado se transformó en calor al entrar en contacto con el metal. Adicionalmente, las pérdidas fueron altas porque no se utilizó el secador a su capacidad máxima; solamente se utilizó media bandeja y la capacidad máxima era de cinco bandejas. La energía perdida durante el secado de la pulpa representó un 92.63 % de la energía entrante al sistema.

También se llevó a cabo un balance de masa del secador de bandejas tomando como base de cálculo el dato promedio de la producción de café pergamino por cosecha de la finca (2500 quintales). Se propuso un uso inicial del 30 % de la pulpa desechada, debido a que el producto propuesto es una innovación poco conocida en el país y, de utilizar el 100 % del subproducto, se necesitaría primero un estudio de mercado. Este balance, con flujo de pulpa fresca de 200.699 kg/h, se muestra en la Figura 51 de la sección de anexos. Para la planta piloto de producción se dimensionó un secador continuo de tipo túnel, Tabla 14 de la sección de resultados, ya que es el más utilizado en la industria de alimentos para secar frutos, frituras, entre otros. El dimensionamiento se realizó para calcular el largo necesario del equipo (4.32 metros), para alcanzar una humedad de 15.00 ± 0.01 % en la pulpa, a partir del contenido inicial de 85.23 ± 1.25 %. Como se observa en la Tabla 14 de la sección de resultados, el largo del secador cotizado fue 5 metros, lo cual concuerda y cubre el requerimiento calculado. Se determinó la velocidad requerida de la banda transportadora de pulpa dentro del equipo, 2.08 m/h, tomando en cuenta el tiempo de ciclo del equipo. Esta variable, junto a otras como la temperatura de secado y tiempo de ciclo, resultaría necesaria para preparar el equipo y establecer como parámetros de operación del secado.

El material de construcción elegido fue acero inoxidable 304 de grado alimenticio porque es el recomendado para este tipo de aplicaciones por su inocuidad, durabilidad y sencilla limpieza. El secador de túnel propuesto debía contar con una banda transportadora para mover la pulpa fresca a través del equipo, y ventiladores que permitieran el flujo de aire de forma ascendente y descendente. Tomando en cuenta las características del secador tipo túnel, el tipo de flujo dentro del equipo, la base de cálculo de 2500 quintales de café pergamino por cosecha, y el 30 % de uso de la pulpa desechada, se obtuvo el balance en la Figura 52 de la sección de anexos. Para este diagrama también se tomó en cuenta la altura en la región de Acatenango y datos históricos de la humedad del aire, para corregir datos de entalpías con base en la humedad absoluta de entrada, que sería la fuerza motriz de la transferencia de humedad de la pulpa fresca de café, al aire de secado.

Adicional al secador continuo de tipo túnel, según el balance de masa se dimensionó el resto de los equipos necesarios para la planta piloto propuesta para la producción de la infusión a partir de la pulpa de café. Se tomó el flujo calculado de salida del secador de 33.828 kg de pulpa comercial por hora de secado, para plantear un transportador que llevara el material hacia una llenadora. El tipo de transportador propuesto fue un elevador de cangilones, cuyos requerimientos se establecieron en la Tabla 15 de la sección de resultados. El material de este también debía ser acero inoxidable 304, por las características favorables descritas con anterioridad. Por su método de funcionamiento, este tipo de transportador sería útil para elevar la pulpa seca hacia la tolva de alimentación de la llenadora. El siguiente equipo propuesto fue una llenadora de bolsas semiautomática, Tabla 16 de la sección de resultados. La razón principal de esta característica del equipo fue el flujo de entrada del mismo. Debido a que no es una producción industrial o de gran volumen, una llenadora automática representaba mucha capacidad ociosa o sin utilizar. Por otro lado, la producción no

era poca y difícilmente podría satisfacerse la demanda de llenado por medio de un equipo del tipo manual. Fue por esto que se eligió una semiautomática. El material seleccionado fue acero inoxidable 304 y se propuso la implementación de una llenadora con tolva de alimentación incluida. Por último, se propuso una selladora de tipo manual, Tabla 17 de la sección de resultados, con resistencia de calentamiento, para bolsas bilaminadas de polietileno, de presentación de 250 gramos de pulpa comercial. Este equipo si se propuso del tipo manual, debido al volumen de producción final y presentación establecida.

Se cotizó los equipos mencionado anteriormente con los requerimientos establecidos. El secador cotizado cuenta con las características mencionadas anteriormente, tiempo de calentamiento de 1 hora y potencia de 72 kW. Si se deseara aumentar el porcentaje de pulpa utilizada, se tendría que cambiar de equipo o evaluar la compra de otro secador, ya que la capacidad del secador de tipo túnel cotizada (180 – 220 kg de pulpa fresca/h) no cumpliría con el requerimiento correspondiente al uso del 100 % de la pulpa proveniente del beneficio húmedo (334.499 kg pulpa fresca/h). Adicionalmente, se hizo la cotización para un secador tipo túnel de mayor capacidad que cubriera el requerimiento del 30 a 100 % del uso de la pulpa. Sin embargo, el costo se elevó en \$ 21,536. El proveedor de este equipo indicó una merma del 3 % en relación al material entrante, por acumulación dentro del equipo. En el caso del resto de equipos, si se aumentara la utilización de pulpa de café, los equipos cumplirían con el requerimiento de flujos, según corresponda. Para la llenadora y selladora, se asumió una merma del 2 %, que tomó en cuenta la acumulación en el equipo en forma de polvo de pulpa seca. Por último, se asumió que el 100 % de las bolsas usadas en el proceso de sellado estarían en buen estado.

Se realizó un balance de masa global de entradas y salidas de flujos, y un diagrama de proceso de los equipos propuestos para la planta piloto de producción de infusión a partir de la pulpa de café seca, establecida en la región de Acatenango, Figuras 54 y 55 de la sección de anexos, respectivamente. El balance global resultó en una producción de 132 bolsas selladas de 250 gramos de pulpa comercial al 15 % de humedad, partiendo de 200.699 kg de pulpa fresca, al 85.23 ± 1.25 % de humedad, proveniente del beneficio de café por hora de operación. El consumo global de energía calculado, según especificaciones de los equipos fue 76.7 kW, siendo el secador el equipo con mayor consumo. El aire seco utilizado en el balance global fue 2353.125 kg/h y el aire saliente con agua fue 2518.949 kg de aire húmedo/h. En el diagrama de equipos se muestra la disposición y orden del proceso de la planta piloto propuesta, con base en los balances de masa previamente elaborados. El proceso inicia en la separación de granos cosechados, los cuales son despulpados y el subproducto se separa de la línea del beneficio húmedo del café. La pulpa se dirige al secador continuo tipo túnel para ser secada hasta alcanzar una humedad de 15.00 ± 0.01 %. Por medio del elevador de cangilones, la pulpa seca se traslada a la tolva de la llenadora semiautomática para empacarla en bolsas de 250 gramos. Cuando ha sido empacada, las bolsas se sellan y son encajadas en conjuntos de 12 unidades.

Se recomendaría dimensionar y cotizar varios equipos de secado continuo de tipo túnel, y evaluar su funcionamiento de manera paralela, para lograr el procesamiento de más porcentaje de pulpa proveniente del beneficio húmedo. También sería recomendable evaluar la trituración de la pulpa seca y dimensionar un equipo de molienda, con el fin de contar con diferentes presentaciones de la pulpa de café, adicional a la infusión del producto seco entero.

Posterior al dimensionamiento y cotización de los equipos propuestos para la planta piloto de producción de una infusión a partir de la pulpa de café, se llevó a cabo un análisis económico para evaluar la viabilidad del proyecto planteado. Se elaboró un flujo de caja proyectado a 10 años de funcionamiento de la planta piloto, y con base a este se calculó el valor presente neto (Q 34,127.14), la tasa interna de retorno (8.48 %) y recuperación de la inversión (7.24 años). Por último, se hizo un análisis de sensibilidad del cual las variables que provocaron cambios más significativos fueron el precio del producto terminado y el costo de materiales de empaque y operación. Los resultados principales del análisis económico se observan en la Tabla 18 de la sección de resultados. Con variaciones en los rubros mencionados anteriormente, se lograría una combinación de mayor VPN y TIR, y menor tiempo de recuperación de la inversión.

La cotización de equipos se solicitó en INCOTERM CIF, al que posteriormente se le calculó el equivalente en DDP, con el fin de tener un costo representativo de los equipos transportados hasta la finca localizada en la región de Acatenango, Tablas 43 y 44 de la sección de anexos. Para la presentación de 250 gramos de pulpa de café, se cotizó bolsas impresas para las cuales se debía pagar placas de impresión, según indicaciones del proveedor. Este costo fue incluido en la inversión por equipos de la planta piloto. Utilizando como base factores de estimación de costos de las Tablas 9 – 51 y 9 – 53 del Manual del Ingeniero Químico, se realizó el cálculo de la inversión inicial tomando en cuenta el costo de la inversión por los equipos, instalación, tuberías, electricidad, instrumentación, preparación del sitio, servicios auxiliares, gastos relacionados a la inversión inicial y contingencia, resultando en Q 1,012,184.91, Tabla 45 de anexos. Debido a la naturaleza del producto, se utilizó el rubro de procesamiento de sólidos de la Tabla 9 – 51, y se adaptaron a la Tabla 9 – 53. En el caso de la instalación, el factor toma en cuenta los equipos con sus pantallas táctiles y equipo eléctrico incluido. Para las tuberías y servicios auxiliares, se tomó el dato más bajo ya que los servicios son mayormente eléctricos. El rubro de la electricidad incluyó los gastos relacionados a las conexiones necesarias de los equipos, tomando en cuenta que en el beneficio se tiene conexión a la red nacional. Para la instrumentación y la preparación del sitio, se consideró los controles con los que ya contaban los equipos en las cotizaciones y la infraestructura actualmente en la finca, por eso se tomó también el factor inferior del rango propuesto. El factor para los gastos relacionados a la inversión inicial tomó en cuenta el transporte de personal hacia la finca y viáticos, entre otros.

La vida útil del secador (10 años), elevador de cangilones (7 años), llenadora y selladora (7 años), fue indicada por el proveedor de cada equipo. Se llevó a cabo el cálculo de la depreciación por medio del método

línea recta, que resultó en las Tablas 47, 48 y 49 de la sección de anexos. Esto se traduce a la compra de un nuevo secador en el año 10 del proyecto, y elevador de cangilones, llenadora y selladora en el año 7.

Para el cálculo de la mano de obra necesaria, se tomó en cuenta la duración de la cosecha de 120 días y el uso del 30 % de la pulpa proveniente del beneficio. Con el objetivo de evitar pérdidas de recursos como tiempo y energía, por la hora necesaria de calentamiento del secador, se planteó un programa semanal de trabajo, Figura 56 de la sección de anexos, en la cual se ilustra que dos días de la semana se utilizaría el secador. Con esto, se determinó las horas de uso que debía operarse el secador cada uno de estos días, 22.99 horas. En el caso de los otros equipos, elevador de cangilones, llenadora y selladora, se propuso su uso cuatro días de la semana, ya que no requieren de un tiempo de preparación previo a su operación. Al igual que para el secador, se calculó el tiempo de uso diario, 3.87 horas. La cantidad de personas necesarias para el uso del secador fue recomendación del proveedor, y en el caso de los otros equipos, al ser más sencillos de operar, se tomó como base las personas requeridas del secador. Se planteó la contratación de dos trabajadores para el funcionamiento de la planta piloto.

Con base en lo mencionado anteriormente, se propuso un plan de trabajo semanal, Tabla 50 de la sección de anexos, para la duración de la cosecha, con dos turnos de 24 horas para los días que se utilizaría el secador, y turnos de cinco horas los días de uso de la máquina de llenado y sellado. La programación se basó en un horario de 6 am a 6 am los miércoles y sábados, cubierto por dos turnos de 12 horas. Estos días el trabajador del primer turno encendería una vez el equipo y empezaría el proceso de secado de la pulpa fresca. El cambio de turno se llevaría a cabo con el equipo encendido y funcionando, y el trabajador del segundo turno lo apagaría hasta terminar su jornada. Cada semana, los trabajadores se alternarían para trabajar jornada de 6 am a 6 pm una semana, y de 6 pm a 6 am la siguiente semana. Los lunes, martes, jueves y viernes se planteó que la operación fuera de 12 pm a 5 pm, para ambos trabajadores. En estos días las actividades de trabajo consistirían en la acumulación del 30 % de la pulpa durante el funcionamiento del beneficio húmedo, lo cual haría un trabajador mientras el otro empaca la pulpa. La operación de la llenadora por cuatro horas para empacar la pulpa seca que se secó el día anterior correspondiente se haría en línea con el encajado del producto final en cajas de 12 unidades cada una. La última hora se utilizaría para que los operadores limpien el área y den mantenimiento a los equipos. Tomando en cuenta las horas de operación de cada equipo, descritas anteriormente, se calculó el consumo energético, que resultó en Q 67,916.92 anual, Tabla 46 de anexos.

Con esta programación, se lograría el secado de pulpa fresca con menos de dos días de acumulación, tiempo suficiente para evitar la fermentación de la pulpa, según estándares utilizados actualmente en el beneficio húmedo en la finca de café. La pulpa seca proveniente del secador se guardaría para empacar al día hábil siguiente en bolsas herméticamente selladas. Cabe notar que debido a que el secador cuenta con una banda de secado de malla, cualquier exceso de humedad por la acumulación de la pulpa fresca, al ingresar al

secador sería eliminado. Las bolsas utilizadas para la acumulación en ambos casos serían Ecotact multicapas, para evitar contaminación cruzada o cambio de humedad de la pulpa por humedad en el ambiente. En las Tablas 51 a 55 de la sección de anexos, se organizó las jornadas y horas ordinarias, extras y dobles, correspondiente a cada una. Basado en las prestaciones de ley, se hizo el cálculo del costo de mano de obra con respecto a cada trabajador, y el costo total fue de Q 37,767.99.

Como costo de materia prima, pulpa de café proveniente del beneficio húmedo, se tomó el precio al cual la fina de café había vendido en algunas ocasiones el subproducto, Q 75.00 por quintal. Esto se tradujo en un costo anual de Q 119,486.15, de materia prima. El material de empaque y operación incluyó las bolsas impresas para el empaque de la pulpa seca, cajas de capacidad de 12 unidades de producto final, bolsas de capacidad de 50 lb para acumular la pulpa fresca, y bolsas de la misma capacidad para la acumulación de la pulpa seca. El costo total anual por materiales indirectos de fabricación fue Q 261,244.89. Estos costos, así como los mencionados en párrafos anteriores, a excepción de los equipos, no incluyeron IVA. Los proveedores de los materiales indirectos de fabricación mencionados con anterioridad son locales (Guatemala).

Para establecer el precio del producto final, se realizó un análisis de los precios de presentaciones de infusiones ya a la venta en el mercado Guatemalteco. Se evaluó también el precio de una presentación de 110 gramos de pulpa de café seca. Sin embargo, dada la variabilidad entre los resultados y entre el precio de infusión de pulpa de café y el resto de presentaciones, se decidió establecer el precio en relación un margen sobre utilidades definido. Se utilizó como base un margen de 35 %, resultando en un precio de venta de Q 16.55 por bolsa de presentación de pulpa de café seca de 250 gramos.

Con lo anterior, se elaboró un flujo de efectivo proyectado a 10 años, mostrado en la Tabla 58 de la sección de anexos. Este flujo fue útil para el cálculo del valor presente neto (VPN) respecto a la inversión después del tiempo del proyecto, resultando en Q 34,127.14. Cabe notar que este dato se calculó con base a la tasa de inflación de Guatemala (7.55 %) acumulada en 2022, establecida en el proyecto como la tasa mínima aceptable de rendimiento (TMAR). Se tomó este dato ya que los resultados representarían el valor del dinero después del tiempo del proyecto, tomando en consideración el efecto de la inflación. La tasa interna de retorno (TIR = 8.48 %) de la planta de producción propuesta fue mayor que la TMAR. Se estableció que se recuperaría lo invertido, en un plazo de 7 años y 3 meses de funcionamiento de la planta.

Se evaluaron algunos rubros en un análisis de sensibilidad para determinar su efecto en el VPN, TIR y período de recuperación, Figuras 57, 58 y 59 de la sección de anexos, respectivamente. Las variables fueron precio de venta, costo de materia prima, material de empaque y operación, mano de obra, servicios y depreciación de los equipos. Los rubros que resultaron en cambios más significativos en el VPN, TIR y período de recuperación fueron el precio de venta y el costo del material de empaque y operación. Se puede

observar que, con una variación positiva del 5 %, el precio de venta elevó en Q 200,000 el valor presente neto, en 5 % la tasa interna de retorno, y disminuyó el período de recuperación a 5 años y 11 meses. Con esto, el precio por bolsa de la infusión sería de Q 17.37, con margen de 40.47 % sobre utilidades. Por otro lado, 5 % de aumento en el costo de material de empaque y operación, disminuirían en Q 67,091.97 el VPN, en 3 % la TIR y aumentarían 7 meses la recuperación de la inversión. El análisis de sensibilidad indicó que el aumento del precio de venta en 5 % o más y una disminución de 15 % o más del costo de materiales de empaque y operación, daría mejores resultados de VPN, TIR y período de recuperación. Con base en estos resultados, se comprobó la viabilidad del proyecto de la propuesta de planta piloto para la producción de infusión a partir de la pulpa de café, ya que el valor presente neto del flujo de efectivo del proyecto a 10 años fue un valor mayor a cero, lo cual corresponde a utilidades sobre la inversión luego de recuperar el capital inicial invertido. Adicionalmente, la tasa interna de retorno fue mayor a la TMAR planteada, indicando la existencia de utilidades en caso se llevara a cabo el proyecto, aún con la pérdida de valor del dinero debida al efecto de la inflación. Por último, la propuesta es viable, ya que el tiempo calculado para la recuperación de la inversión inicial (7 años y 3 meses) fue menor al tiempo proyectado de vida de la planta piloto (10 años), lo cual corrobora los datos de la TIR y VPN mencionados con anterioridad e indica la obtención de utilidades previo a la finalización de la operación de la planta piloto de producción. Es importante reiterar que estos datos se basaron en el 30 % de la utilización de la pulpa, no el 100 % del material.

Se realizó una catación del producto final (10 g extraídos en 450 ml), que resultó en notas de sabor y aroma caramelo y jugo de arándano, Tabla 59 en la sección de anexos. Para complementar, se llevó a cabo un panel y análisis sensorial de la infusión de la pulpa de café seca en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, con base en las preguntas mostradas en la Figura 60 de anexos. Los panelistas recibieron dos muestras, una de infusión caliente y otra fría, con la misma proporción de pulpa y agua (20 g extraídos en 900 ml). Se evaluó la diferencia de aceptación general y características organolépticas (color, olor, sabor y aspecto) de ambas muestras. Según el análisis de preferencia de la Figura 63 en la sección de anexos, la mayoría de las personas, 20 de 33 encuestados, se inclinó por la muestra en frío, aportando comentarios acerca de la disminución de la acidez y mejoramiento del sabor de la pulpa a bajas temperaturas. Los resultados organolépticos se muestran en las Figuras 61 y 62 de anexos, en los cuales se puede observar que la tendencia es muy similar en cuanto a los aspectos evaluados en cada muestra. En el caso de la muestra 590, el atributo de menor valor fue el sabor, con un puntaje de 5.18 en promedio, el cual entró en una categoría de neutralidad con respecto al interés del panelista en el atributo. Al analizar la muestra 745, el sabor también fue el aspecto con menor puntaje (5.80 en promedio).

La catación y el análisis sensorial se realizaron para proponer un producto final con las notas de sabor y resultados organolépticos como valor agregado. Con estas evaluaciones se puede proporcionar un producto final a clientes potenciales que tengan interés por las características presentadas en la infusión de pulpa de café seca. Es importante mencionar que la catación y el panel sensorial se llevaron a cabo sin endulzar las

muestras, ya que esto influenciaría las notas percibidas de la infusión, y la opinión de los panelistas con respecto a la aceptación del producto.

Sería recomendable evaluar la posibilidad de utilización del 100 % de la pulpa, para comparar los resultados de inversión inicial, VPN, TIR y período de recuperación del proyecto. Adicionalmente, sería recomendable llevar a cabo un análisis y evaluación del proceso para la exportación de la pulpa de café seca. Por último, se recomendaría llevar a cabo una catación y análisis sensorial de diferentes tipos de pulpa de café seca, para determinar cuál es la que mejor puntaje obtiene en relación a sus propiedades organolépticas, y más aceptación tiene entre los panelistas.

IX. CONCLUSIONES

- Se obtuvo del análisis de humedad un valor de 85.23 ± 1.25 % para la pulpa fresca y 15.78 ± 0.01 % para la pulpa seca.
- La pulpa seca de café resultó tener características beneficiosas por su actividad antioxidante de 1.6238 ± 0.1331 mg/ml, contenido de polifenoles de 8.4008 ± 0.4807 mg/g pulpa, 1507.7916 ± 133.2079 ppm de cafeína, 46.7949 ± 3.6369 ppm de ácido clorogénico y 0.576, 1.082, 0.568 % m/v de sacarosa, glucosa y fructosa, respectivamente; contó también con la presencia de minerales y nutrientes (6.65 % m/v y 139.66 ppm), y materia orgánica (93.00 %), Tabla 12 de la sección de resultados.
- Se obtuvo una curva de secado de pulpa de café con 85.23 ± 1.25 % de humedad inicial y humedad final de 15.78 ± 0.01 %, tras 96.78 ± 4.04 minutos de en el secador de bandejas con aire a 75.2 ± 2.2 °C, como se muestra en la Figura 13 y Tabla 13 de la sección de resultados.
- A partir del balance de masa y energía del secador de bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias y con base de cálculo de 30 % de uso de la pulpa proveniente del beneficio húmedo, se dimensionó el equipo propuesto para la planta piloto de producción de infusión de pulpa de café: secador continuo de tipo túnel de capacidad de secado de 200.699 a 334.499 kg de pulpa/h; transportador tipo elevador de cangilones y llenadora semiautomática de capacidad de 33.828 a 112.761 kg de pulpa/h; y selladora manual con capacidad de 3 bolsas/min; descritos en las Tablas 14 a 17 de la sección de resultados.
- El análisis económico proyectado a 10 años de operación de la planta, con base en las unidades vendidas según el balance de masa global, precio de venta de Q16.55 con margen de 35 % sobre utilidades, resultó en un valor presente neto de Q 34,127.14, una tasa interna de retorno de 8.48 % y 7.24 años de recuperación de la inversión inicial, Tabla 18 de la sección de resultados. Las variables en el análisis de sensibilidad que provocaron cambios más significativos en el VPN, TIR y período de recuperación de la inversión fueron el precio de venta de la pulpa y el costo de material de empaque y operación.

X. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pruebas con pulpa de diferentes tipos de café y diferentes alturas de cosecha, para comparar las variaciones que se darían en el contenido de antioxidantes, cafeína, azúcares, minerales y nutrientes.
- Se recomienda realizar análisis de óxidos en la pulpa antes y después del proceso de secado, para evaluar el efecto del aire caliente en los componentes presentes en la pulpa de café, así como las reacciones que se dieron en el proceso.
- Se recomienda realizar un estudio de la vida útil, de anaquel y variación de humedad hasta el consumo del producto final, con humedad inicial de 15.78 ± 0.01 %, para determinar las condiciones necesarias de empaque y el rango de tiempo de la pulpa seca en buen estado.
- Se recomienda hacer pruebas y un balance de masa y energía del secador rotatorio actual en la finca de café, para establecer los parámetros de salida de la pulpa y corroborar si podría utilizarse el equipo para el secado de la pulpa.
- Se recomienda evaluar el uso de un equipo de molienda para contar con diferentes presentaciones del producto final, la pulpa de café seca.
- Se recomienda evaluar la posibilidad de utilización del 100 % de la pulpa, para comparar los resultados de inversión, VPN, TIR y período de recuperación del proyecto.
- Se recomienda hacer un análisis económico y de mercado para evaluar el secado, almacenamiento, exportación y venta de la pulpa de café.
- Se recomienda llevar a cabo una catación y análisis sensorial de diferentes tipos de café seca, para determinar cuál obtiene mejor puntaje de propiedades organolépticas y aceptación por parte de panelistas.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Administración de Alimentos y Medicamentos. (diciembre 2018). *Al grano: cuánta cafeína es demasiada?* Recuperado el 3 de agosto de 2022 <https://www.fda.gov/consumers/articulos-para-el-consumidor-en-espanol/al-grano-cuanta-cafeina-es-demasiada>
- Agexport. (agosto 2021). *Cifras de Exportación Guatemala. Agosto 2021*. Agexport Guatemala. Recuperado el 16 de noviembre 2021 <https://export.com.gt/cifras-de-exportacion-2021>
- Alvarado, S. (1994). *Cultivo y beneficiado del café*. Editorial Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. https://books.google.com.gt/books?id=15qrSG-5114C&dq=epicarpio+y+mesocarpio+cafe&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Arcila, J., Farfan, V., Moreno, B., Salazar, G. Hincapie, G. (mayo 2007). Crecimiento y desarrollo de la planta de café. *Sistemas de producción de café en Colombia*. 21 – 60. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/720>
- Arroyo, G. (1998). *Biotecnología: ¿Una salida para la crisis agroalimentaria?* Editorial Plaza y Valdés, Ciudad de México, México. https://books.google.com.gt/books?id=nog0xIM1fSoC&dq=patios+de+secado&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Asociación Nacional del Café. (2018). *Guía Ambiental para el sector café de Guatemala. Acuerdo Ministerial Número 314 – 2018. Primera edición*. 1 – 54. <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/16040.pdf>
- Badui, D. (2006). *Química de los alimentos*. 4ta edición pág. 1 – 25. Pearson Educación, Ciudad de México, México.
- Becerra, E. (2016). *Agua y actividad de agua*. Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Borrayo, B., Guadalupe, A., Montenegro, L., Morataya, M., Samayoa, L. (julio 2014). *Extracción de mucílago, azúcares y taninos de la pulpa del café y producción de ácido acético comercial a partir de las mieles del café*. Universidad de San Carlos de Guatemala, http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_3706.pdf

- Boxler, M. (s.f). Infusiones de plantas aromáticas y medicinales. Editorial Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_infusiones_de_plantas_aromaticas_y_medicinales.pdf
- Blank, L. (2012). *Ingeniería Económica. 7ma edición*. Editorial McGraw – Hill, Ciudad de México, México.
- Causse, C. (2010). Los secretos de salud de los antioxidantes. Editorial Hispano – Europea. Barcelona, España.
https://books.google.com.gt/books?id=ARlknnNEZ4wC&dq=antioxidantes&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Carrillo, M. (septiembre 2017). *Hoja de seguridad – Agua tipo destilada*. Laboratorios Químicos ARVI, S.A. Extraído de <http://www.arvicr.com/productos/msds/agua-destilada.pdf>
- Cayman. (septiembre 2022). *Safety Data Sheet – Chlorogenic Acid*. Cayman Chemicals. Michigan, Estados Unidos. Extraído de <https://cdn.caymanchem.com/cdn/msds/70930m.pdf>
- Cervera, A. (2003). *Envase y embalaje: La venta silenciosa*. Editorial ESIC, Madrid, España.
https://books.google.com.gt/books?id=Yzha4dQ10yoC&dq=empaque+secundario&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Chang, R. (2013). *Química. 11ma edición*. Editorial McGraw Hill. Ciudad de México, México.
- Corro, Grisel & Pal, Umapada & Cebada, Surinam. (2014). *Enhanced biogas production from coffee pulp through deligninocellulosic photocatalytic pretreatment*. Energy Science & Engineering. 2. 10.1002/ese3.44.
https://www.researchgate.net/publication/265131535_Enhanced_biogas_production_from_coffee_pulp_through_deligninocellulosic_photocatalytic_pretreatment
- CropLife. (s.f). *Roya del cafeto*. CropLife Latin America, San José, Costa Rica.
<https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/roya-del-cafeto>
- García, M. (2019). *Caracterización y desarrollo de una harina de pulpa de café (Coffea arabica)*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <https://repositorio.uvg.edu.gt/bitstream/handle/123456789/3433/Tesis%20Maria%20Fernanda%20Garcia%20Pacay.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Garzaro, D. (2021). Extracción de ácido clorogénico a escala laboratorio a partir de pulpa de café para evaluar una alternativa de aprovechamiento. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/123456789/3978>
- Gil, A. (junio 2010). *Tratado de Nutrición: Composición y Calidad Nutritiva de los Alimentos*. Editorial Médica Panamericana, Ciudad de México, México. https://books.google.com.gt/books?id=hcwBJ0FNvqYC&dq=acido+clorogénico&hl=es&source=gb_s_navlinks_s
- Godínez, J. (2004). *Concentración, caracterización funcional y utilización en pan francés de la fibra dietética de la pulpa de café (Coffea arabica)*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/145>
- González, C. (2015). *Extracción de aceite de café proveniente de la extracción en poso de café resultante de fabricación de bebida caliente tipo espresso para la producción de biodiésel*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/123456789/1366>
- Herrera, C., Solís, L. (mayo 2005). *Desarrollo de un método de análisis para la cuantificación de ácidos clorogénicos en café*. Editorial Agronomía Costarricense, https://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n02_099.pdf
- Hernández, G. (mayo 2019). *El azufre y su importancia en la vida humana*. Ciudad de México, México. Extraído de <https://invdes.com.mx/los-investigadores/el-azufre-y-su-importancia-en-la-vida-humana/>
- Indrayanto, G. (2021). *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology*. ScienceDirect <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/ic50>
- Instituto Nacional de Estadística. (octubre 2020). *Encuesta Nacional Agropecuaria con enfoque en granos básicos y cultivos permanentes (maíz, frijol, arroz, café, caña de azúcar, hule, palma africana). Año Agrícola 2019 – 2020*. <https://www.ine.gob.gt/sistema/uploads/2021/01/22/20210122164213QDinUvuRa9GjopyXaTuNMXc3gd6Jq1Q1.pdf>
- Jadid, N., Hidayati, D., Rosyda, S. (26 junio 2017). *Antioxidant activities of different solvent extracts of Piper retrofractum Vahl. using DPPH assay*. Department of Biology, Muhammadiyah University Surabaya, Indonesia, <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4985410>

- Joachín, V. (2004). *Concentración, caracterización funcional y utilización en pan francés de la fibra dietética de la pulpa de café (Coffea arabica)*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/handle/123456789/145>
- KC, Y.; Subba, R.; Shiwakoti, L.D.; Dhungana, P.K.; Bajagain, R.; Chaudhary, D.K.; Pant, B.R.; Bajgai, T.R.; Lamichhane, J.; Timilsina, S.; et al. Utilizing Coffee Pulp and Mucilage for Producing Alcohol-Based Beverage. *Fermentation* 2021, 7, 53. <https://doi.org/10.3390/fermentation7020053>
- Lewis, J. (septiembre 2021). *Introducción al papel del magnesio en el cuerpo*. Nueva Jersey, Estados Unidos. Extraído de <https://www.msdmanuals.com/es/hogar/trastornos-hormonales-y-metabolicos/equilibrio-electrol%C3%ADtico/hiperfosfatemia-concentraciones-altas-de-fosfato-en-la-sangre>
- Los Conejos. (2020). *Procesamiento – Uso de pulpa*. Finca Los Conejos, Specialty Coffee, Santa Rosa, Guatemala. Extraído de <https://fincalosconejos.com/procesamiento/>
- McCabe, W., Smith, J., Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en Ingeniería Química (7ma edición)*. México: McGraw – Hill
- Meyer. (octubre 2018). *Hoja de datos de seguridad – Ácido ascórbico*. Química Suastes, S.A. Ciudad de México, México. Extraído de http://reactivosmeyer.com.mx/datos/pdf/materias/hds_5205.pdf
- Meyer. (agosto 2018). *Hoja de datos de seguridad – Carbonato de sodio*. Química Suastes, S.A. Ciudad de México, México. Extraído de http://reactivosmeyer.com.mx/datos/pdf/materias/hds_6820.pdf
- Montilla, J., Arcila, J., Aristizábal, M., et al. (abril 2008). Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. *Avances Técnicos Cenicafé*.
- NIH. (noviembre 2019). *Calcio*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Calcium-DatosEnEspanol/>
- NIH. (diciembre 2019). *Cobre*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/pdf/factsheets/Copper-DatosEnEspanol.pdf>
- NIH. (diciembre 2019). *Fósforo*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Phosphorus-DatosEnEspanol/>

- NIH. (abril, 2022). *Hierro*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iron-DatosEnEspanol/>
- NIH. (octubre 2019). *Manganeso*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Manganese-DatosEnEspanol/>
- NIH. (marzo 2019). *Potasio*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Potassium-DatosEnEspanol/>
- NIH. (diciembre 2021). *Zinc*. National Institutes of Health, Maryland, Estados Unidos. Extraído de <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Zinc-DatosEnEspanol/>
- OMS. (marzo 2014). *La OMS abre una consulta pública acerca del proyecto de directrices sobre los azúcares*. Ginebra, Suiza. Extraído de <https://www.who.int/es/news/item/05-03-2014-who-opens-public-consultation-on-draft-sugars-guideline>
- Oña, Carmen. (febrero 2017). *Utilización de equipos y utillaje en la elaboración y tratamiento de productos alimentarios*. Editorial IC, Málaga, España. https://books.google.com.gt/books?id=p1YpEAAAQBAJ&dq=llenadoras&hl=es&source=gb_snavlinks_s
- Organización Internacional del Café. (agosto 2021). *Informe del mercado de Café*. 1 – 12. Organización Internacional del Café. <https://www.ico.org/documents/cy2020-21/cmr-0821-c.pdf>
- Pacay, M. (2019). *Caracterización y desarrollo de una harina de pulpa de café (Coffea arabica)*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <http://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/123456789/3433>
- Pavia, D. (2011). *A Small – Scale Approach to Organic Laboratory Techniques*, 3ra edición. Editorial Brooks/Cole, Cengage Learning. California, Estados Unidos
- PCE Ibérica. (2014). *Balanzas para medición de humedad*. Recuperado el 5 enero 2022. <https://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/medidores/balanzas-humedad.htm>

- Peña, A. (2002). *Bioquímica*. Editorial Limusa, Ciudad de México, México. https://books.google.com.gt/books?id=EFUP472dyEMC&dq=monosacaridos&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Pérez, J. (2010). Caracterización de la calidad del agua en la planta de tratamiento de agua potable y en la red de distribución de la Ciudad de Yopal. Universidad Industrial del Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2010/133761.pdf>
- Perry, R. y Chilton, C. (1994). *Perry's Chemical Engineers' Handbook (7ma edición)*. México: McGraw – Hill.
- Puerta, G., Echeverry, J. (abril 2015). Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. *Avances Técnicos Cenicafé*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0454.pdf>
- Ramos, J. (julio 2022). *Café: Un recorrido por la tecnología cafetera en Antioquia*. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. https://books.google.com.gt/books?id=gfR5EAAAQBAJ&dq=despulpadora+de+café&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Rioja, A. (diciembre 2018). *Determinación de la capacidad antioxidante total, fenoles totales, y la actividad enzimática en una bebida no láctea en base a granos de chenopodium quinoa*. Revista Boliviana de Química, vol. 35. 168 – 176. <https://www.redalyc.org/journal/4263/426358213006/html/>
- Rodríguez, H. (agosto 24). Propiedades del nitrógeno. National Geographic, España. Extraído de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-nitrogeno-n_18217
- Rodríguez, N., Zambrano, D. (marzo 2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Avances Técnicos Cenicafé*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0393.pdf>
- Rosales, S. (agosto 2019). *Antioxidant capacity, bioactive compounds in coffee pulp and implementation in the production of infusions*. Editorial Universidad de Colombia, Medellín, Colombia
- Sedesol, (1998). Manual de normas de calidad de envase y empaque. Recuperado el 23 de agosto de 2022 <http://www.liconsa.gob.mx/wp-content/uploads/2012/01/man-nor-cal-env-emp-hist.pdf>

Serna Jiménez JA, Torres Valenzuela LS, Martínez Cortínez K, Hernández Sandoval MC. Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *rev.ion.* 2018;31(1):37-42. doi: 10.18273/revion.v31n1-2018006

Sigma – Aldrich. (julio 2021). *Ficha de datos de seguridad – Ácido gálico*. Merck Chemical and Life Science, S.A., Madrid, España. Extraído de https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM-842649

Sigma – Aldrich. (julio 2022). *Ficha de datos de seguridad – Ácido tánico*. Merck Chemical and Life Science, S.A., Madrid, España. Extraído de https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/msds/MDA_CHEM-100773

Sigma – Aldrich. (octubre 2019). *Ficha de datos de seguridad – DPPH*. Merck Chemical and Life Science, S.A., Madrid, España.

Spiller, G. (abril 2019). *Caffeine*. Editorial CRC Press. Florida, Estados Unidos. https://books.google.com.gt/books?id=Rgs_rVOceZwC&dq=caffeine&hl=es&source=gbs_navlinks_s

ThermoFisher. (junio 2022). *Ficha de datos de seguridad – Cafeína*. Fisher Scientific, Leicestershire, Reino Unido. Extraído de <https://www.fishersci.es/store/msds?partNumber=10263800&productDescription=100GR+Caffeine%2C+extra+pure%2C+SLR&countryCode=ES&language=es>

ThermoFisher. (enero 2022). *Ficha de datos de seguridad – Folin – Ciocalteu*. Fisher Scientific, Leicestershire, Reino Unido. Extraído de <https://www.fishersci.es/store/msds?partNumber=10191520&productDescription=500ML+Folin+%26+Ciocalteu%27s+phenol+reagent%2C+pure&countryCode=ES&language=es>

ThermoFisher. (enero 2021). *Ficha de datos de seguridad – Metanol*. Fisher Scientific, Leicestershire, Reino Unido. Extraído de <https://www.fishersci.es/store/msds?partNumber=10653963&productDescription=2.5LT+Methanol%2C+for+HPLC-MS&countryCode=ES&language=es>

Torres, S. (7 agosto 2018). *Secado de Pulpa de Café: Condiciones de Proceso, Modelación Matemática y Efecto sobre Propiedades Físicoquímicas*. Editorial Universidad La Gran Colombia Seccional Armenia. Quindío, Colombia.

https://books.google.com.gt/books?id=Rgs_rVOceZwC&dq=caffeine&hl=es&source=gs_navlinks_s

Treybal, R. (1980). *Operaciones de Transferencia de Masa. (2da edición)*. Editorial McGraw – Hill. Ciudad de México, México. https://books.google.com.gt/books?id=Rgs_rVOceZwC&dq=caffeine&hl=es&source=gs_navlinks_s

Vásquez, J. (2021). *Evaluación de métodos para la producción de etanol a partir de pulpa de café*. Universidad del Valle de Guatemala, Guatemala. Extraído de <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/4094>

Velásquez, R. (marzo 2019). *Guía de Variedades de Café. (2da edición)*. Asociación Nacional del Café, Guatemala. <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/16040.pdf>

World Coffee Research. (s.f). *Café Arábica*. Extraído el 5 de septiembre de 2022 <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/info/coffee/about-varieties>

World Coffee Research. (s.f). *Catuai*. Extraído el 5 de septiembre de 2022 <https://varieties.worldcoffeeresearch.org/es/varieties/catuai>

Zambrano, G. (febrero 2015). *Determinación y evaluación de la producción de biodiésel a partir de desechos de extracción de la bebida de café*. Fondo Nacional de la Ciencia y Tecnología. Extraído de <https://fondo.senacyt.gob.gt/portal/index.php/catalogo/15-codigo/611-39-2012-energia>

XII. ANEXOS

A. Caracterización de pulpa

Tabla 19. Toxicidad de reactivos utilizados en las pruebas de antioxidantes, polifenoles, cafeína, ácido clorogénico y azúcares, para caracterización de la pulpa fresca y seca

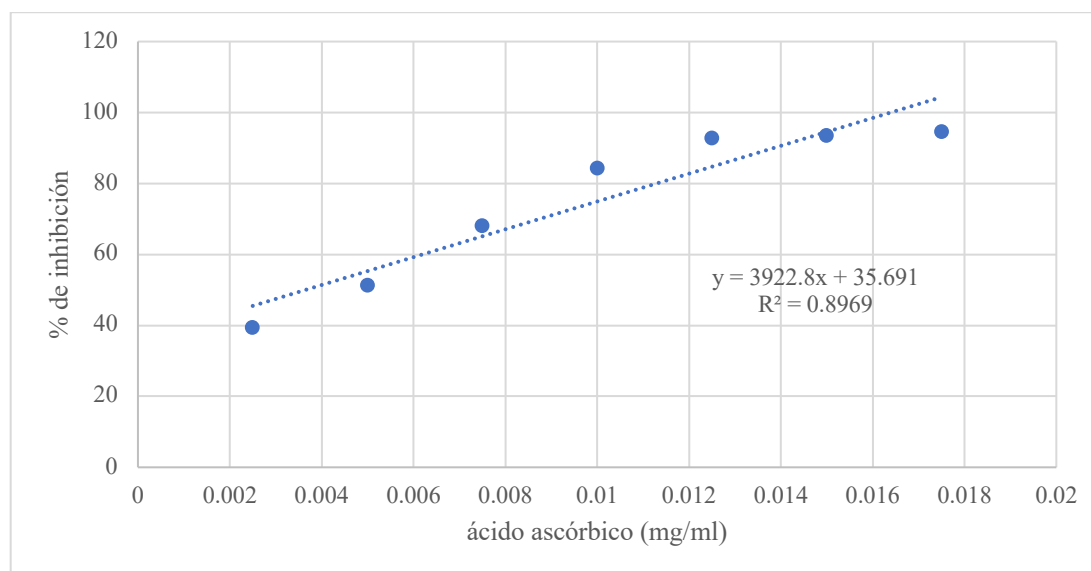
Reactivo	Inhalación	Contacto con piel	Contacto con ojos	Ingestión
Agua destilada	No es peligroso	No es peligroso	No es peligroso	No es peligroso
Metanol	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar con abundante agua por 15 minutos	Llamar inmediatamente a un centro de toxicología
DPPH	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua y jabón	Enjuagar con abundante agua y jabón	Beber agua inmediatamente
Ácido ascórbico	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar la boca con abundante agua
Folin – Ciocalteu	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar la boca y beber agua
Carbonato de sodio	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar la boca con abundante agua
Ácido tánico	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua	Enjuagar con abundante agua	Enjuagar la boca y beber agua
Ácido gálico	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua	Enjuagar con abundante agua	Enjuagar la boca y beber agua
Cafeína	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar con abundante agua por 15 minutos	Enjuagar la boca y beber agua
Ácido clorogénico	Trasladarse al exterior	Lavar con abundante agua y jabón	Enjuagar con abundante agua	Enjuagar la boca con abundante agua

Tabla 20. Equipos utilizados en la caracterización de la pulpa fresca y seca

Equipo	Marca	Modelo	Incertidumbre
Balanza analítica	OHAUS	PA11	0.01 %
Espectrofotómetro UV – VIS	Thermo Spectronic	Genesys 20	0.5
HPLC	Agilent	1100 Series	-
Higrómetro de punto de rocío	AquaLab	Serie 3	0.0005

1. Pulpa fresca

Figura 14. Curva de calibración 1 para determinar antioxidantes en pulpa de café fresca



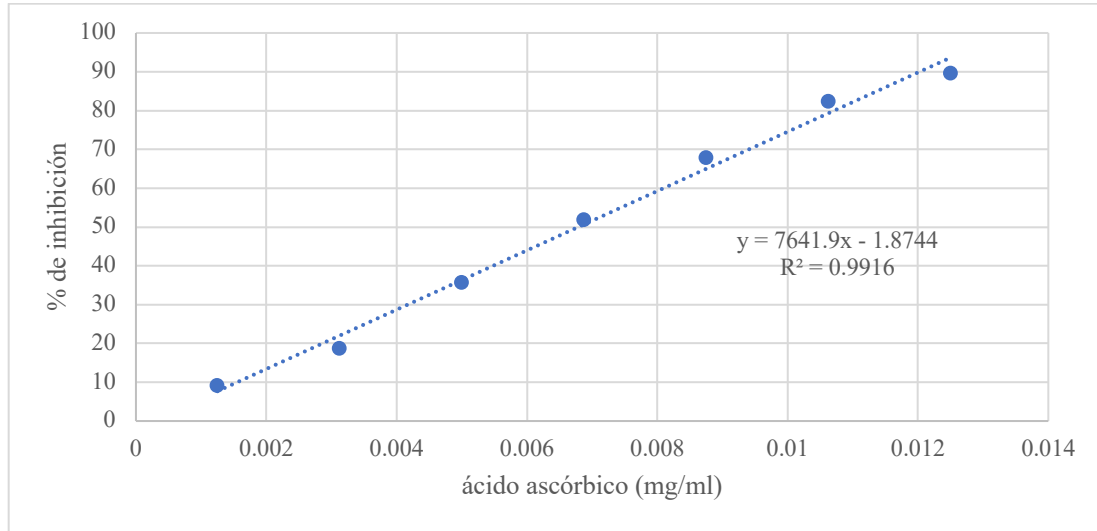
NOTAS

*Se realizó la curva de calibración para determinación de antioxidantes a temperatura ambiente de 26.0 °C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

Figura 15. Curva de calibración 2 para determinar antioxidantes en pulpa de café fresca



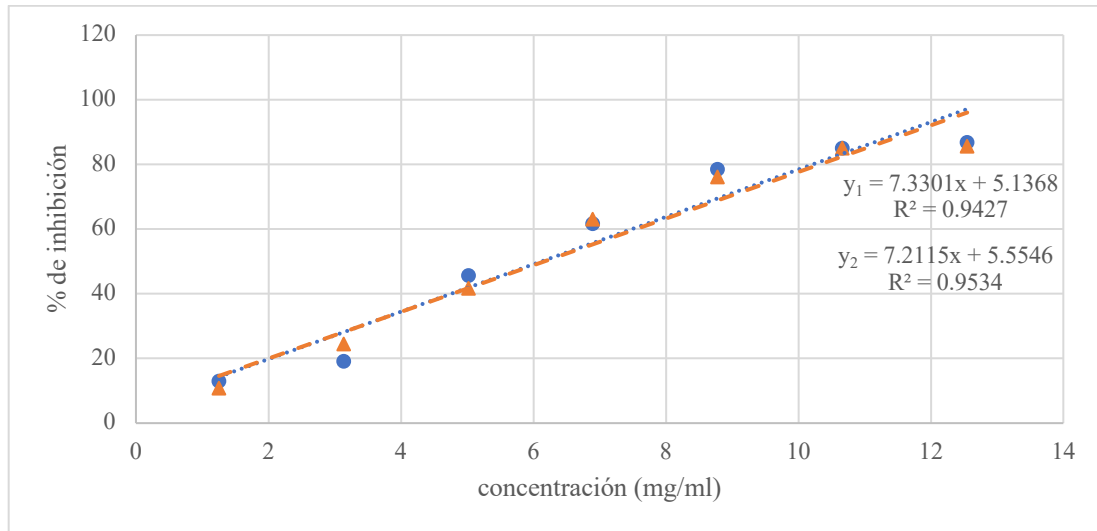
NOTAS

*Se realizó la curva de calibración para determinación de antioxidantes a temperatura ambiente de 26.0 °C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

Figura 16. Curva de antioxidantes en muestra 1 de pulpa de café fresca



NOTAS

*Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 1 de pulpa de café fresca a temperatura ambiente de 26.0 °C.

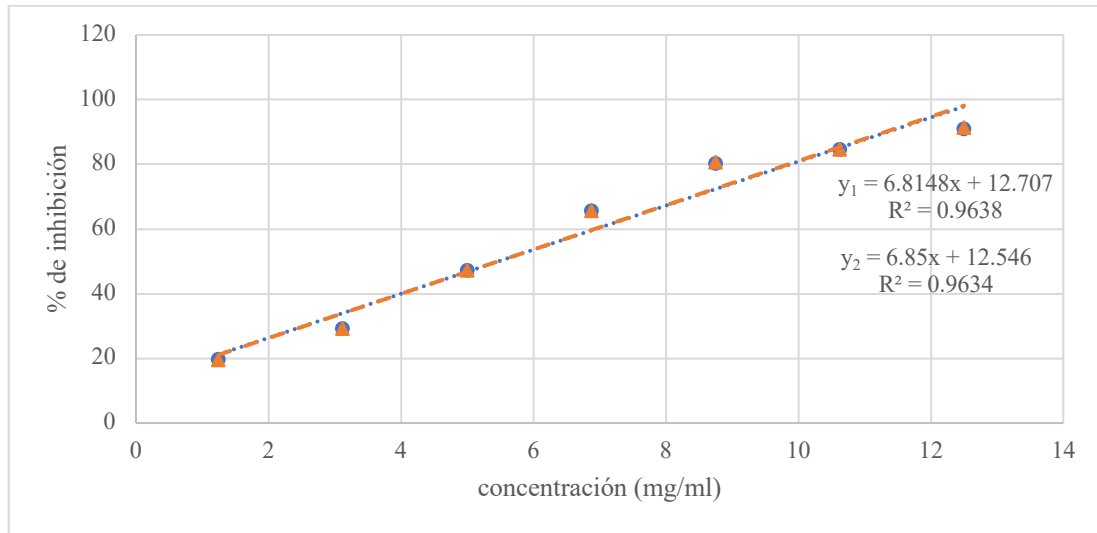
*Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.

*Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

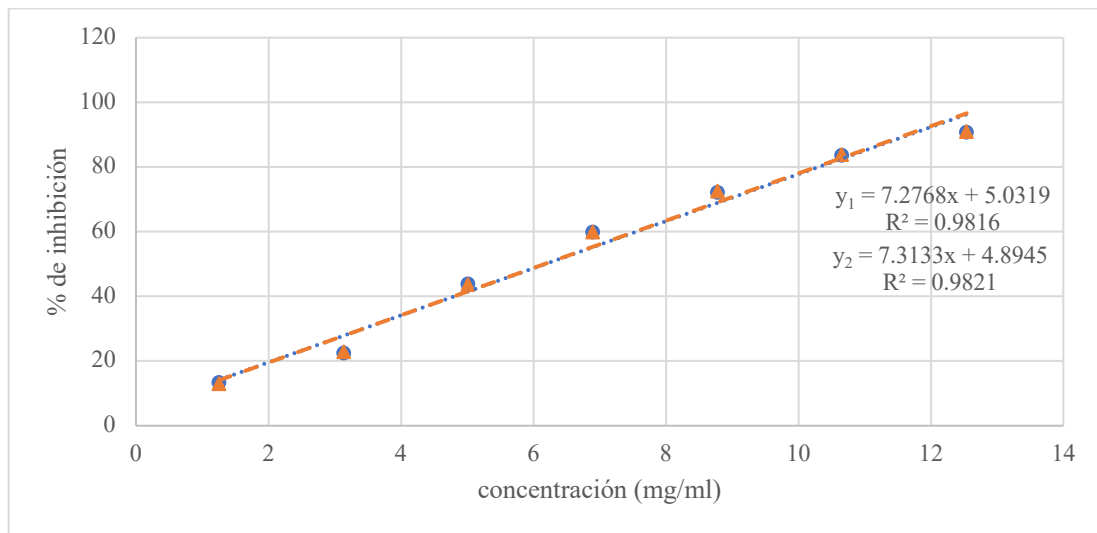
Figura 17. Curva de antioxidantes en muestra 2 de pulpa de café fresca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 2 de pulpa de café fresca a temperatura ambiente de 26.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

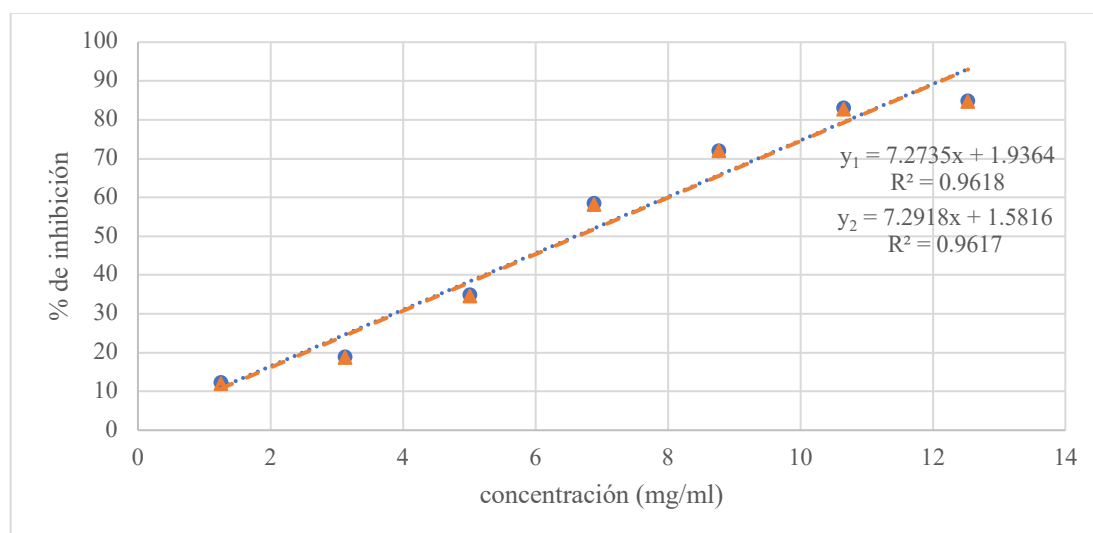
Figura 18. Curva de antioxidantes en muestra 3 de pulpa de café fresca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 2 de pulpa de café fresca a temperatura ambiente de 26.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

Figura 19. Curva de antioxidantes en muestra 4 de pulpa de café fresca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 2 de pulpa de café fresca a temperatura ambiente de 26.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

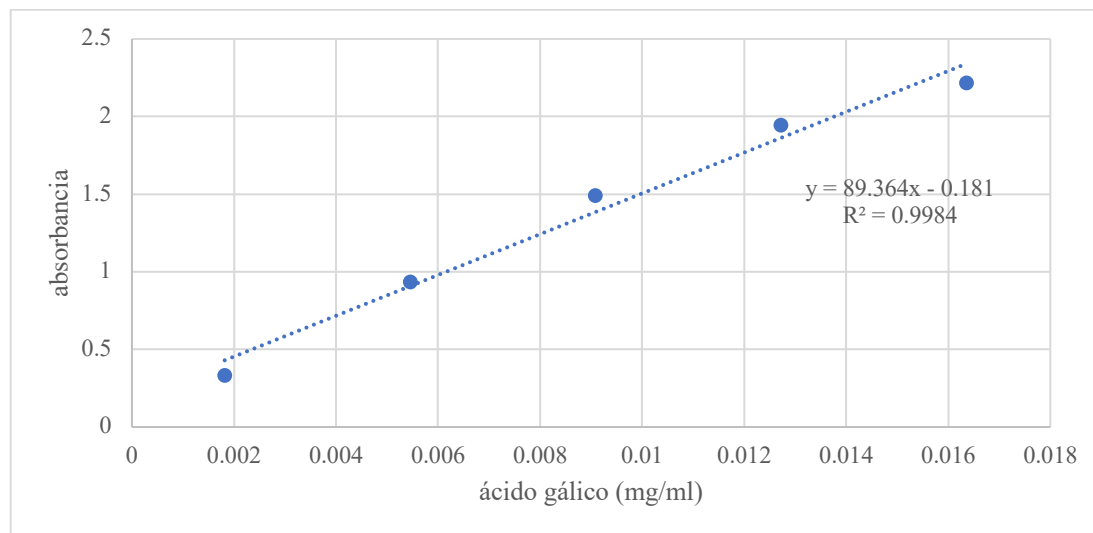
Tabla 21. Antioxidantes en pulpa de café fresca

Muestra	IC 50 (mg/ml)
1	6.1418
2	5.4700
3	6.1736
4	6.6241
Promedio	6.1024 ± 0.4756

NOTAS

- *Se realizó la prueba de determinación de antioxidantes por medio de lecturas en espectrofotómetro, a longitud de onda de 517 nm, a temperatura ambiente de 26.0 °C.

Figura 20. Curva de calibración para determinar polifenoles, en términos de ácido gálico, en pulpa de café fresca y seca



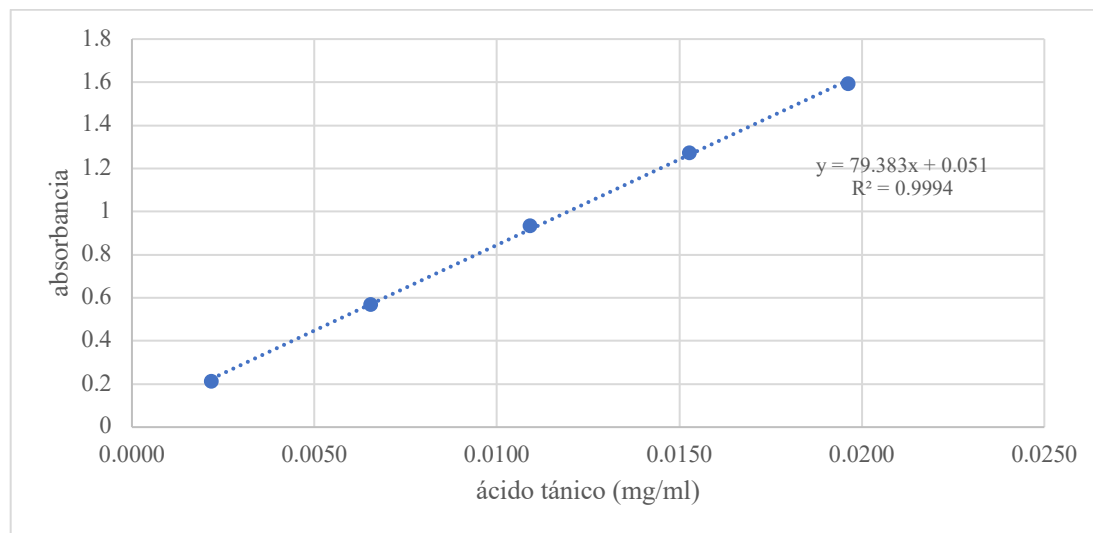
NOTAS

*Se realizó la curva de calibración para determinación de polifenoles a temperatura ambiente de 25.0 °C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

Figura 21. Curva de calibración para determinar polifenoles, en términos de ácido tánico, en pulpa de café fresca y seca



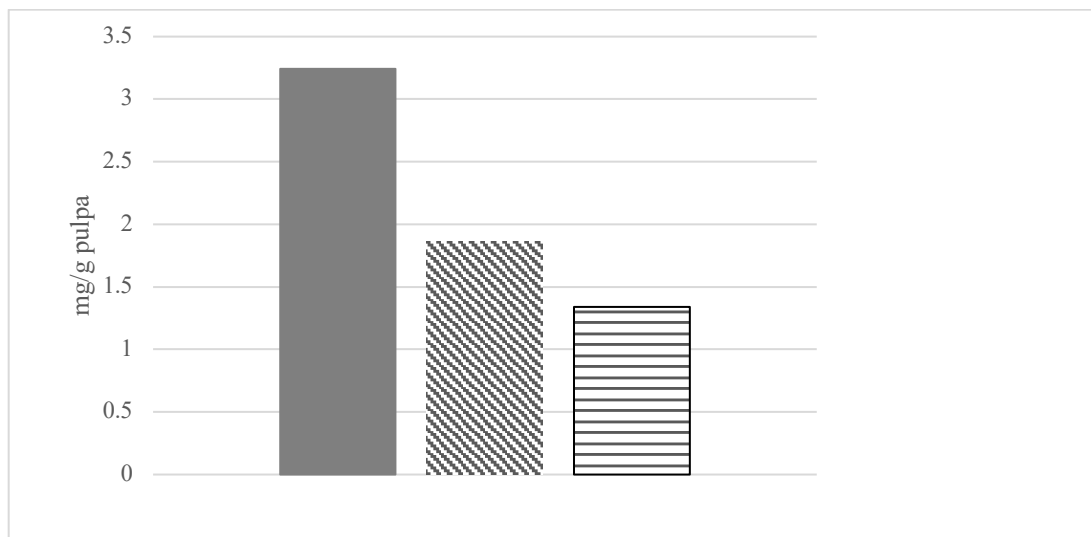
NOTAS

*Se realizó la curva de calibración para determinación de polifenoles a temperatura ambiente de 25.0 °C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fresca y seca fue de 85.23 ± 1.25 % y 15.78 ± 0.01 %, respectivamente.

Figura 22. Polifenoles totales, en términos de ácido gálico y tánico, en pulpa de café fresca



NOTAS

*Se realizó la curva para determinación de polifenoles, en términos de ácido gálico y tánico, de las muestras de pulpa de café fresca a temperatura ambiente de 25.0 ° C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

*La barra con líneas diagonales representa los polifenoles, en términos de ácido gálico.

*La barra con líneas horizontales representa los polifenoles, en términos de ácido tánico.

*La barra sólida representa los polifenoles totales.

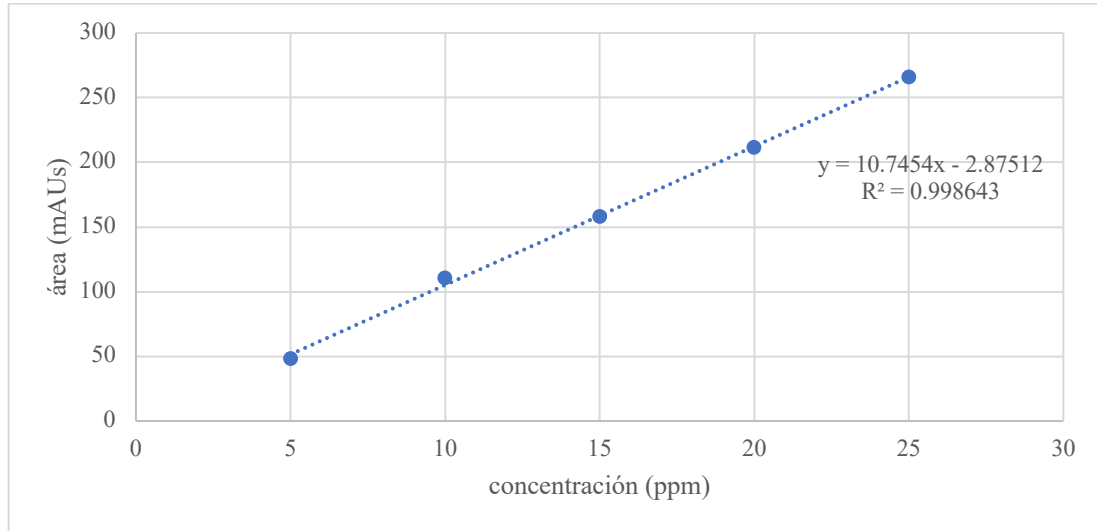
Tabla 22. Polifenoles en pulpa de café fresca

Muestra	Acido gálico (mg/g pulpa)	Acido tánico (mg/g pulpa)	Polifenoles (mg/g pulpa)
1	1.7964	1.2217	3.0181
2	1.7596	1.1803	2.9399
3	2.0126	1.4619	3.4745
4	2.0280	1.4793	3.5072
5	1.9202	1.3605	3.2808
6	1.9448	1.3882	3.3330
7	1.8907	1.3268	3.2175
8	1.8661	1.2992	3.1653
Promedio	1.9023 ± 0.0949	1.3397 ± 0.1058	3.2420 ± 0.2007

NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de polifenoles, en términos de ácido gálico y tánico, por medio de lecturas en espectrofotómetro a longitud de onda de 765 nm, a temperatura ambiente de 25.0 °C.

Figura 23. Curva de calibración para determinar cafeína en pulpa de café fresca y seca



NOTAS

*Se construyó la curva de calibración con lecturas del HPLC de soluciones de cafeína con 5, 10, 15, 20 y 25 ppm.

Tabla 23. Cafeína en pulpa de café fresca

Muestra	Cafeína (ppm)	Corrección por dilución (ppm)
1	26.8504	241.6536
2	31.5105	283.5945
3	26.8563	241.7067
4	27.7483	249.7347
Promedio	28.2414 ± 2.2199	254.1724 ± 19.9789

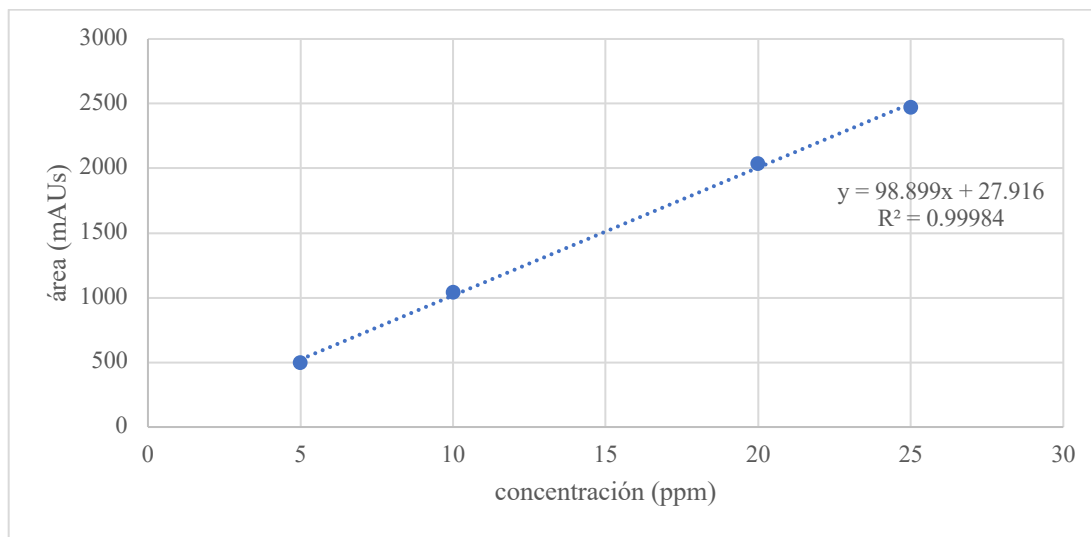
NOTAS

*Se realizó la determinación de la cafeína por medio de lecturas en HPLC, de las muestras en dilución de 1:9.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

*La corrección se realizó para la dilución de solución de cafeína al 10 % m/v en agua.

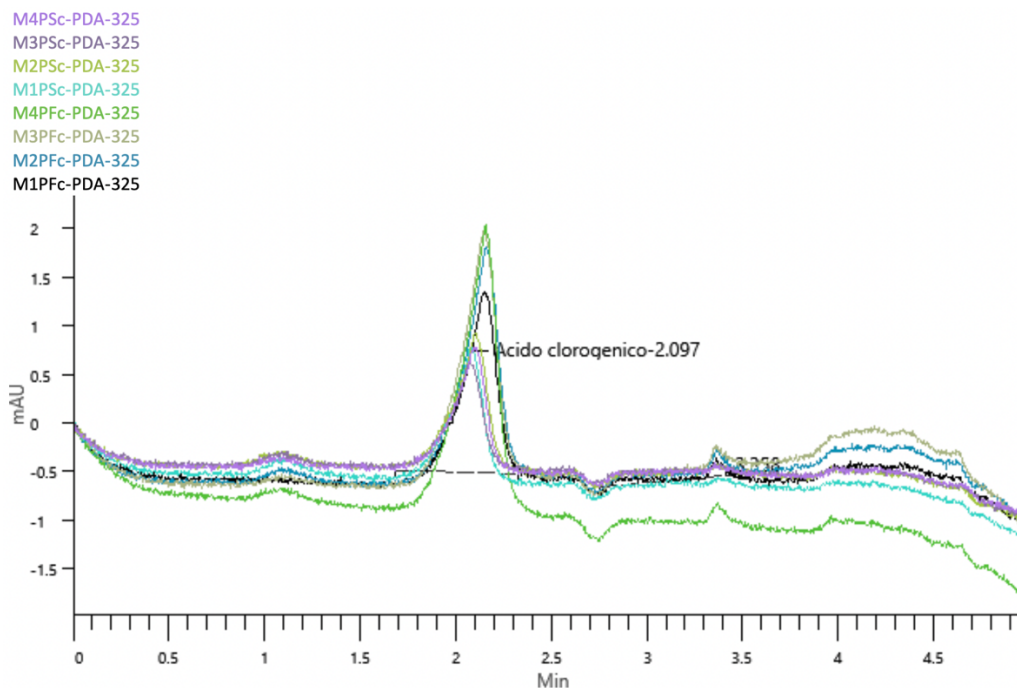
Figura 24. Curva de calibración para determinar ácido clorogénico en pulpa de café fresca y seca



NOTAS

*Se utilizó la curva de calibración presentada, con soluciones de ácido clorogénico con 5, 10, 20 y 25 ppm.

Figura 25. Cromatograma de ácido clorogénico en muestras de pulpa fresca y seca



NOTAS

*El cromatograma se obtuvo de lecturas de las muestras en el HPLC.

*La humedad promedio de la pulpa fresca fue de 85.23 ± 1.25 %.

*La humedad promedio de la pulpa seca fue de 15.78 ± 0.01 %.

Tabla 24. Ácido clorogénico en pulpa de café fresca

Muestra	Área (mAU)	Ácido clorogénico (ppm)	Corrección por dilución (ppm)
1	31.0353	0.5961	60.9984
2	37.4562	0.6610	67.6423
3	34.9532	0.6357	65.0524
4	46.3131	0.7506	76.8068
Promedio	37.4395 ± 6.4791	0.6608 ± 0.0655	67.6250 ± 6.7041

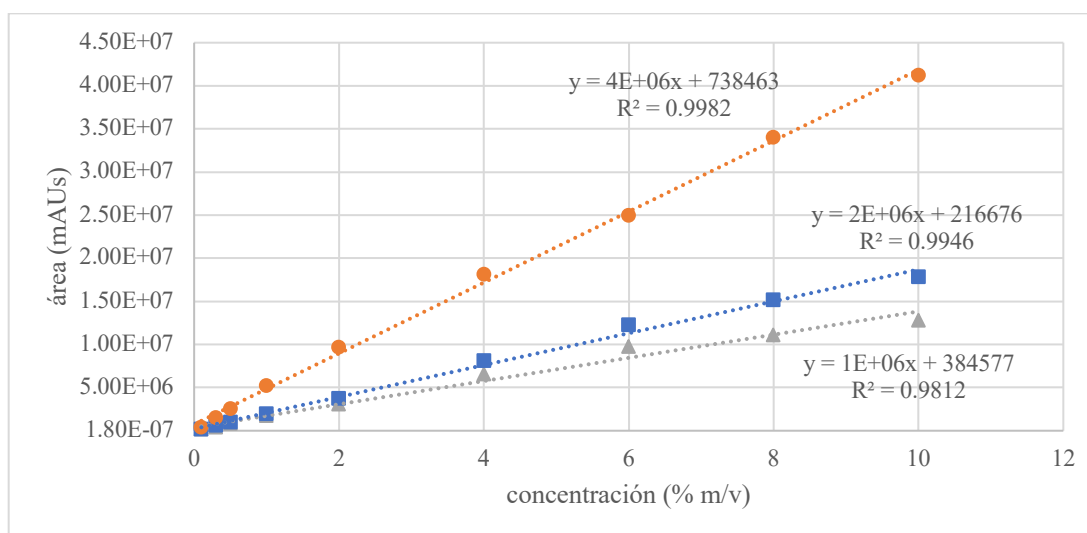
NOTAS

*Se realizó la determinación del ácido clorogénico por medio de lecturas en HPLC, de las muestras en dilución de 1:102 (1/3).

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.

*La corrección se realizó para la dilución de solución de cafeína al 10 % m/v en agua.

Figura 26. Curva de calibración para determinar azúcares en pulpa de café fresca y seca



NOTAS

*Los marcadores circulares representan las soluciones de fructosa a 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 % m/v, con su línea de tendencia respectiva.

*Los marcadores cuadrados representan las soluciones de glucosa a 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 % m/v, con su línea de tendencia respectiva.

*Los marcadores triangulares representan las soluciones de sacarosa a 0.1, 0.3, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 % m/v, con su línea de tendencia respectiva.

Tabla 25. Azúcares en pulpa de café fresca

Azúcar	Contenido (% m/v)
Sacarosa	0.169
Glucosa	0.266
Fructosa	0.259

NOTAS

*Se realizó la de determinación de los azúcares por medio de lecturas en HPLC.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 85.23 ± 1.25 %.**Tabla 26.** Características fisicoquímicas en pulpa de café fresca

No. laboratorio	Identificación de muestra
5735	Lote muestra única
Nitrógeno (%) ³	1.86
Fósforo (%) ³	0.29
Potasio (%) ³	3.54
Calcio (%) ³	0.69
Magnesio (%) ³	0.26
Azufre (%) ³	0.16
Cobre (ppm) ³	11.45
Hierro (ppm) ³	686.30
Manganeso (ppm) ³	34.75
Zinc (ppm) ³	13.80
Ceniza (%) ³	76.00
Materia orgánica (%) ³	24.00
Carbono orgánico (%) ³	13.33
pH ³	4.44
Humedad (%) ³	86.30

NOTAS

*Los análisis de características fisicoquímicas fueron realizados por Analab, laboratorio de análisis de muestras de Anacafé

Tabla 27. Actividad de agua de pulpa de café fresca

Muestra	a_w
1	0.962
2	0.961
3	0.960
4	0.967

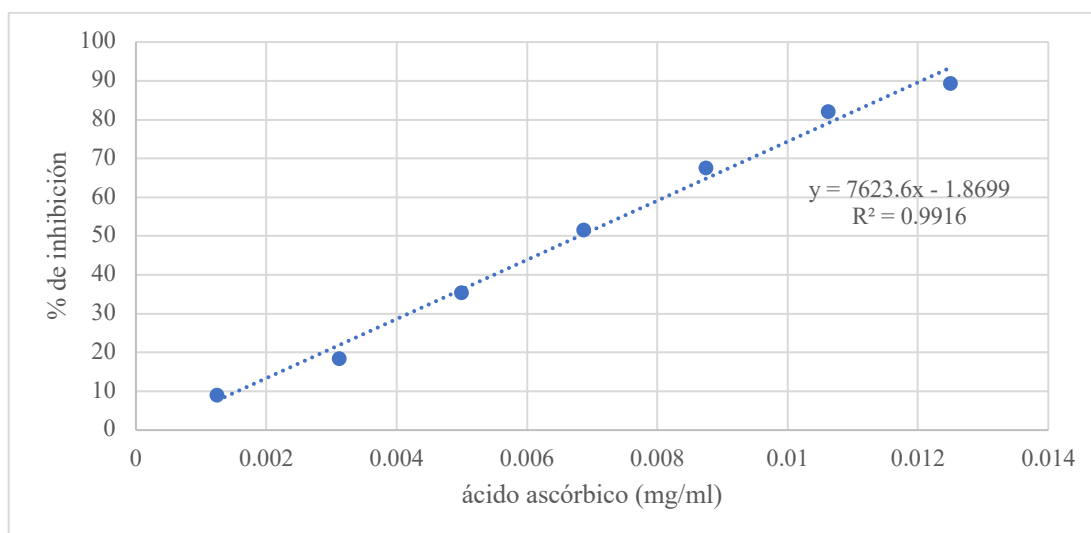
NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de actividad de agua a temperatura promedio de 24.3 °C.

*La humedad promedio de la pulpa analizada fue 85.23 ± 1.25 %.

2. Pulpa seca

Figura 27. Curva de calibración para determinar antioxidantes en pulpa de café seca



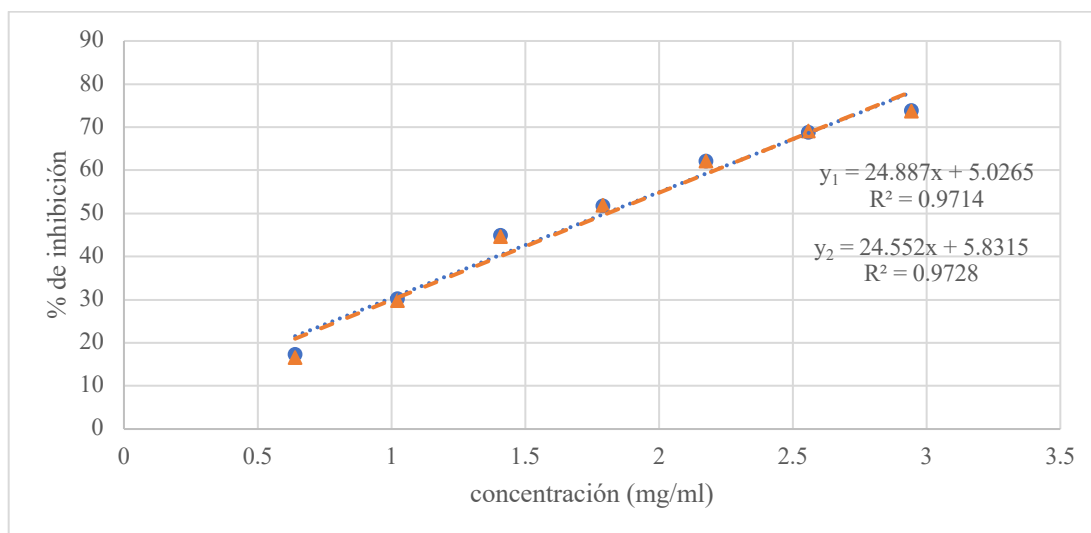
NOTAS

*Se realizó la curva de calibración para determinación de antioxidantes a temperatura ambiente de 24.0 °C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

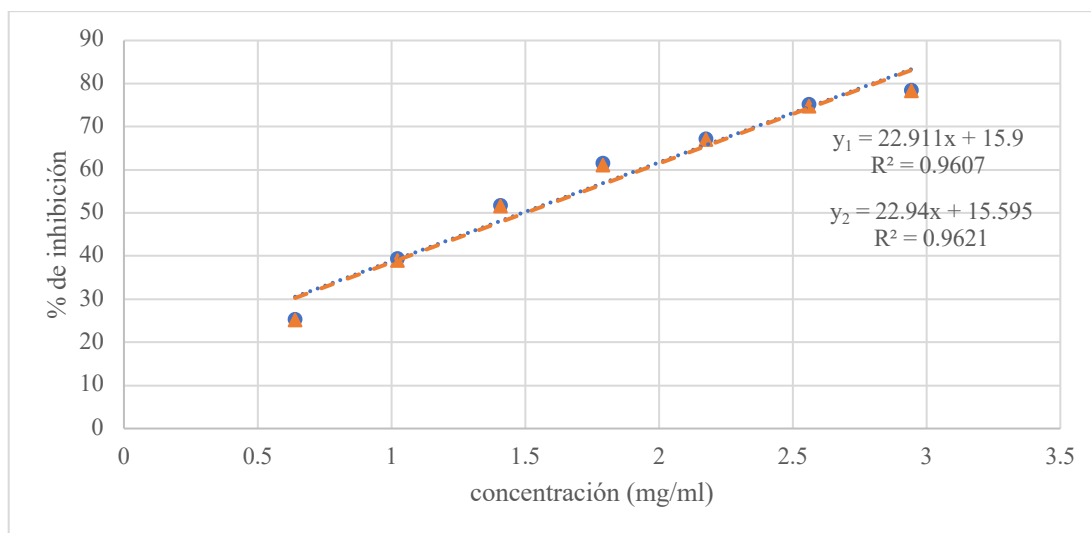
Figura 28. Curva de antioxidantes en muestra 1 de pulpa de café seca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 1 de pulpa de café seca a temperatura ambiente de 24.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

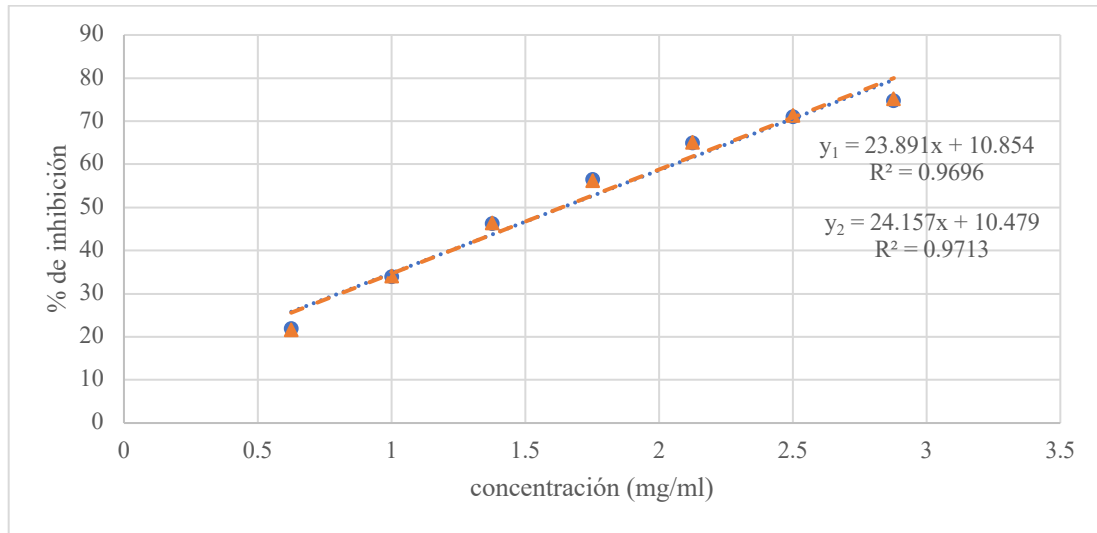
Figura 29. Curva de antioxidantes en muestra 2 de pulpa de café seca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 2 de pulpa de café seca a temperatura ambiente de 24.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

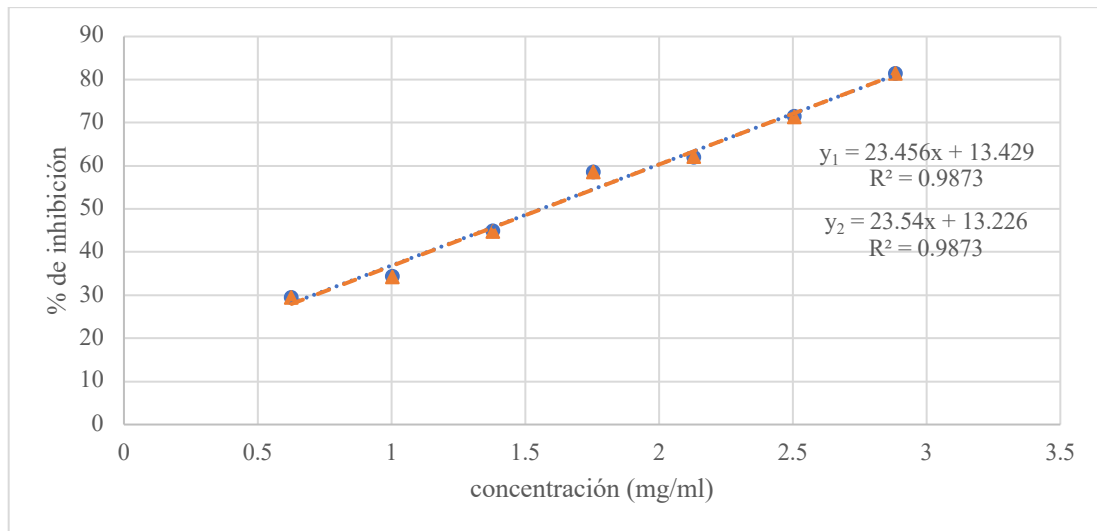
Figura 30. Curva de antioxidantes en muestra 3 de pulpa de café seca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 3 de pulpa de café seca a temperatura ambiente de 24.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

Figura 31. Curva de antioxidantes en muestra 4 de pulpa de café seca



NOTAS

- *Se realizó la curva para determinación de antioxidantes de la muestra 4 de pulpa de café seca a temperatura ambiente de 24.0 °C.
- *Los marcadores circulares y triangulares representan las soluciones de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *Las líneas punteadas y discontinuas representan las tendencias de la submuestra 1 y 2, respectivamente.
- *El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.
- *La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

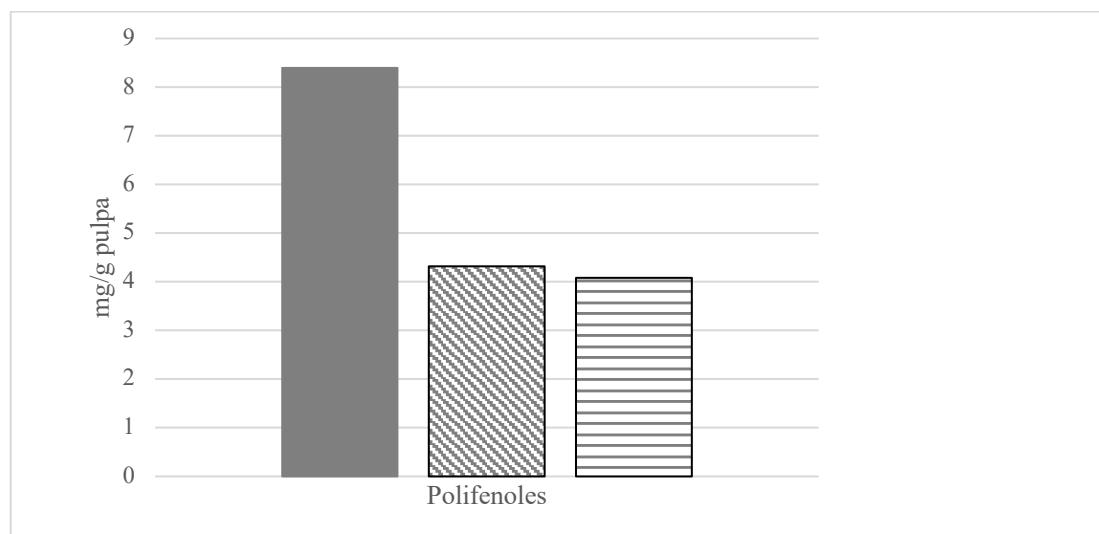
Tabla 28. Antioxidantes en pulpa de café seca

Muestra	IC 50 (mg /ml)
1	1.8030
2	1.4941
3	1.6373
4	1.5670
Promedio	1.6238 ± 0.1331

NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de antioxidantes por medio de lecturas en espectrofotómetro, a longitud de onda de 517 nm, a temperatura ambiente de 24.0 °C.

Figura 32. Curva de polifenoles, en términos de ácido gálico y tánico, en pulpa de café seca



NOTAS

*Se realizó la curva para determinación de polifenoles, en términos de ácido gálico y tánico, de las muestras de pulpa de café seca a temperatura ambiente de 24.0 ° C.

*El tiempo de reacción de las muestras fue de 30 minutos, en ausencia de luz.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

*La barra con líneas diagonales representa los polifenoles, en términos de ácido gálico.

*La barra con líneas horizontales representa los polifenoles, en términos de ácido tánico.

*La barra sólida representa los polifenoles totales.

Tabla 29. Polifenoles en pulpa de café seca

Muestra	Acido gálico (mg/g pulpa)	Acido tánico (mg/g pulpa)	Polifenoles (mg/g pulpa)
1	3.9734	3.6880	7.6614
2	4.2349	3.9824	8.2172
3	4.3720	4.1370	8.5090
4	4.2909	4.0456	8.3365
5	4.2090	3.9353	8.1443
6	4.2490	3.9803	8.2293
7	4.7254	4.5182	9.2436
8	4.5475	4.3178	8.8653
Promedio	4.3253 ± 0.2281	4.0756 ± 0.2527	8.4008 ± 0.4807

NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de polifenoles, en términos de ácido gálico y tánico, por medio de lecturas en espectrofotómetro a longitud de onda de 765 nm, a temperatura ambiente de 24.0 °C.

Tabla 30. Cafeína en pulpa de café seca

Muestra	Cafeína (ppm)	Corrección por dilución (ppm)
1	24.0099	1480.6105
2	27.1150	1672.0917
3	21.8840	1349.5133
4	24.7938	1528.9510
Promedio	24.4507 ± 2.1601	1507.7916 ± 133.2079

NOTAS

*Se realizó la de determinación de la cafeína por medio de lecturas en HPLC, de las muestras en dilución de 1:61(2/3).

*La humedad promedio de la pulpa fue de 15.28 ± 0.01 %.

*La corrección se realizó para la dilución de solución de cafeína al 10 % m/v en agua.

Tabla 31. Ácido clorogénico en pulpa de café seca

Muestra	Área (mAUs)	Ácido clorogénico (ppm)	Corrección por dilución (ppm)
1	21.7277	0.5020	51.3676
2	18.0427	0.4647	47.5546
3	13.3688	0.4174	42.7184
4	16.0945	0.4450	45.5388
Promedio	17.3084 ± 3.5149	0.4573 ± 0.0355	46.7949 ± 3.6369

NOTAS

*Se realizó la de determinación de la cafeína por medio de lecturas en HPLC, de las muestras en dilución de 1:102 (1/3).

*La humedad promedio de la pulpa fue de 15.28 ± 0.01 %.

*La corrección se realizó para la dilución de solución de cafeína al 10 % m/v en agua.

Tabla 32. Azúcares en pulpa de café seca

Muestra	Azúcares (% m/v)
Sacarosa	0.576
Glucosa	1.082
Fructosa	0.568

NOTAS

*Se realizó la de determinación de los azúcares por medio de lecturas en HPLC.

*La humedad promedio de la pulpa fue de 15.78 ± 0.01 %.

Tabla 33. Características fisicoquímicas en pulpa de café seca

No. laboratorio	Identificación de muestra
14499	Lote muestra única
Nitrógeno (%) ³	1.81
Fósforo (%) ³	0.26
Potasio (%) ³	3.47
Calcio (%) ³	0.79
Magnesio (%) ³	0.19
Azufre (%) ³	0.13
Cobre (ppm) ³	10.73
Hierro (ppm) ³	103.90
Manganeso (ppm) ³	16.60
Zinc (ppm) ³	8.43
Ceniza (%) ³	7.00
Materia orgánica (%) ³	93.00
Carbono orgánico (%) ³	51.67
pH ³	3.90
Humedad (%) ³	15.99

NOTAS

*Los análisis de características fisicoquímicas fueron realizados por Analab, laboratorio de análisis de muestras de Anacafé

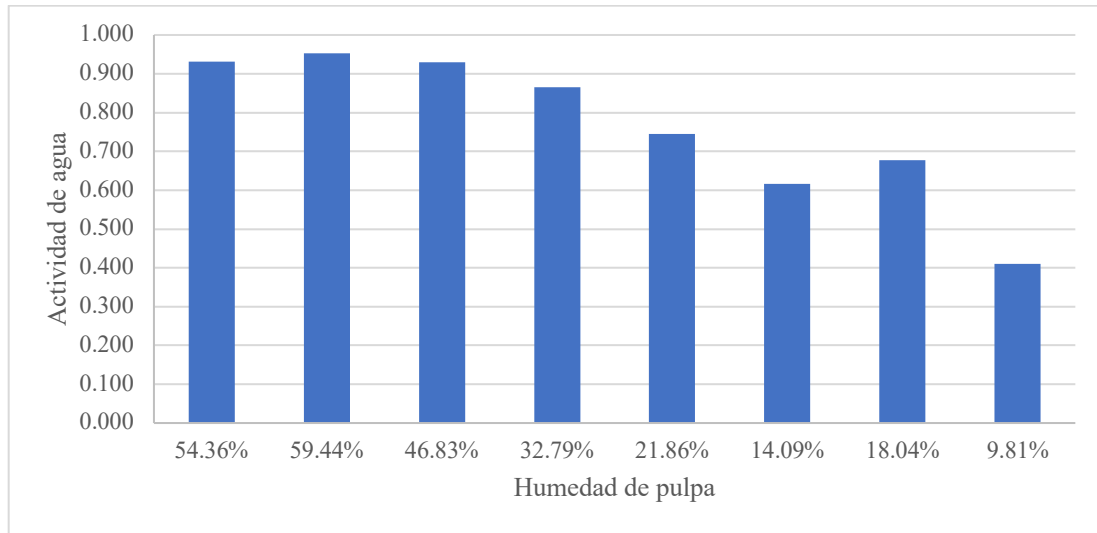
Tabla 34. Actividad de agua, según el contenido de humedad en pulpa de café seca

Muestra	Humedad (%)	a_w
1	54.36	0.931
2	59.44	0.952
3	46.83	0.929
4	32.79	0.866
5	21.86	0.745
6	14.09	0.616
7	18.04	0.677
8	9.81	0.411

NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de actividad de agua a temperatura promedio de 25.09 °C.

Figura 33. Comportamiento de actividad de agua, según el contenido de humedad en pulpa de café seca

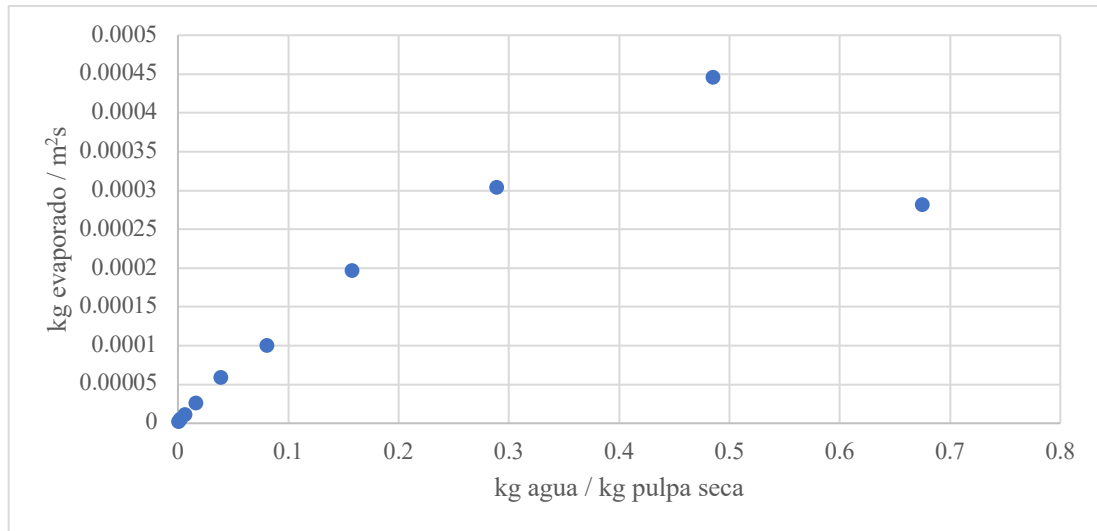


NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de actividad de agua a temperatura promedio de 25.09 °C.

B. Curva de secado

Figura 34. Curva de secado de muestra 1.1 de pulpa de café fresca con aire a 77.0 ± 1.9 °C



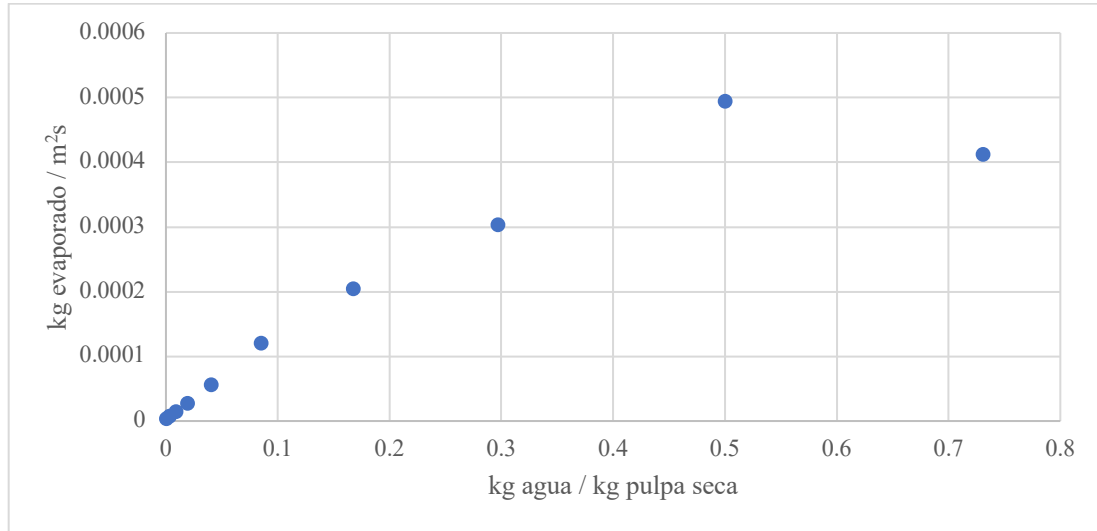
NOTAS

*Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de 22.3 °C y presión ambiental de 84.6 kPa.

*La humedad inicial de la pulpa fue 85.23 ± 1.25 %.

*Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 15 minutos.

Figura 35. Curva de secado de muestra 1.2 de pulpa de café con aire a $77.0 \pm 1.9 \text{ }^\circ\text{C}$



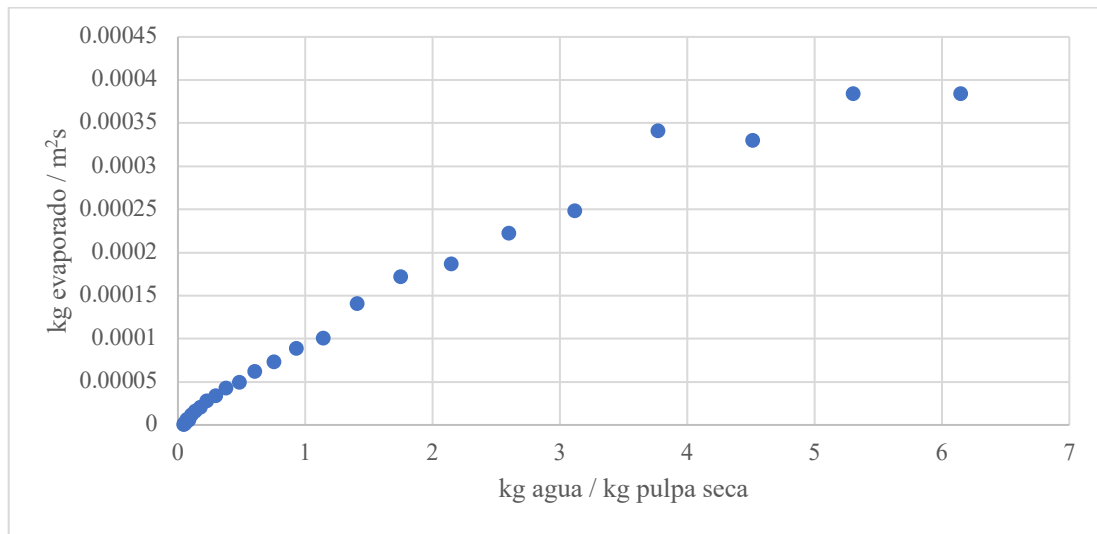
NOTAS

*Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $22.3 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa .

*La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.

*Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 15 minutos.

Figura 36. Curva de secado de muestra 2 de pulpa de café con aire a $77.0 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$



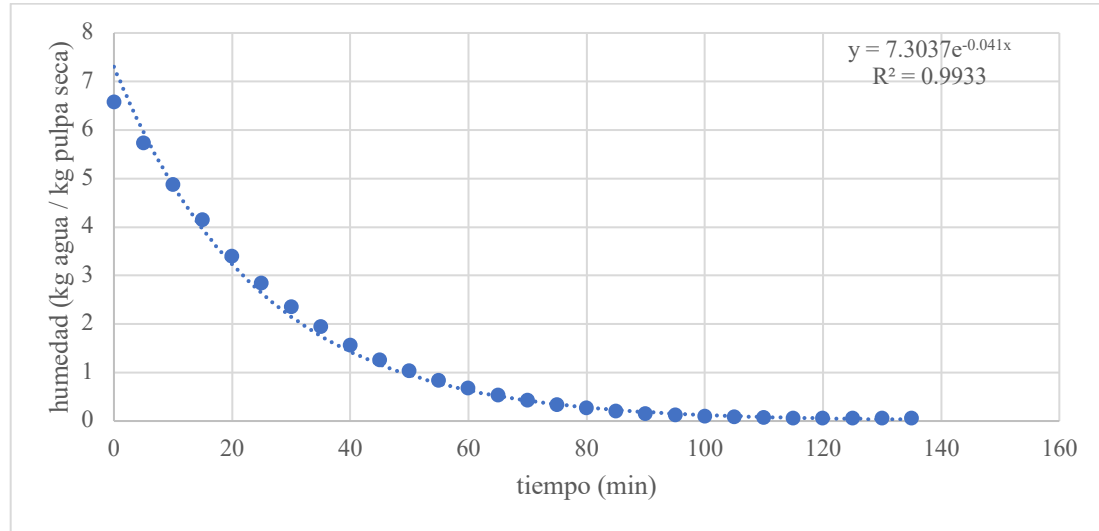
NOTAS

*Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $23.6 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa .

*La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.

*Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

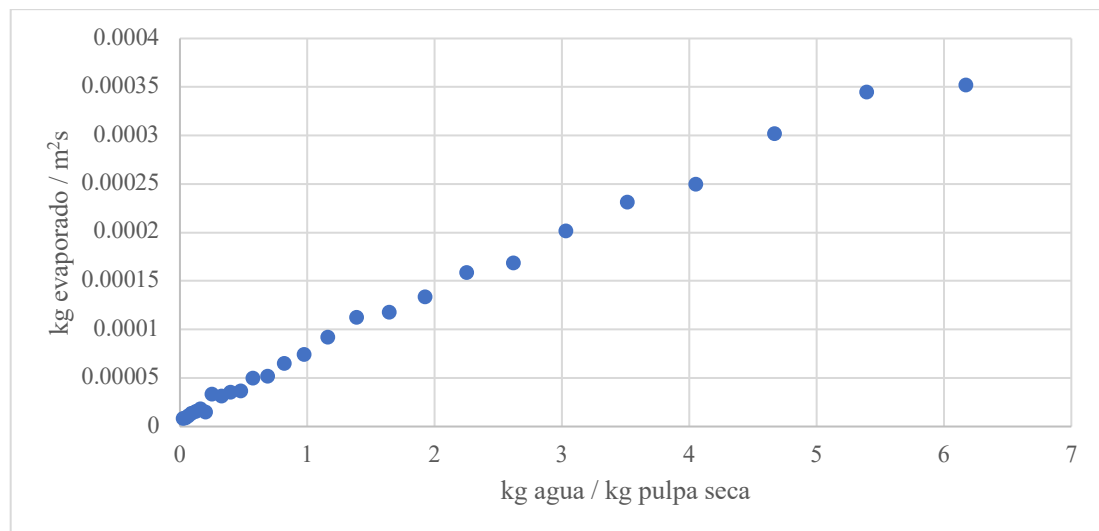
Figura 37. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 2 de pulpa de café en secado a $77.0 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba con aire a temperatura promedio de $77.0 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $23.6 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.
- *Para la obtención de pulpa con 15 % de humedad, $0.1765 \text{ kg de agua / kg de pulpa seca}$, se requirieron $\ln(0.1765/7.3037)/(-0.041) = 90.80$ minutos de secado.

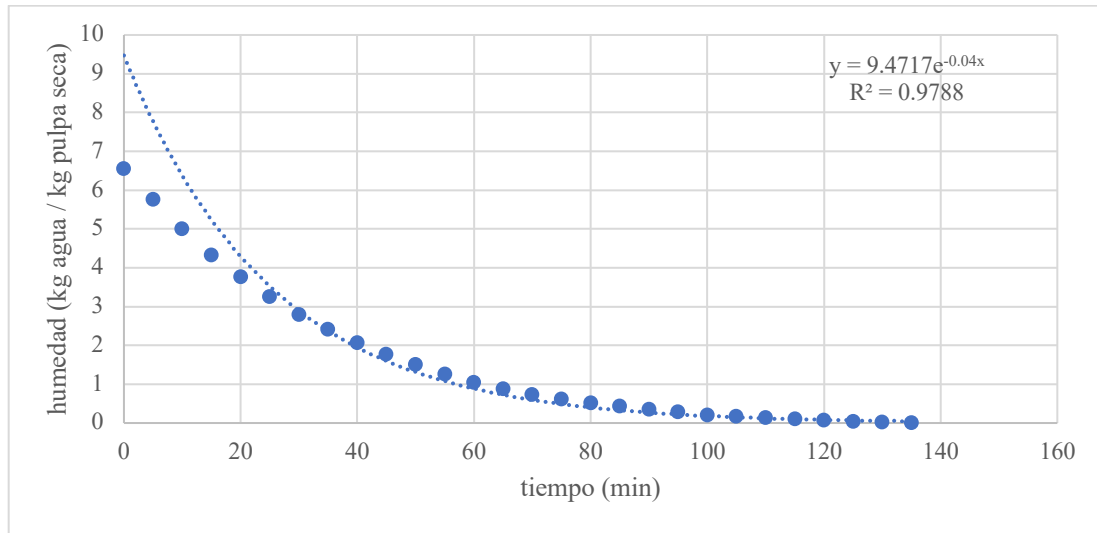
Figura 38. Curva de secado de muestra 3 de pulpa de café con aire a $77.2 \pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

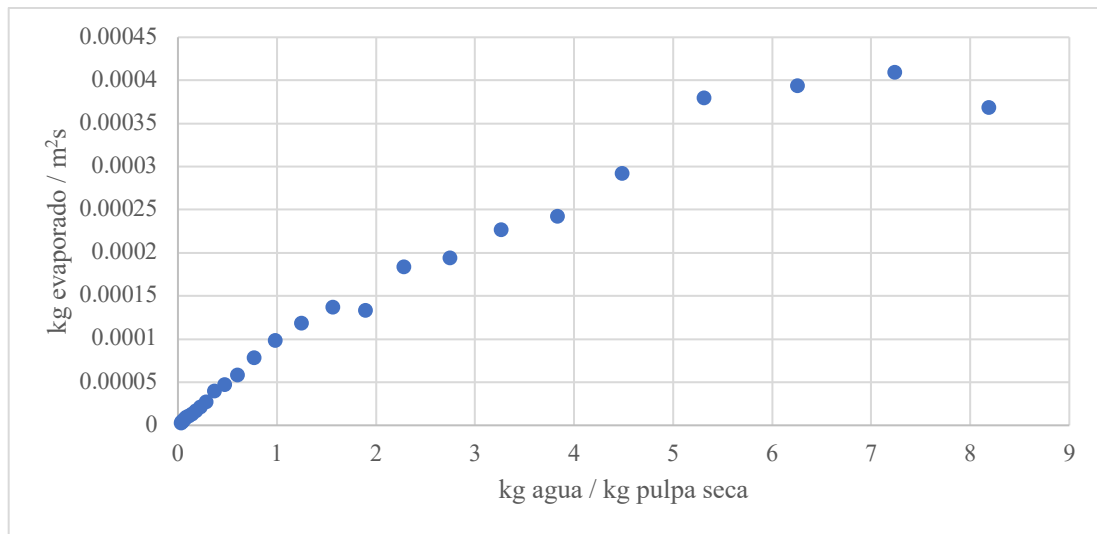
Figura 39. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 3 de pulpa de café en secado a $77.2 \pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba con aire a temperatura promedio de $77.2 \pm 1.3 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $24.0 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa .
- *La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.
- *Para la obtención de pulpa con 15% de humedad, $0.1765 \text{ kg de agua / kg de pulpa seca}$, se requirieron $\ln(0.1765/9.4717)/(-0.04) = 99.57$ minutos de secado.

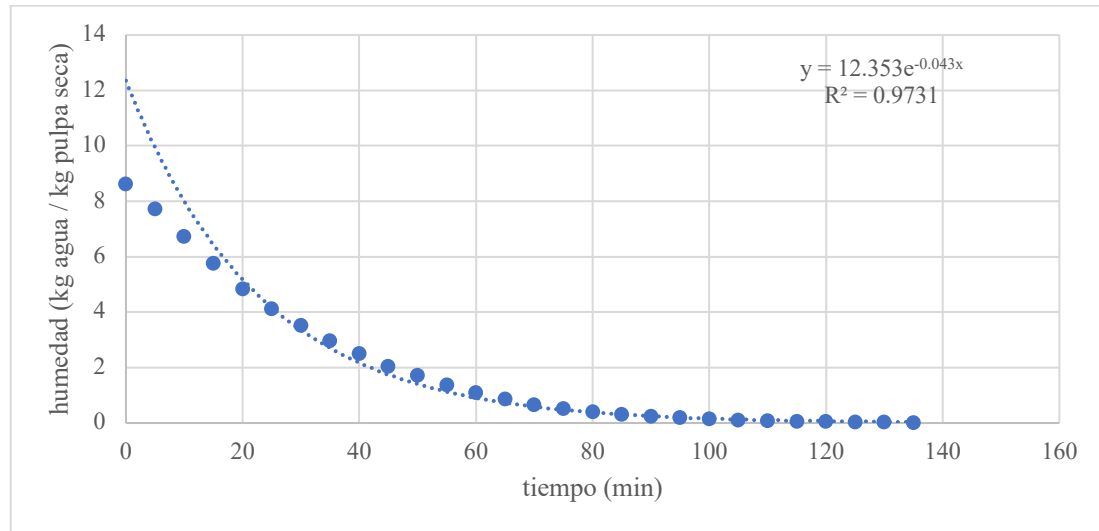
Figura 40. Curva de secado de muestra 4 de pulpa de café con aire a $73.1 \pm 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa .
- *La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

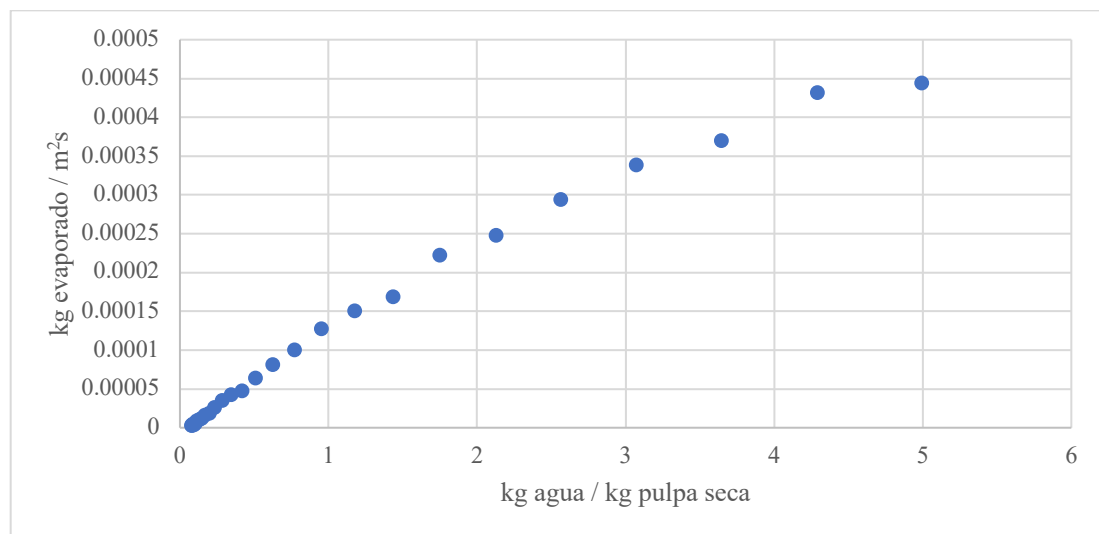
Figura 41. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 4 de pulpa de café en secado a $73.1 \pm 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba con aire a temperatura promedio de $73.1 \pm 1.1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $23.8 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.
- *Para obtener pulpa con 0.1765 kg de agua / kg de pulpa seca, se requirieron $\ln(0.1765/12.353)/(-0.043) = 98.80$ minutos de secado.

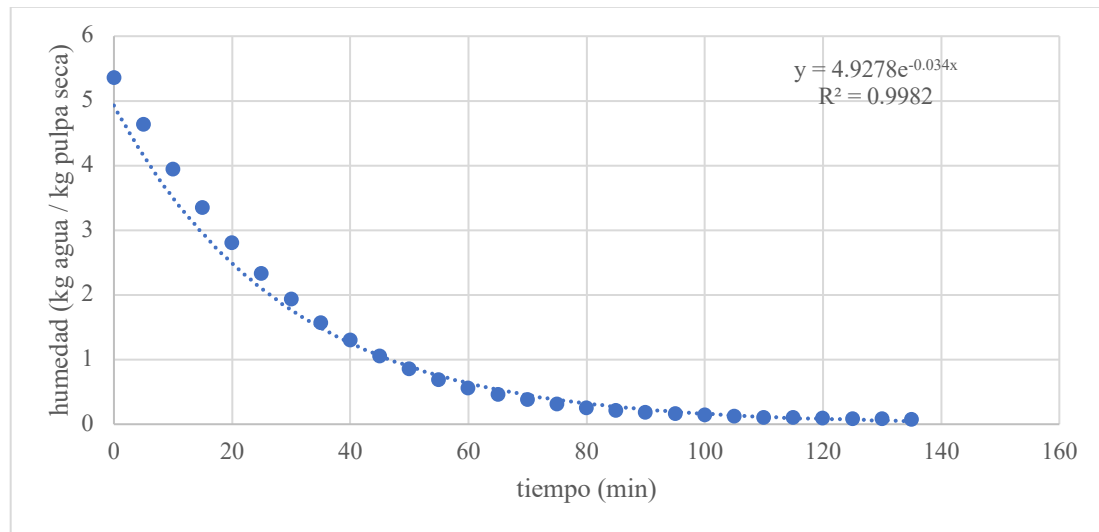
Figura 42. Curva de secado de muestra 5 de pulpa de café con aire a $73.6 \pm 1.4 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

Figura 43. Comportamiento de humedad absoluta de muestra 5 de pulpa de café en secado a $73.6 \pm 1.4 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

*Se realizó la prueba con aire a temperatura promedio de $73.6 \pm 1.4 \text{ }^\circ\text{C}$.

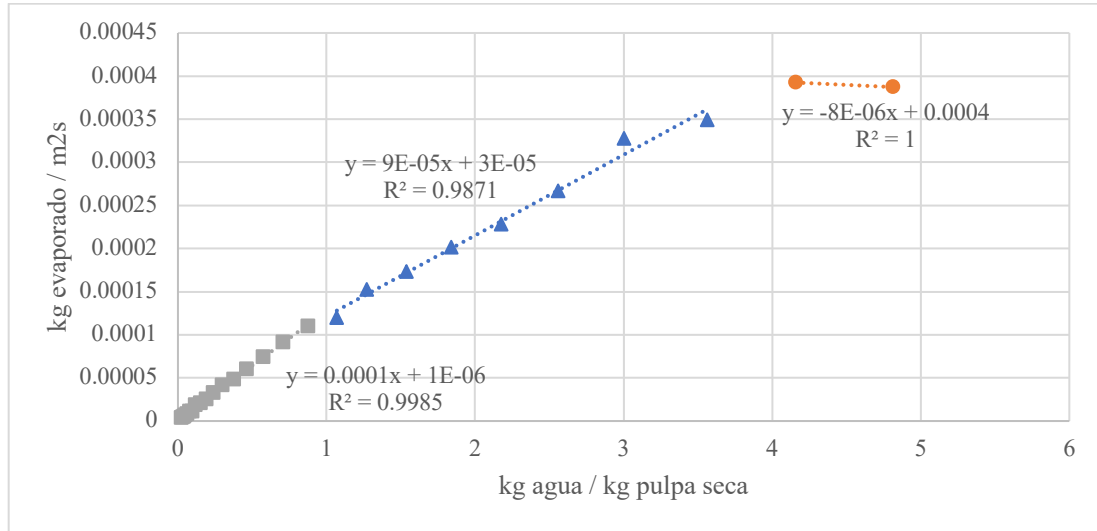
*Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa .

*La humedad inicial de la pulpa fue $85.23 \pm 1.25 \%$.

*Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

*Para obtener pulpa con 0.1765 kg de agua / kg de pulpa seca, se requirieron $\ln(0.1765/4.9278)/(-0.034) = 97.93$ minutos de secado.

Figura 44. Regresión de la curva de secado promedio del proceso con aire a 75.2 ± 2.2 °C



NOTAS

- *Se construyó la curva promedio con base en las pruebas anteriores, con aire a temperatura promedio de 75.2 ± 2.2 °C.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente promedio de 23.8 °C y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue 85.23 ± 1.25 %.
- *Los marcadores circulares, triangulares y cuadrados representan las secciones de evaporación constante de la humedad hasta el punto crítico, decreciente hasta terminar la superficie no saturada, y decreciente hasta la humedad de equilibrio, respectivamente.

Tabla 35. Resumen de curva de secado de pulpa con aire a 75.2 ± 2.2 °C

N_c (kg de evaporado/m ² s)	X_c (kg H ₂ O/kg de pulpa seca)	k_y (kg/m ² s)	Humedad superficial (kg H ₂ O/kg pulpa seca)	Humedad no ligada (kg H ₂ O/kg pulpa seca)	Humedad ligada (kg H ₂ O/kg pulpa seca)
0.00037	3.62963	0.00526413	2.141	3.606	0.022

NOTAS

- *La humedad inicial de la pulpa fue 85.23 ± 1.25 %.
- *La humedad final de la pulpa fue 4.41 ± 0.01 %.
- *Se determinó el punto crítico y humedad en la pulpa según la curva promedio de secado con aire a temperatura de 75.2 ± 2.2 °C.
- *Se determinó el coeficiente de transferencia de masa con base en la humedad absoluta inicial y final del gas de secado (0.06741 y 0.13788 kg H₂O/kg aire seco, respectivamente) en las pruebas de secado con aire a temperatura de 75.2 ± 2.2 °C.
- *Se llevó a cabo el cálculo de la humedad libre con X_1 de 5.770 kg agua / kg pulpa seca y X_c 3.630 de kg agua / kg pulpa seca.
- *Se llevó a cabo el cálculo de la humedad no ligada con X_c 3.630 de kg agua / kg pulpa seca y X_2 de 0.023 de kg agua / kg pulpa seca.
- *Se llevó a cabo el cálculo de la humedad ligada con X_2 de 0.023 de kg agua / kg pulpa seca y el valor promedio de humedad de la muestra final de las pruebas de secado de 4.41 ± 0.01 %.

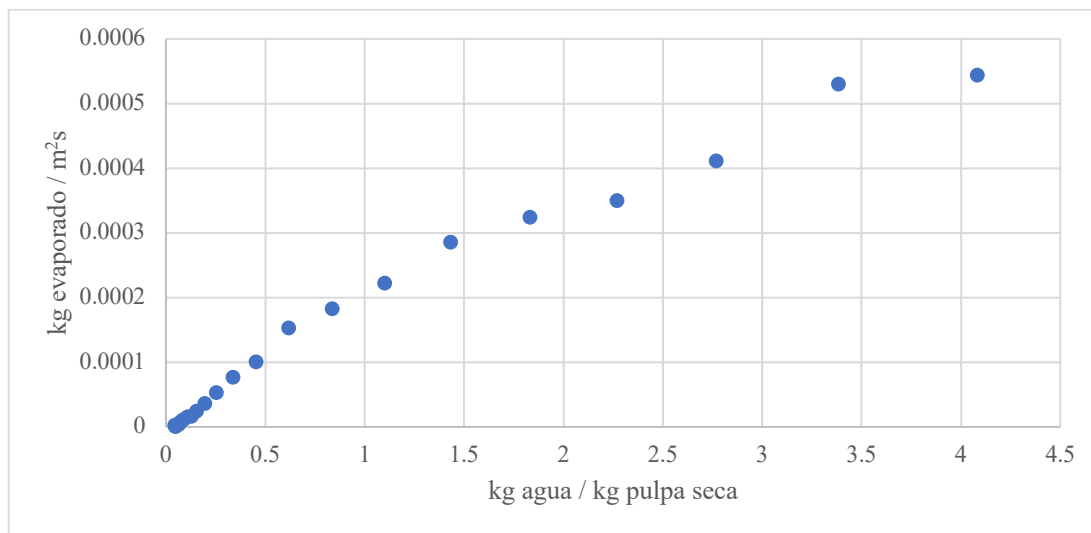
Tabla 36. Tiempo promedio de secado a 75.2 ± 2.2 °C para obtención de pulpa a humedades específicas, a partir del secado de pulpa fresca

Humedad (%)	Tiempo de secado curva 1 (min)	Tiempo de secado curva 2 (min)	Tiempo de secado curva 3 (min)	Tiempo de secado curva 4 (min)	Tiempo de secado promedio (min)
25	75.29	83.67	84.01	79.22	80.55 ± 4.13
20	82.31	90.87	90.70	87.68	87.89 ± 4.00
15	90.80	99.57	98.80	97.93	96.78 ± 4.04
10	102.09	111.14	109.56	111.53	108.58 ± 4.41

NOTAS

*Se realizó el cálculo de los tiempos empleando la ecuación de regresión del comportamiento de la humedad absoluta de la muestra de cada una de las curvas de secado.

Figura 45. Curva de secado de muestra de pulpa de café congelada con aire a 75.3 ± 2.2 °C



NOTAS

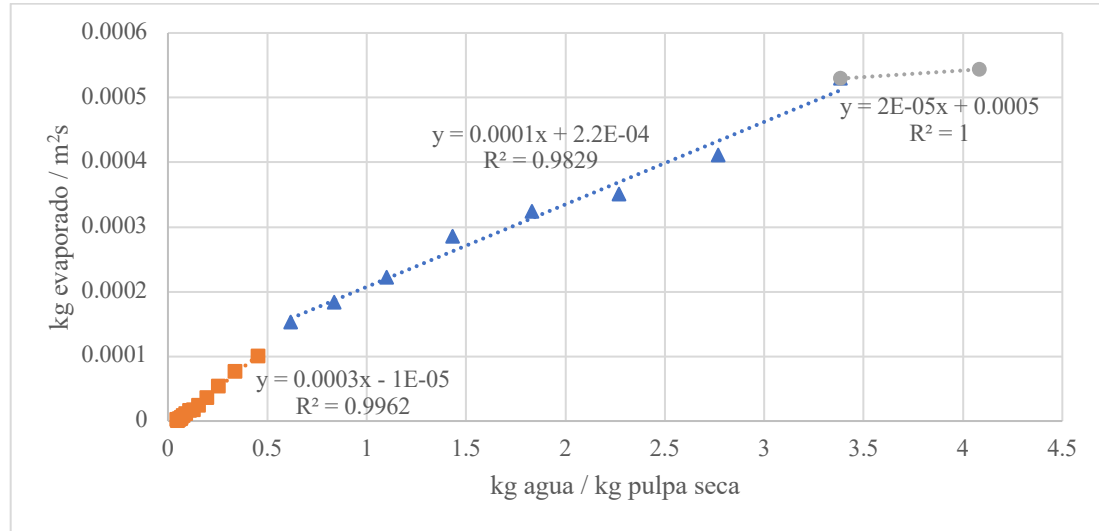
*La pulpa dejar descongelar por 24 horas a temperatura de 23.9 ± 1.3 °C.

*Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de 26.2 °C y presión ambiental de 84.6 kPa.

*La humedad inicial de la pulpa fue 78.76 ± 0.01 %.

*Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

Figura 46. Regresión de la curva de secado de pulpa congelada con aire a $75.3 \pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se construyó la curva promedio con base en la prueba con aire a temperatura promedio de $75.3 \pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente promedio de $26.2 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa .
- *La humedad inicial de la pulpa fue $78.76 \pm 0.01 \%$.
- *Los marcadores circulares, triangulares y cuadrados representan las secciones de evaporación constante de la humedad hasta el punto crítico, decreciente hasta terminar la superficie no saturada, y decreciente hasta la humedad de equilibrio, respectivamente.

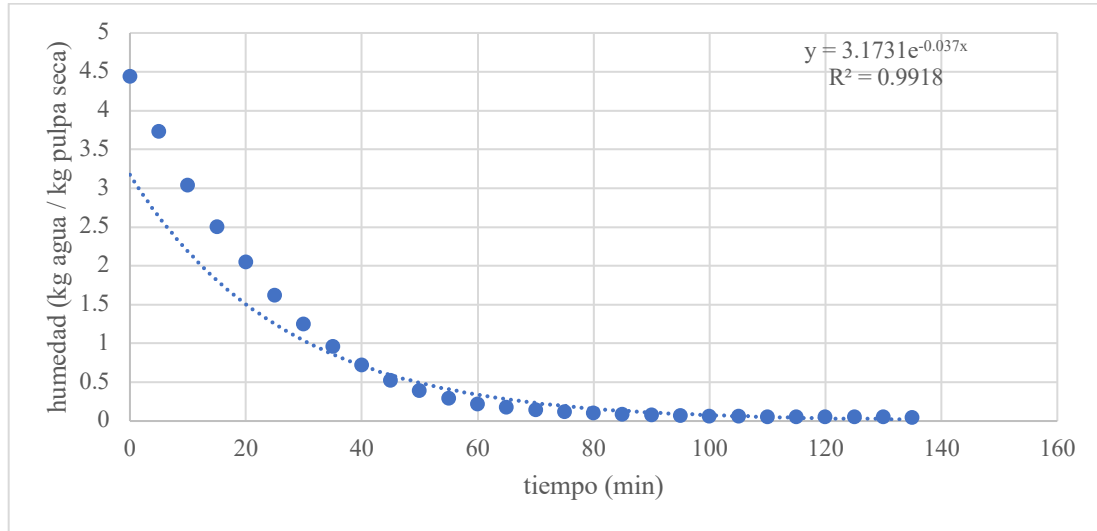
Tabla 37. Resumen de curva de secado de pulpa congelada con aire a $75.3 \pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$

N_c (kg de evaporado/ m^2s)	X_c (kg H_2O /kg de pulpa seca)	k_y (kg/ m^2s)	Humedad superficial (kg H_2O /kg pulpa seca)	Humedad no ligada (kg H_2O /kg pulpa seca)	Humedad ligada (kg H_2O /kg pulpa seca)
0.00057	3.50000	0.008089	0.208	3.453	0.045

NOTAS

- *La humedad inicial de la pulpa fue $78.76 \pm 0.01 \%$.
- *Se determinó el punto crítico y humedad en la pulpa según la curva promedio de secado con aire a temperatura de $75.3 \pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se determinó el coeficiente de transferencia de masa con base en la humedad absoluta inicial y final del gas de secado (0.06741 y $0.13788 \text{ kg } H_2O/\text{kg}$ aire seco, respectivamente) en la prueba de secado con aire a temperatura de $75.3 \pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se llevó a cabo el cálculo de la humedad libre con X_1 de $3.708 \text{ kg agua / kg pulpa seca}$ y X_c 3.500 de $\text{kg agua / kg pulpa seca}$.
- *Se llevó a cabo el cálculo de la humedad no ligada con X_c de $3.500 \text{ kg agua / kg pulpa seca}$ y X_2 de 0.047 de $\text{kg agua / kg pulpa seca}$.
- *Se llevó a cabo el cálculo de la humedad ligada con X_2 de 0.047 de $\text{kg agua / kg pulpa seca}$ y el valor promedio de humedad de la muestra final de las pruebas de secado de $4.41 \pm 0.01\%$.

Figura 47. Comportamiento de humedad absoluta de muestra congelada de pulpa en secado a 75.3 ± 2.2 °C



NOTAS

- *Se realizó la prueba con aire a temperatura promedio de 75.3 ± 2.2 °C.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de 26.2 °C y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue 78.76 ± 0.01 %.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.
- *Para la obtención de pulpa con 15 % de humedad, $0.1765 \text{ kg de agua / kg de pulpa seca}$, se requirieron $\ln(0.1765/3.1731)/(-0.037) = 78.09$ minutos de secado.

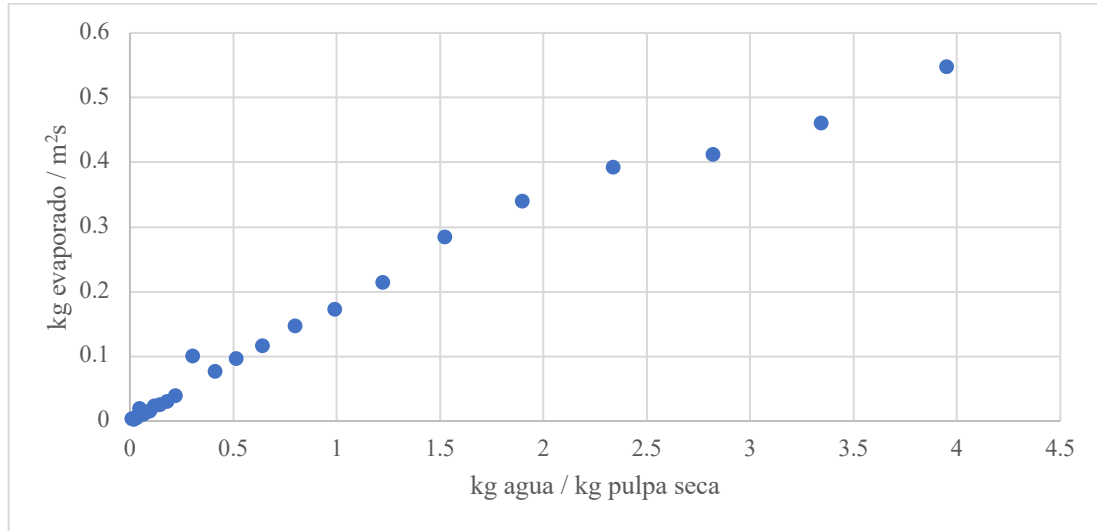
Tabla 38. Tiempo promedio de secado a 75.3 ± 2.2 °C para obtención de pulpa a humedades específicas, a partir del secado de pulpa previamente congelada

Humedad (%)	Tiempo de secado (min)
25	60.90
20	68.68
15	78.09
10	90.59

NOTAS

- *Se realizó el cálculo de los tiempos empleando la ecuación de regresión del comportamiento de la humedad absoluta de la muestra congelada de la curva de secado anterior.

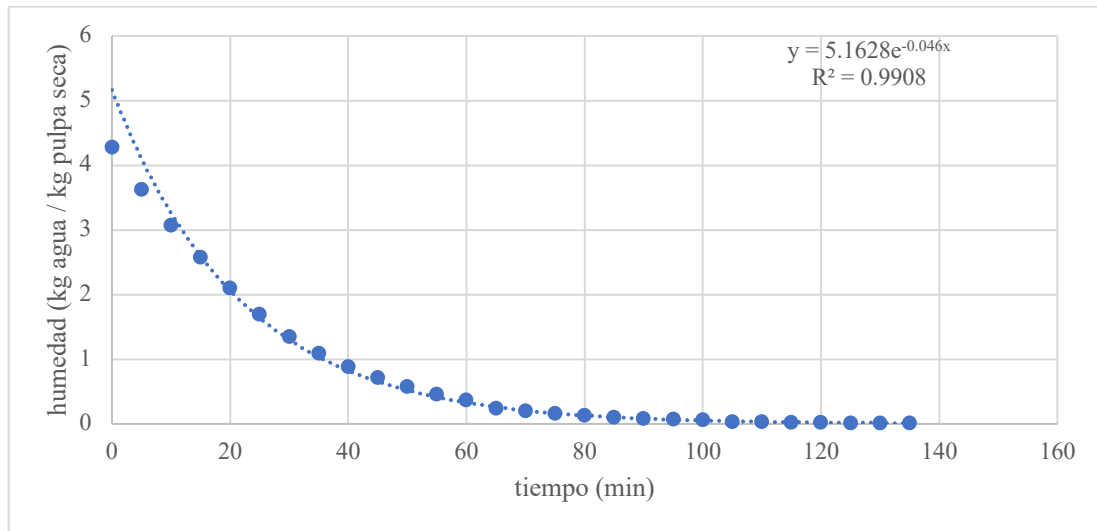
Figura 48. Curva de secado de muestra de pulpa de café congelada con aire a $65.3 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *La pulpa dejar descongelar por 24 horas a temperatura de $24.5 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue $75.94 \pm 0.01 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.

Figura 49. Comportamiento de humedad absoluta de muestra congelada de pulpa en secado a $65.3 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$



NOTAS

- *Se realizó la prueba con aire a temperatura promedio de $65.3 \pm 1.2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- *Se realizó la prueba de secado a temperatura ambiente de $24.5 \text{ }^\circ\text{C}$ y presión ambiental de 84.6 kPa.
- *La humedad inicial de la pulpa fue $75.94 \pm 0.01 \%$.
- *Las mediciones del peso de la muestra se realizaron cada 5 minutos.
- *Para la obtención de pulpa con 15 % de humedad, $0.1765 \text{ kg de agua / kg de pulpa seca}$, se requirieron $\ln(0.1765/5.1628)/(-0.046) = 73.39$ minutos de secado.

Tabla 39. Humedad en pulpa de café, según tiempo de secado a 75.2 ± 2.2 °C

Muestra	Tiempo de secado (min)	Humedad (%)
1	55	54.36
2	60	59.44
3	70	46.83
4	80	32.79
5	95	21.86
6	105	14.09
7	115	18.04
8	135	9.81

NOTAS

*Se realizó la prueba de determinación de humedad a temperatura ambiente de 27.0 °C y presión de 84.6 kPa.

C. Dimensionamiento de equipos

Tabla 40. Especificaciones del calendario de cosecha y beneficio húmedo

Detalle	Finca de café con beneficio húmedo
Localización	Región de Acatenango, Chimaltenango
Época de cosecha	diciembre a marzo
Días de cosecha	lunes a domingo
Horas de operación del beneficio húmedo	3

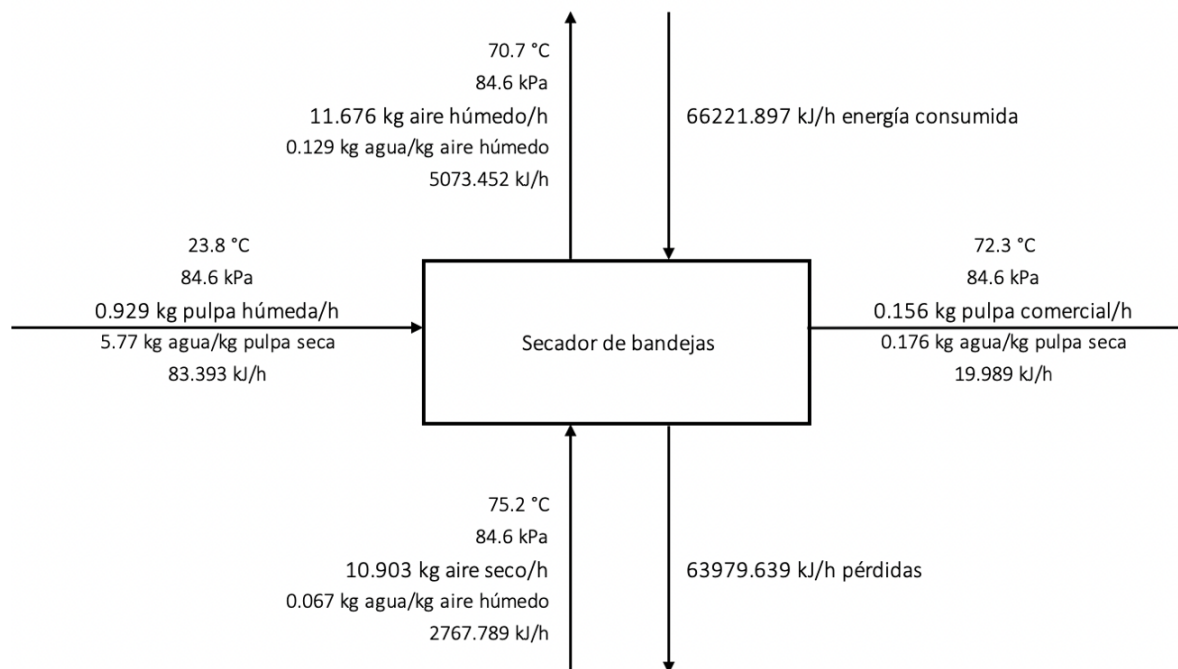
NOTAS

*La finca de café está localizada a 1800 msnm.

*La producción promedio es de 2500 quintales de café pergamino/cosecha.

*El período actual de cosecha abarca 120 días seguidos, de diciembre a marzo, de lunes a domingo.

Figura 50. Balance de masa y energía de secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala



NOTAS

- *Se realizó el balance de masa para la prueba en la Ciudad de Guatemala, a 1500 msnm.
- *La base de cálculo fue el tiempo establecido con la curva de secado (96.78 ± 4.04 minutos).
- *La humedad relativa inicial del aire fue 21.22 % y la final 47.64 %.
- *El secador de bandejas es de secado tipo directo por lotes.

Tabla 41. Balance de masa y energía de secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Universidad del Valle de Guatemala

Flujo	Entradas (kg/h)	Salidas (kg/h)	Composición (kg agua/kg seco)	Temperatura (°C)	Presión (kPa)	Energía (kJ/h)
Pulpa húmeda	0.929	0	5.77	23.8	84.6	83.393
Aire seco	10.903	0	0.067	75.2	84.6	2767.789
Aire húmedo	0	11.676	0.129	70.7	84.6	5073.452
Pulpa comercial	0	0.156	0.176	72.3	84.6	19.989
			Trabajo			66221.897
			Pérdidas			63979.638

NOTAS

*Se realizó el balance de masa para la prueba en la Ciudad de Guatemala, a 1500 msnm.

*La base de cálculo fue el tiempo establecido con la curva de secado.

*La humedad relativa inicial del aire fue 21.22 % y la final 47.64 %.

*El secador de bandejas es de tipo directo por lotes.

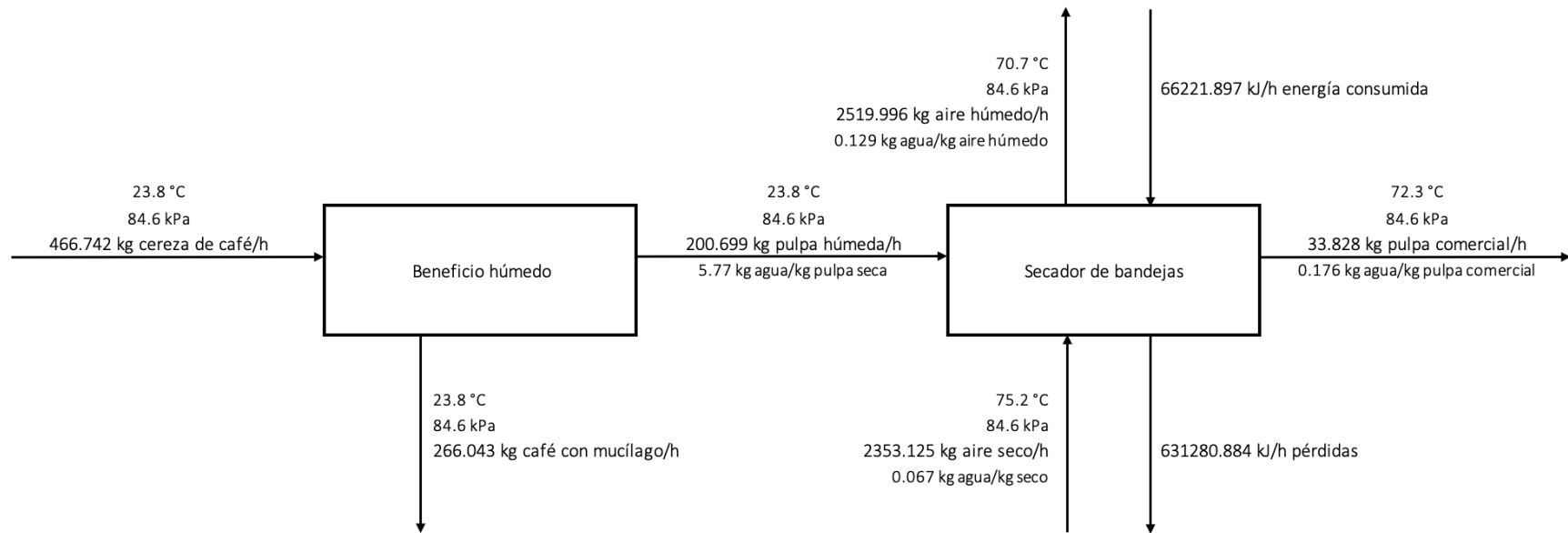
Tabla 42. Condiciones climáticas en Acatenango, Chimaltenango, durante los meses de cosecha

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura promedio (°C)	Humedad promedio (%)
diciembre	12	23	17.5	72
enero	11	23	17	70
febrero	11	23	17	68
marzo	12	24	18	69
	Promedio		17.4 ± 0.5	69.8 ± 1.7

NOTAS

*Los datos fueron tomados de sitios meteorológicos, del período de diciembre 2021 a marzo 2022.

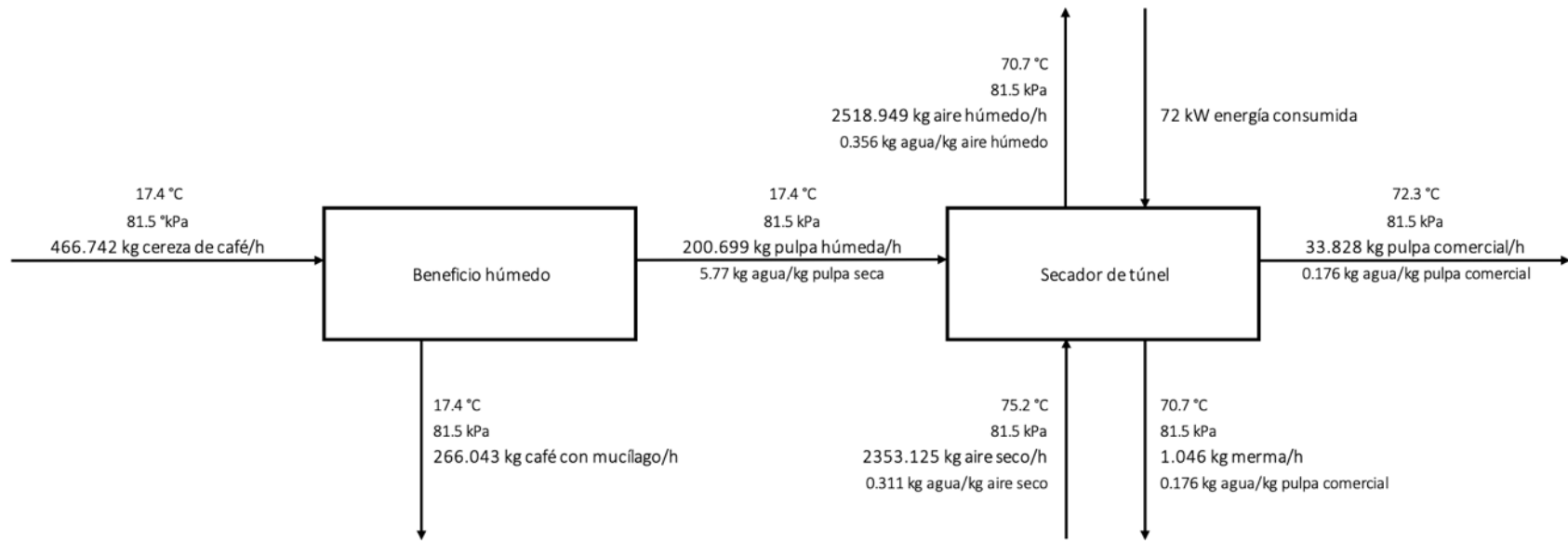
Figura 51. Balance de masa y energía de secador de bandejas de planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de pulpa de café



NOTAS

- *Se realizó el balance de masa para la cosecha y 30 % del uso de la pulpa, con base en la Ciudad de Guatemala, a 1500 msnm.
- *La base de cálculo fue la producción de café pergamino por cosecha (2500 quintales).
- *La humedad relativa inicial del aire fue 21.22 % y la final 47.64 %.
- *El secador de bandejas es de tipo directo por lotes.
- *Las conversiones para llegar a kg cereza de café fueron tomadas de Montilla, 2008.

Figura 52. Balance de masa y energía de secador tipo túnel de planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de pulpa de café, en finca de café localizada en Chimaltenango



NOTAS

*Se realizó el balance de masa del secador de bandejas en Chimaltenango, a 1800 msnm, tomando como base el flujo de aire requerido del balance del secador en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

*La base de cálculo fue la producción de café pergamino por cosecha (2500 quintales).

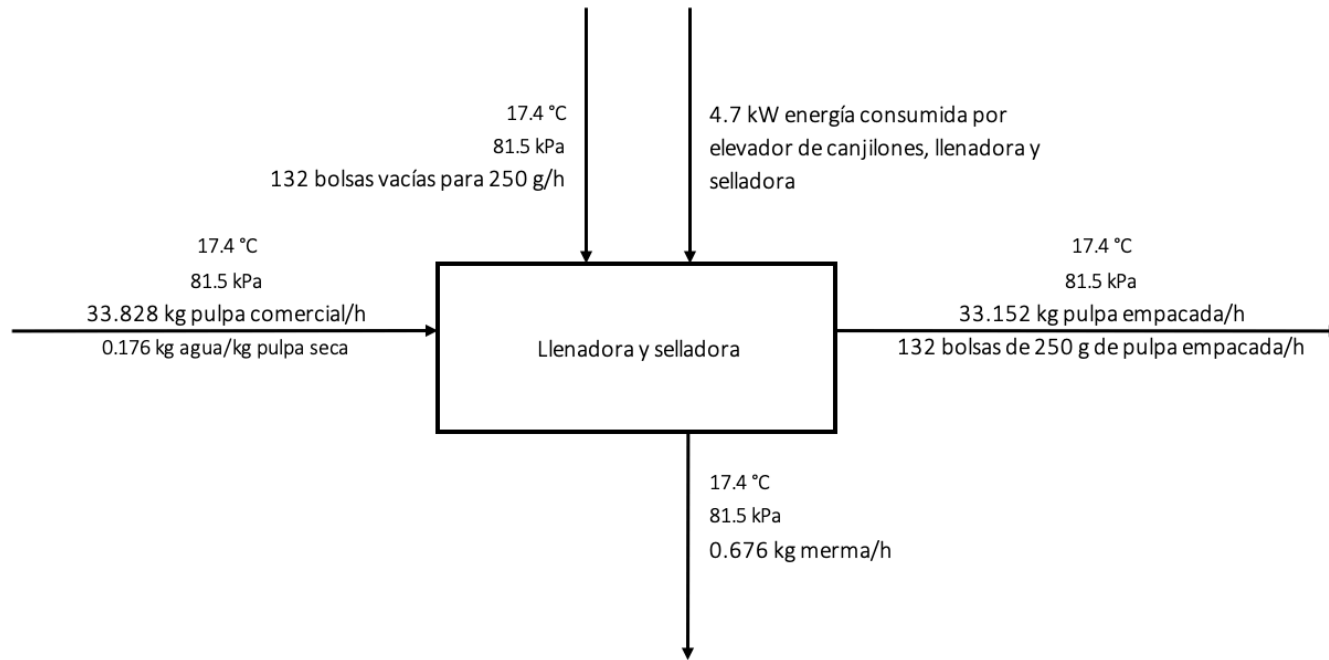
*Las conversiones para llegar a kg cereza de café fueron tomadas de Montilla, 2008.

*La humedad absoluta inicial del aire, según datos meteorológicos es 0.311 kg H₂O/kg aire seco y la final según el balance de masa es 0.380 kg H₂O/kg aire seco.

*El secador de túnel es de tipo directo continuo.

*El consumo energético del secador de túnel es en un intervalo de 2.41 horas, el tiempo de ciclo del equipo.

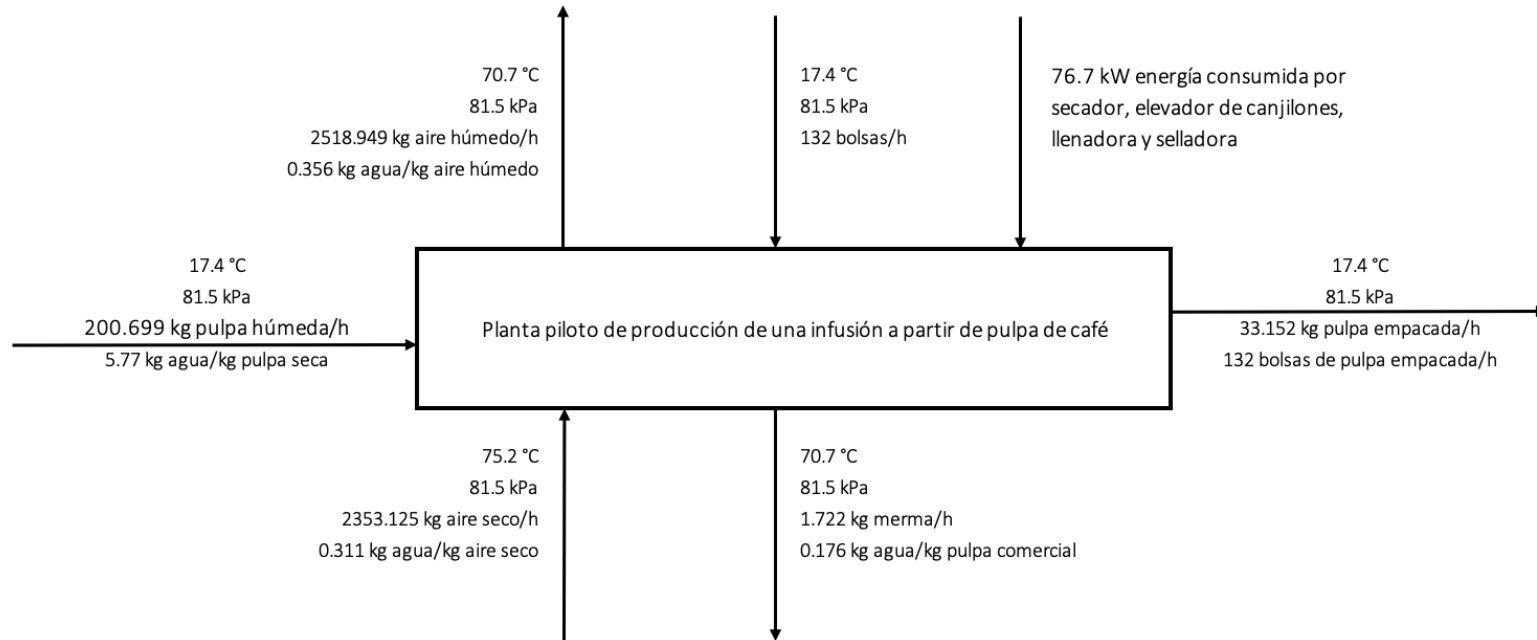
Figura 53. Balance de masa y energía de llenadora y selladora de bolsas de planta piloto propuesta para la producción de infusión a partir de pulpa de café



NOTAS

- *Se realizó el balance de masa de la llenadora y secadora según el balance del secador tipo túnel en Chimaltenango, a 1800 msnm.
- *La base de cálculo fue la producción de café pergamino por cosecha (2500 quintales).
- *Las conversiones para llegar a kg cereza de café fueron tomadas de Montilla, 2008.
- *El consumo energético está compuesto por 2 kW del elevador de canchilones, 2.6 kW de la llenadora y 0.1 kw de la selladora.
- *El consumo energético de la llenadora y selladora de bolsas es en un intervalo de 4 horas, el tiempo de uso del equipo por día.

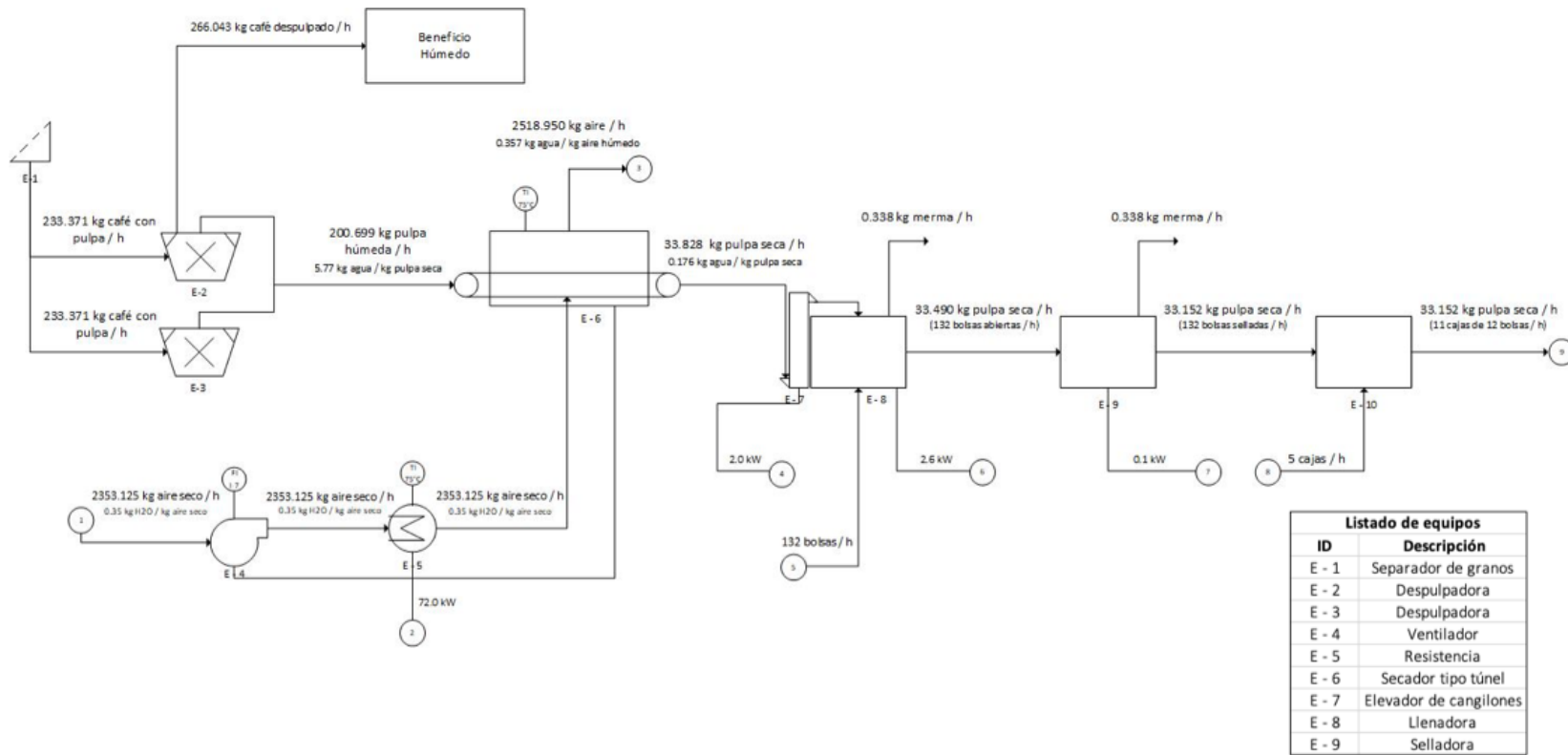
Figura 54. Balance de masa y energía global de la planta piloto propuesta para la producción de una infusión a partir de pulpa de café



NOTAS

- *Se realizó el balance de masa global según el balance del secador tipo túnel en Chimaltenango, a 1800 msnm.
- *La base de cálculo fue la producción de café pergamino por cosecha (2500 quintales).
- *Las conversiones para llegar a kg cereza de café fueron tomadas de Montilla, 2008.
- *El consumo energético de la planta está compuesto por 72 kW del secador, 2 kW del elevador de canchales, 2.6 kW de la llenadora y 0.1 kW de la selladora.
- *El consumo energético del secador de túnel es en un intervalo de 2.41 horas, el tiempo de ciclo del equipo.
- *El consumo energético del elevador de canchales, la llenadora y selladora de bolsas es en un intervalo de 4 horas, el tiempo de uso del equipo por día.

Figura 55. Propuesta de planta piloto para la producción de una infusión a partir de pulpa de café



NOTAS

*Se realizó el diagrama con base en el balance global del proceso en Chimaltenango (1800 msnm) y base de cálculo de la producción de café pergamino por cosecha (2500 quintales).

1. Aire proveniente del ambiente.
- 2, 4, 6 y 7. Energía proveniente de la red eléctrica nacional.
3. El vapor se extrae por extractores actualmente instalados.
5. Bolsas son cargadas de forma manual por los operadores.
8. Cajas son cargadas de forma manual por los operadores.
9. Las cajas se trasladan a la bodega de producto terminado.

D. Análisis económico

Tabla 43. Costo de equipos CIF y rubros para importación

Detalle	Secador (Q)	Elevador de cangilones (Q)	Llenadora (Q)	Selladora (Q)
CIF	331,080.10	20,539.68	41,079.36	5,379.44
IVA (12 %)	39,729.61	2,464.76	4,929.52	645.53
Arancel ¹	33,108.01	0	4,107.94	537.94
Transporte dentro de país destino ²	500.00	500.00	500.00	500.00
Descarga en instalaciones	250.00	250.00	250.00	250.00

NOTAS

*Las cotizaciones de los equipos fueron solicitadas CIF.

*El DAI fue tomado del Listado de Desgravación Arancelaria de Guatemala.

*El arancel correspondiente para el secador, llenadora y selladora fue 10 %, para el elevador de cangilones, 0 %.

*El transporte del equipo se propone en un solo contenedor del Puerto de San José a Acatenango, Chimaltenango.

Tabla 44. Inversión por equipos

Equipo	Costo DDP (Q)
Secador	404,667.72
Elevador de cangilones	23,754.44
Llenadora	50,866.82
Selladora	7,312.92
Placas para impresión de bolsas	4,750.00
Total	491,351.90

NOTAS

*El costo DDP fue obtenido de la suma de costos de los equipos de la tabla x.

*El costo de placas para la impresión de bolsas no es cubierto por la empresa de empaques, debe cubrirla el cliente; es un único pago.

Tabla 45. Inversión inicial

Detalle	Factor	Costo (Q)
Equipo entregado	1	491,351.90
Instalación ¹	0.41	201,454.28
Tuberías	0.07	34,394.63
Electricidad	0.13	63,875.75
Instrumentación	0.03	14,740.56
Preparación de sitio	0.03	14,740.56
Servicios auxiliares	0.14	68,789.27
Total de planta física	1.81	889,346.94
Gastos	0.2	98,270.38
Costos directos planta	2.01	987,617.32
Contingencia	0.05	24,567.59
Total	2.06	1,012,184.91

NOTAS

*Se tomaron las tablas 9 – 51 y 9 – 53 del Manual del Ingeniero Químico (Perry, 1994), como guías para definir los factores de costos, para la estimación de costos de la planta piloto.

1. Toma en cuenta la instalación de los equipos con sus pantallas y equipo eléctrico.

Tabla 46. Consumo energético

Equipo	Potencia (kW)	Consumo (kWh/día)	Costo diario (Q)	Costo semanal (Q)	Costo anual (Q)
Secadora	72.0	1655.2	2,118.68	4,237.36	67,797.79
Elevador de cangilones	2.0	7.7	9.90	39.61	50.70
Llenadora	2.6	10.1	12.87	51.49	65.90
Selladora	0.1	0.4	0.50	1.98	2.53
Total	76.7	1673.4	2,141.95	4,330.43	67,916.92

NOTAS

*El consumo de cada equipo se basó en horas y días de uso durante la cosecha de cada uno.

*El costo de electricidad fue tomado de la página web de la Empresa Eléctrica de Guatemala, Q 1.28 / kWh.

Tabla 47. Depreciación en línea recta del secador

Tiempo (años)	Depreciación anual (Q)	Depreciación acumulada (Q)	Valor en libros (Q)
0	0	0	404,667.72
1	40,466.77	40,466.77	364,200.95
2	40,466.77	80,933.54	323,734.17
3	40,466.77	121,400.32	283,267.40
4	40,466.77	161,867.09	242,800.63
5	40,466.77	202,333.86	202,333.86
6	40,466.77	242,800.63	161,867.09
7	40,466.77	283,267.40	121,400.32
8	40,466.77	323,734.17	80,933.54
9	40,466.77	364,200.95	40,466.77
10	40,466.77	404,667.72	0

NOTAS

*Se definió una tasa de depreciación de $d = 1 / 10 = 10 \%$.

*La vida útil de 10 años del secador fue especificada por el proveedor.

Tabla 48. Depreciación en línea recta del elevador de cangilones

Tiempo (años)	Depreciación anual (Q)	Depreciación acumulada (Q)	Valor en libros (Q)
0	0	0	23,754.44
1	3,393.49	3,393.49	20,360.95
2	3,393.49	6,786.98	16,967.46
3	3,393.49	10,180.48	13,573.97
4	3,393.49	13,573.97	10,180.48
5	3,393.49	16,967.46	6,786.98
6	3,393.49	20,360.95	3,393.49
7	3,393.49	23,754.44	0

NOTAS

*Se definió una tasa de depreciación de $d = 1 / 7 = 14 \%$.

*La vida útil de 7 años del elevador de cangilones fue especificada por el proveedor.

Tabla 49. Depreciación en línea recta de la llenadora y selladora

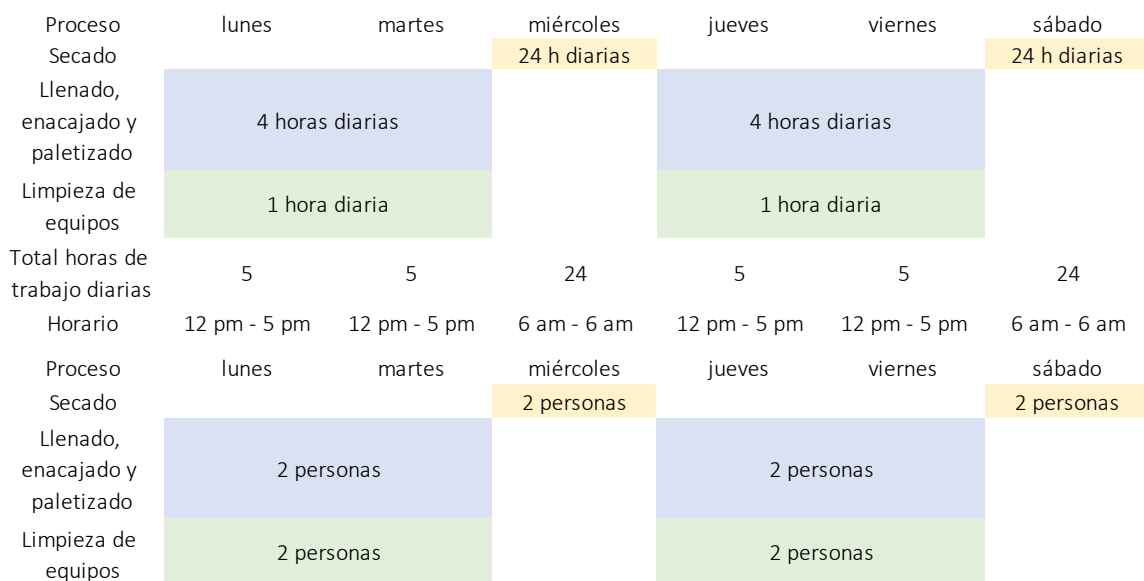
Tiempo (años)	Depreciación anual (Q)	Depreciación acumulada (Q)	Valor en libros (Q)
0	0	0	58,179.74
1	8,311.39	8,311.39	49,868.35
2	8,311.39	16,622.78	41,556.96
3	8,311.39	24,934.17	33,245.57
4	8,311.39	33,245.57	24,934.17
5	8,311.39	41,556.96	16,622.78
6	8,311.39	49,868.35	8,311.39
7	8,311.39	58,179.74	0

NOTAS

*Se definió una tasa de depreciación de $d = 1 / 7 = 14 \%$.

*La vida útil de 7 años de la llenadora y selladora fue especificada por el proveedor.

Figura 56. Diagrama de ocupación de equipos



NOTAS

*Con base en cálculos de horas de uso de cada equipo, se estableció el número de horas y personas para la operación de la planta piloto.

Tabla 50. Jornadas laborales en la planta piloto

Turno	lun	mar	mie	jue	vie	sab	dom
Diurna	5	5	0	5	5	0	0
Nocturna	0	0	12	0	0	12	0

NOTAS

*Se planificó la operación de la planta piloto con mezclas de jornadas.

Tabla 51. Horas laborales – jornada diurna

	lun	mar	mie	jue	vie	sab	dom	total
HO	5	5	7	5	5	7	0	34
HE	0	0	4	0	0	4	0	8
HD	0	0	1	0	0	1	0	2

NOTAS

*El horario de llenado, encajado y paletizado se propuso de 12 pm a 5 pm los lunes, martes, jueves y viernes.

*El horario de secado de pulpa de café se propuso de 6 am a 6 pm los miércoles y sábados.

Tabla 52. Horas laborales – jornada intercalada, diurna y nocturna

	lun	mar	mie	jue	vie	sab	dom	total
HO	5	5	0	5	5	0	0	20
HE	0	0	0	0	0	0	0	0
HD	0	0	0	0	0	0	0	0
HO	0	0	6	0	0	6	0	12
HE	0	0	4	0	0	4	0	8
HD	0	0	2	0	0	2	0	4

NOTAS

*El horario de llenado, encajado y paletizado se propuso de 12 pm a 5 pm los lunes, martes, jueves y viernes.

*El horario de secado de pulpa de café se propuso de 6 pm a 6 am los miércoles y sábados.

Tabla 53. Salario mínimo y prestaciones de ley

	Monto (Q)	Período
Salario mínimo	2,872.55	mensual
Bono 14	2,872.55	anual
Aguinaldo	2,872.55	anual
Capacitación	2,872.55	anual
Pasivo laboral	2,872.55	anual
IRTRA	28.73	mensual
IGSS	306.50	mensual
INTECAP	28.73	mensual
Bonificación incentivo	250.00	mensual
Salario mínimo	2,872.55	mensual
Bono 14	2,872.55	anual
Aguinaldo	2,872.55	anual
Total	4,444.02	mensual

NOTAS

*El salario mínimo fue tomado de la página web del Gobierno de Guatemala, para el sector agrícola.

*El detalle de prestaciones fue tomado de la página web del Gobierno de Guatemala.

Tabla 54. Costo de mano de obra

	Monto (Q)	Período
Costo	4,444.02	mensual
Costo	148.13	diario
HO	18.52	por hora
HE	27.78	por hora
HD	37.03	por hora

NOTAS

*El pago de las horas ordinarias equivale al costo diario dentro de 8 horas.

*El pago de las horas extras equivale al 50 % más que el costo de horas ordinarias.

*El pago de las horas dobles equivale al doble del costo de horas ordinarias.

Tabla 55. Costo total de mano de obra, según programación de trabajo

Semana	Trabajador 1 (Q)	Trabajador 2 (Q)
1	1,080.14	1,123.35
2	1,123.35	1,080.14
3	1,080.14	1,123.35
4	1,123.35	1,080.14
5	1,080.14	1,123.35
6	1,123.35	1,080.14
7	1,080.14	1,123.35
8	1,123.35	1,080.14
9	1,080.14	1,123.35
10	1,123.35	1,080.14
11	1,080.14	1,123.35
12	1,123.35	1,080.14
13	1,080.14	1,123.35
14	1,123.35	1,080.14
15	1,080.14	1,123.35
16	1,123.35	1,080.14
17	1,080.14	1,123.35
0.14	154.31	154.31
Total		37,767.99

NOTAS

*Los trabajadores tendrán turno diurno de secado en semanas intercaladas.

*Dado el funcionamiento del beneficio húmedo de 120 días, la cantidad de semanas no es exacta, 17.14.

Tabla 56. Costo de materia prima

	Costo (Q / kg)	Cantidad anual	Costo anual (Q)
Pulpa fresca	1.65	72,252	119,486.15

NOTAS

*Se tomó como base información de la finca de café, para el precio de un quintal de pulpa fresca, Q 75.

*El precio de la pulpa incluye la separación y eliminación de otros materiales como ramas, piedras, etc.

Tabla 57. Material de empaque y operación

	Tamaño (m) / capacidad (lb)	Costo (Q / unidad)	Cantidad anual	Costo anual (Q)
Bolsas impresas de 250 g	0.135 x 0.265 x 0.07	3.96	47738	189,042.48
Cajas para 12 bolsas	0.292 x 0.268 x 0.259	5.02	3978	19,953.65
Bolsas para pulpa fresca	50	13.20	3186	42,059.12
Ecotact para pulpa seca	50	19.36	526	10,189.64
Total				261,244.89

NOTAS

*Los precios descritos no incluyen IVA (12 %).

Tabla 58. Flujo de efectivo

Año	0 (Q)	1 (Q)	7 (Q)	8 (Q)	10 (Q)
Inversión inicial	(1,012,184.91)	0	0	0	0
Ingresos totales	0	789,928.48	789,928.48	789,928.48	789,928.48
Egresos totales	0	(538,587.60)	(620,521.78)	(538,587.60)	(943,255.32)
Impuestos (ISR)	0	(62,835.22)	(62,835.22)	(62,835.22)	(62,835.22)
Flujo neto	(1,012,184.91)	188,505.66	106,571.48	188,505.66	(216,162.06)

NOTAS

*El flujo neto durante los años 1 al 6 es el mismo.

*En el año 7 se hace la compra de un nuevo elevador de cangilones, llenadora y selladora.

*El flujo neto durante los años 8 y 9 es el mismo.

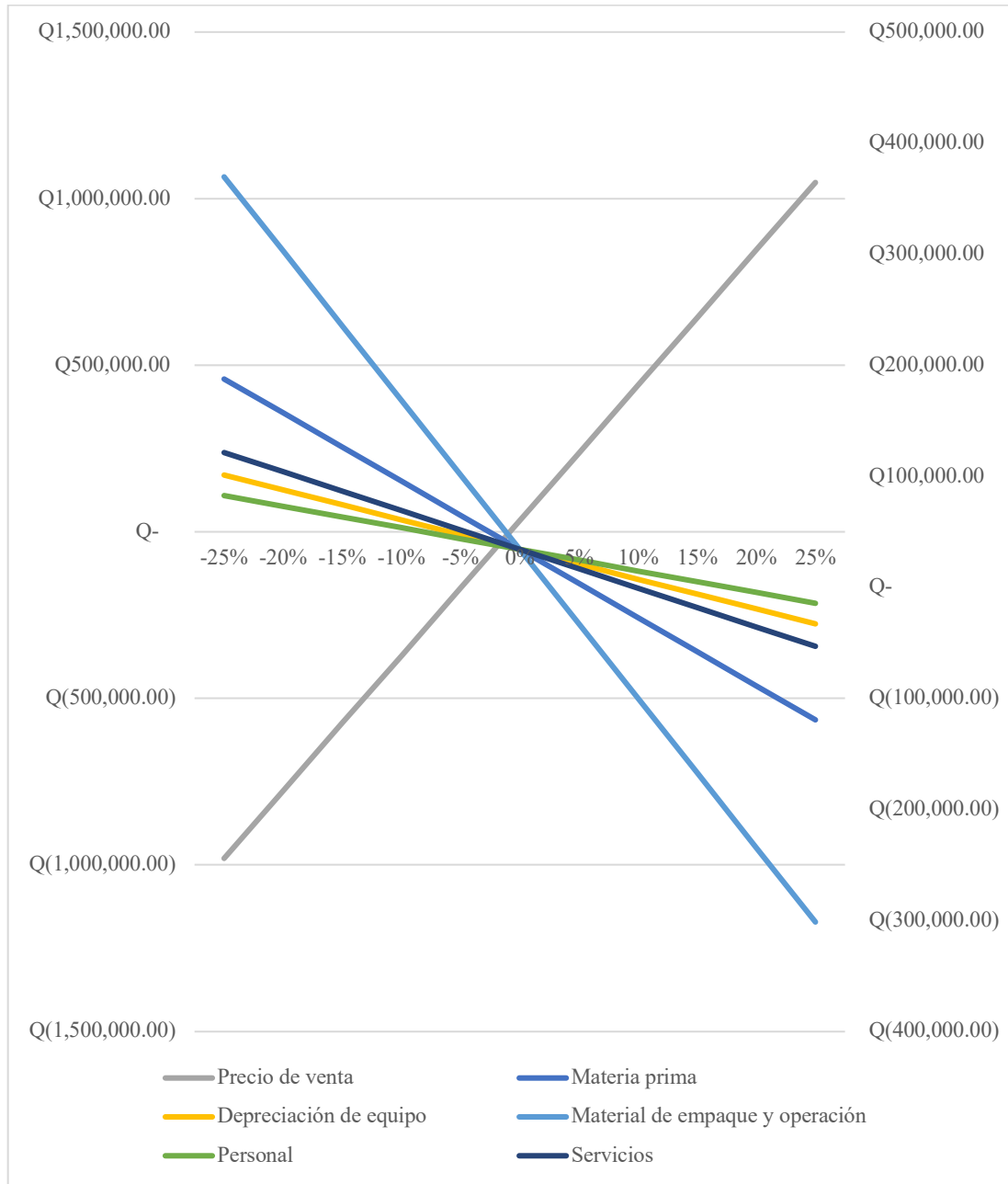
*En el año 10 se hace la compra de un nuevo secador continuo tipo tunel.

*En el año 0 no hay ventas ni costos relacionado a la operación de la planta piloto debido a que ese año se realiza la inversión inicial.

*No se incluye el IVA, ya que los precios de materiales fueron cotizados sin IVA.

*La tasa de impuesto del ISR fue 25 %.

Figura 57. Análisis de sensibilidad – VPN

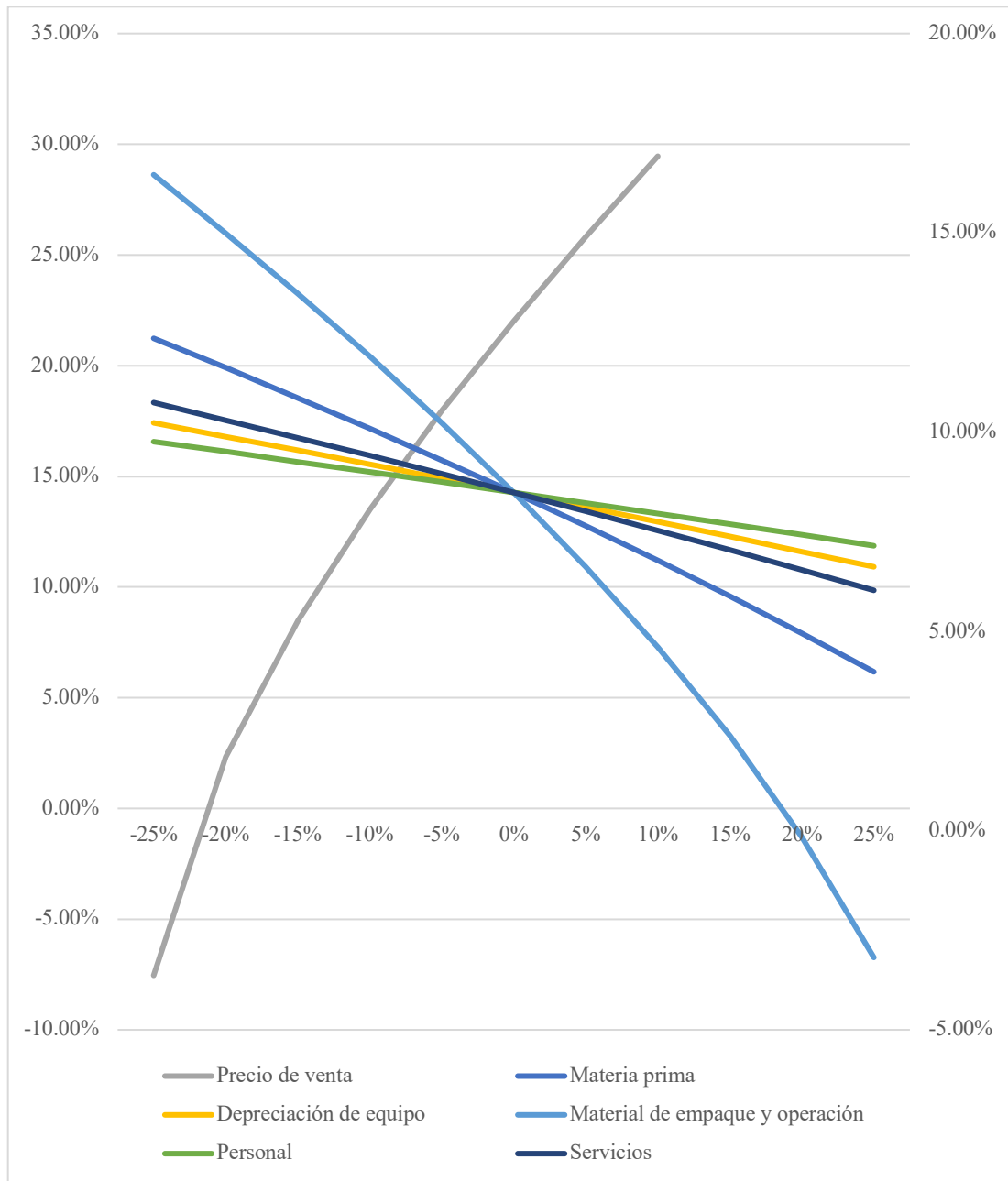


NOTAS

*El precio de venta corresponde al eje principal, a la izquierda.

*La materia prima, depreciación de equipo, material de empaque y operación, personal y servicios corresponden al eje secundario, a la derecha.

Figura 58. Análisis de sensibilidad – TIR

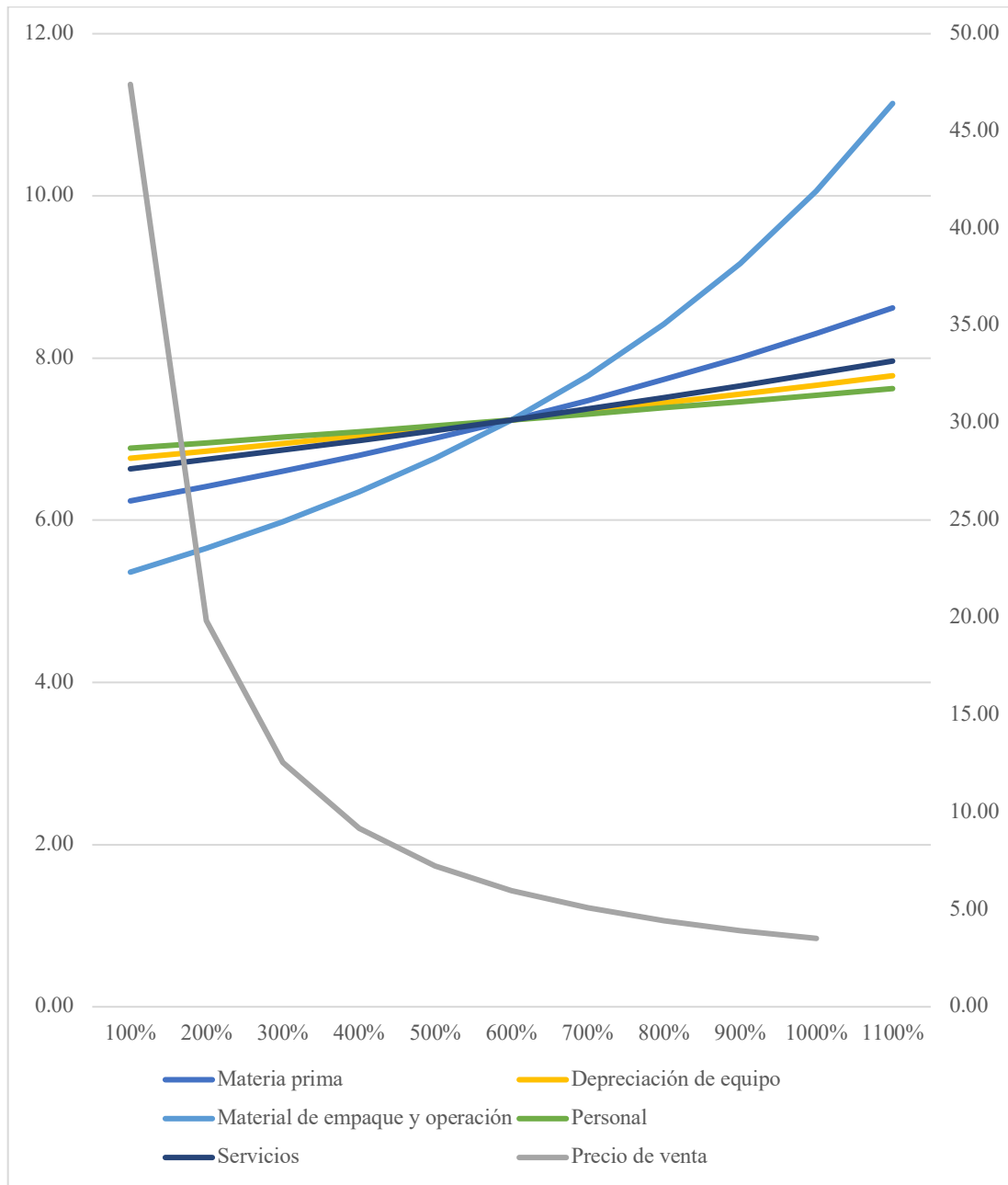


NOTAS

*El precio de venta corresponde al eje principal, a la izquierda.

*La materia prima, depreciación de equipo, material de empaque y operación, personal y servicios corresponden al eje secundario, a la derecha.

Figura 59. Análisis de sensibilidad – Período de recuperación



NOTAS

*El precio de venta corresponde al eje principal, a la izquierda.

*La materia prima, depreciación de equipo, material de empaque y operación, personal y servicios corresponden al eje secundario, a la derecha.

Tabla 59. Catación de infusión de pulpa de café

Muestra	Pulpa (g)	Agua (ml)	Notas (sabor y aroma)
Pulpa seca	10	450	Caramelo Arándano

NOTAS

*La extracción fue de 10 gramos de pulpa seca con 15.78 ± 0.01 % de humedad, en 450 ml de agua a 90 °C, por 5 minutos.

*La catación fue realizada por Manuel Valentino, catador Guatemalteco de la industria cafetalera.

Figura 60. Preguntas del panel sensorial

MUESTRA 590
Descripción (opcional)

Cuánto le gusta el color de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el olor de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el sabor de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el aspecto de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el sabor en general de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Comentarios, por favor sea específico con sus comentarios. *

Texto de respuesta larga
.....

MUESTRA 745 ✕ ⋮

Descripción (opcional)

Cuánto le gusta el color de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el olor de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el sabor de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el aspecto de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Cuánto le gusta el sabor en general de la muestra? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Me disgusta muchísimo Me gusta muchísimo

Comentarios, por favor sea específico con sus comentarios. *

Texto de respuesta larga

.....

Por favor tome un minuto para responder ✕ ⋮

Descripción (opcional)

Cuál de las dos muestras prefiere? * ⋮

590

745

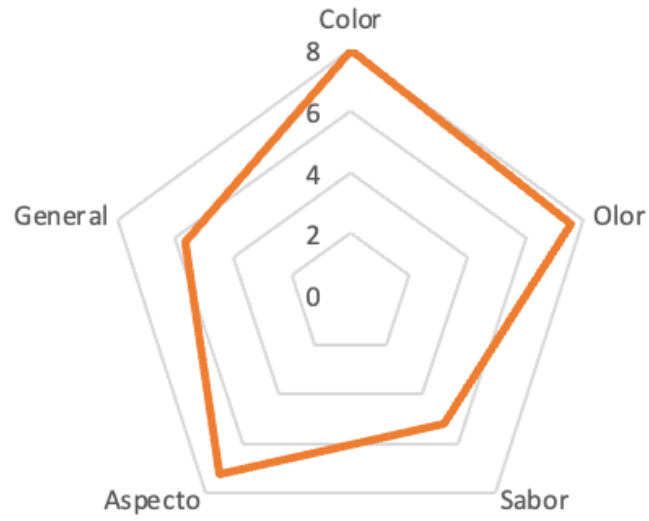
NOTAS

*El código de la muestra caliente fue 590.

*El código de la muestra fría fue 745.

*El análisis sensorial se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Figura 61. Análisis por atributos de la muestra de infusión caliente

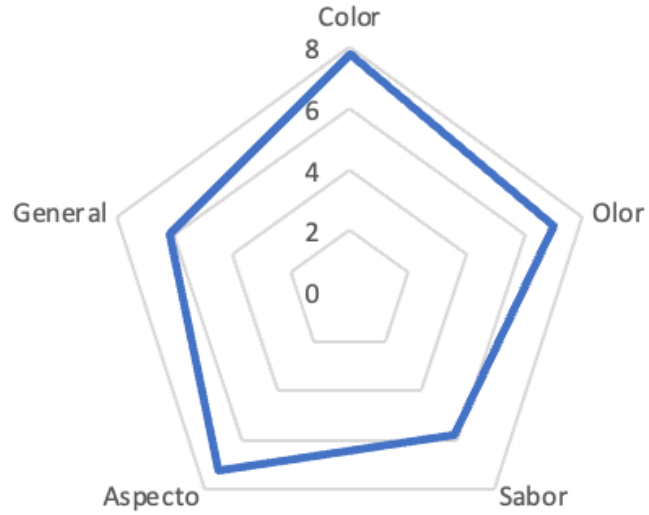


NOTAS

*El código de la muestra fue 590.

*El análisis sensorial se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Figura 62. Análisis por atributos de la muestra de infusión fría

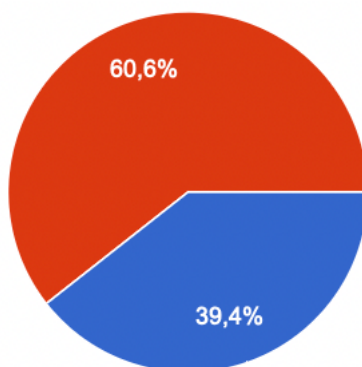


NOTAS

*El código de la muestra fue 745.

*El análisis sensorial se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

Figura 63. Resultados de preferencia de infusión de pulpa de café



NOTAS

*El código de la muestra caliente fue 590 (39.4 % de preferencia).

*El código de la muestra fría fue 745 (60.6 % de preferencia).

*El análisis sensorial se llevó a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.

E. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Concentración de ácido ascórbico en soluciones de la curva de calibración para determinación de antioxidantes y concentración de pulpa en soluciones de muestra de pulpa de café

[ácido ascórbico]

$$= \left(\frac{\text{masa ácido ascórbico}}{\text{volumen de aforo solución}} \right) * \left(\frac{\text{volumen de solución de ácido ascórbico}}{\text{volumen de tubo de ensayo}} \right)$$

[ácido ascórbico]

$$= \left(\frac{0.01 \text{ g aa}}{100 \text{ mL metanol al } 80 \% v/v} \right) * \left(\frac{50 \mu\text{L}}{4 \text{ mL}} \right) * \left(\frac{1 \text{ mL}}{1000 \mu\text{L}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right) = \frac{0.00125 \text{ mg ácido ascórbico}}{\text{mL}}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las diluciones utilizadas en la curva de calibración y las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca.

*Se variaron las cantidades de solución de ácido ascórbico de 75 en 75 μL , desde 50 hasta 500 μL .

Cálculo 2. Volumen de metanol al 80 % v/v para soluciones de la curva de calibración para determinación de antioxidantes y soluciones de muestra de pulpa de café

$$\begin{aligned} \text{metanol} &= \text{volumen de tubo de ensayo} - \text{volumen de ácido ascórbico} \\ &\quad - \text{volumen de DPPH} \end{aligned}$$

$$\text{metanol} = 4000 \mu\text{L} - 50 \mu\text{L} - 1000 \mu\text{L} = 2950 \mu\text{L metanol}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las soluciones utilizadas en la curva de calibración y las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca.

*Se variaron las cantidades de solución de ácido ascórbico de 75 en 75 μL , desde 50 hasta 500 μL .

*La cantidad de solución de DPPH al 0.000224 % m/v se mantuvo constante en 1000 μL .

Cálculo 3. Absorbancia corregida en lecturas de soluciones de la curva de calibración para determinación de antioxidantes, curva de calibración para determinación de polifenoles y soluciones de muestra de pulpa de café

$$\text{absorbancia corregida} = \text{absorbancia} - \text{blanco}$$

$$\text{absorbancia corregida} = 1.210 - 0.075 = 1.135$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las lecturas de absorbancia de las soluciones utilizadas en la curva de calibración para determinación de antioxidantes, polifenoles y para las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca.

*La lectura del blanco se mantuvo constante en 0.075.

Cálculo 4. Porcentaje de inhibición de las soluciones de la curva de calibración para determinación de antioxidantes y soluciones de muestra de pulpa de café

$$\% \text{ de inhibición} = \left(\frac{\text{control} - \text{blanco} - \text{absorbancia corregida}}{\text{control} - \text{blanco}} \right) * 100$$

$$\% \text{ de inhibición} = \left(\frac{1.248 - 1.135}{1.248} \right) * 100 = 9.05 \%$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las lecturas de absorbancia de las soluciones utilizadas en la curva de calibración y las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca.

*La lectura del control sin el blanco se mantuvo constante en 1.248.

Cálculo 5. Índice IC 50 de antioxidantes de las soluciones de la curva de calibración para determinación de antioxidantes y soluciones de muestra de pulpa de café

$$IC\ 50 = \left(\frac{\% \text{ de inhibición establecido} - \text{intercepto de ecuación de regresión}}{\text{pendiente de ecuación de regresión}} \right)$$

$$IC\ 50 = \left(\frac{50 - (-1.8744)}{7641.9} \right) = \frac{0.0068 \text{ mg ácido ascórbico}}{mL}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las lecturas de absorbancia de las soluciones utilizadas en la curva de calibración y las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca.

*El dato de 50 % de inhibición se utilizó en todas las determinaciones del indicador IC 50.

Cálculo 6. Actividad antioxidante de la pulpa de café fresca y seca

Actividad antioxidante = promedio de IC 50 en muestra

Actividad antioxidante

$$= \left(\frac{6.1418 \frac{mg}{mL} + 5.4700 \frac{mg}{mL} + 6.1736 \frac{mg}{mL} + 6.6241 \frac{mg}{mL}}{4} \right) * \left(\frac{1000 \mu g}{1 mg} \right)$$

$$= \frac{6102.3798 \pm 475.6205 \mu g}{mL}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para la actividad antioxidante de la muestra de pulpa de café fresca y seca.

Cálculo 7. Concentración de ácido gálico y ácido tánico en las soluciones de la curva de calibración para determinación de polifenoles

$$[\text{ácido}] = \left(\frac{\text{masa ácido}}{\text{volumen de aforo solución}} \right) * \left(\frac{\text{volumen de solución de ácido}}{\text{volumen de tubo de ensayo}} \right)$$

$$[\text{ácido}] = \left(\frac{0.001 \text{ g ácido gálico}}{10 \text{ mL metanol al } 80 \% v/v} \right) * \left(\frac{100 \mu L}{5.5 \text{ mL}} \right) * \left(\frac{1 \text{ mL}}{1000 \mu L} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right)$$

$$= \frac{0.0018 \text{ mg ácido gálico}}{mL}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las diluciones utilizadas en la curva de calibración de ácido gálico y ácido tánico.

*La masa de ácido tánico fue de 0.0012 g.

*Se variaron las cantidades de solución de ácido de 200 en 200 μL , desde 100 hasta 900 μL .

Cálculo 8. Polifenoles en soluciones de muestras de pulpa de café fresca y seca, en términos de ácido gálico y tánico

polifenoles en solución

$$= \left(\frac{\text{absorbancia corregida} - \text{intercepto de ecuación de regresión}}{\text{pendiente de ecuación de regresión}} \right)$$
$$\text{polifenoles} = \left(\frac{0.405 - (-0.181)}{89.364} \right) = \frac{0.0066 \text{ mg ácido gálico}}{\text{mL}}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca, en términos de ácido gálico y en términos de ácido tánico.

*La cantidad de solución de muestra se mantuvo constante en 200 μL .

Cálculo 9. Polifenoles en muestras de pulpa de café fresca y seca, en términos de ácido gálico y tánico

polifenoles en pulpa

$$= \frac{\text{polifenoles en solución} * \text{volumen de tubo} * \text{volumen de aforo}}{\text{masa pulpa} * \text{volumen de muestra}}$$
$$\text{polifenoles en pulpa} = \frac{\left(0.0066 \frac{\text{mg ácido gálico}}{\text{mL}} \right) * (5.5 \text{ mL}) * (50 \text{ mL})}{(5.0191 \text{ g}) * (0.2 \text{ mL})}$$
$$= \frac{1.7964 \text{ mg ácido gálico}}{\text{g pulpa de café}}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca, en términos de ácido gálico y en términos de ácido tánico.

*La cantidad de solución de muestra se mantuvo constante en 200 μL .

Cálculo 10. Polifenoles totales en muestras de pulpa de café fresca y seca, en términos de ácido gálico y tánico

$$\begin{aligned}
 & \textit{polifenoles totales} \\
 & = \textit{polifenoles en pulpa (ácido gálico)} \\
 & + \textit{polifenoles en pulpa (ácido tánico)} \\
 \textit{polifenoles totales} & = 1.7964 \frac{\textit{mg ácido gálico}}{\textit{g pulpa}} + 1.2217 \frac{\textit{mg ácido tánico}}{\textit{g pulpa}} \\
 & = 3.0181 \frac{\textit{mg ácido}}{\textit{g pulpa}}
 \end{aligned}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las lecturas de soluciones de muestra de pulpa de café fresca y seca.

Cálculo 11. Concentración solución madre de cafeína para curva de calibración

$$\begin{aligned}
 [\textit{solución}] & = \left(\frac{\textit{masa cafeína}}{\textit{volumen de aforo solución}} \right) \\
 [\textit{solución}] & = \left(\frac{2.5 \textit{ mg cafeína}}{25 \textit{ mL agua destilada}} \right) * \left(\frac{1000 \textit{ mL}}{1 \textit{ L}} \right) = 100 \textit{ ppm cafeína}
 \end{aligned}$$

NOTAS

*Se preparó 25 ml de la solución madre para la curva de calibración de cafeína.

Cálculo 12. Volumen diluciones de cafeína para curva de calibración y dilución de soluciones muestras de pulpa de café fresca y seca

$$\begin{aligned}
 \textit{volumen dilución} & = \left(\frac{\textit{concentración dilución}}{\textit{concentración solución madre}} \right) * \textit{volumen de aforo} \\
 \textit{volumen dilución} & = \left(\frac{5 \textit{ ppm}}{100 \textit{ ppm}} \right) * 25 \textit{ mL} \\
 & = 1.25 \textit{ mL solución}
 \end{aligned}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para diluciones de 5, 10, 15, 20 y 25 ppm, para la curva de calibración de cafeína.

*Se realizó el mismo cálculo para las diluciones de muestras de pulpa de café fresca y seca, procurando concentración de 15 ppm de cafeína y ácido clorogénico.

*Se aforó cada solución de la curva de calibración y de las soluciones de muestra con agua destilada en balones de 25 ml.

Cálculo 13. Concentración teórica de cafeína y ácido clorogénico en las muestras de pulpa de café fresca y seca

$$[cafeína] = (\% \text{ teórico cafeína en pulpa}) * \left(\frac{\text{masa pulpa}}{\text{volumen solución}} \right)$$

$$[cafeína] = \left(\frac{1.24 \text{ g cafeína}}{100 \text{ g pulpa}} \right) * \left(\frac{5 \text{ g pulpa}}{50 \text{ mL}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right)$$

$$= 1240 \text{ ppm}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para la concentración de ácido clorogénico (1550 ppm) en la pulpa de café fresca y seca.

Cálculo 14. Corrección de concentración de cafeína en las muestras de pulpa de café fresca y seca

$$[cafeína \text{ corregida}] = (cafeína \text{ en muestra}) * (dilución \text{ de muestra})$$

$$[cafeína \text{ corregida}] = (26.8504 \text{ ppm}) * \left(\frac{9 \text{ mL agua destilada}}{1 \text{ mL solución muestra}} \right)$$

$$= 241.6536 \text{ ppm cafeína en muestra}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las lecturas de cafeína y ácido clorogénico en las muestras de pulpa de café fresca y seca.

*La dilución de las muestras de pulpa fresca para determinación de cafeína fue 1:9.

*La dilución de las muestras de pulpa seca para determinación de cafeína fue 1:62 (2/3).

*La dilución de las muestras de pulpa fresca y seca para determinación de ácido fue 1:102 (1/3).

Cálculo 15. Concentración de ácido clorogénico en las muestras de pulpa de café fresca y seca

$$[\text{ácido clorogénico}] = \left(\frac{\text{área bajo la curva del cromatograma} - \text{intercepto de ecuación de regresión}}{\text{pendiente de ecuación de regresión}} \right)$$

$$[\text{ácido clorogénico}] = \left(\frac{31.0352 \text{ mAU} - (-2.87512)}{10.7454} \right)$$

$$= 3.1558 \text{ ppm ácido clorogénico en muestra}$$

NOTAS

*Se realizó el mismo cálculo para todas las lecturas del área bajo la curva de los cromatogramas de ácido clorogénico en las muestras de pulpa de café fresca y seca.

*Este cálculo no es el resultado final, ya que debe corregirse según el cálculo 14.

Cálculo 16. Área de muestra de secado para la construcción de la curva de secado de pulpa de café

$$\text{área de secado} = (\text{área superior de muestra}) + (\text{área inferior de muestra})$$

$$\text{área de secado} = (0.1 \text{ m} * 0.1 \text{ m}) + (0.1 \text{ m} * 0.1 \text{ m}) = 0.02 \text{ m}^2$$

NOTAS

*El área de secado de muestra se mantuvo constante en todas las pruebas de secado y curvas obtenidas.

Cálculo 17. Temperatura promedio del aire en cada prueba de secado

$$T \text{ promedio} = \left(\frac{T1 + T2 + T3 + \dots}{\text{cantidad de mediciones}} \right)$$

$$T \text{ promedio} = \left(\frac{74.8 \text{ }^\circ\text{C} + 73.2 \text{ }^\circ\text{C} + 75.3 \text{ }^\circ\text{C} + \dots}{28} \right) = 77.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la temperatura del aire de secado de todas las pruebas de secado de pulpa de café.

*La temperatura promedio de la curva final fue $75.2 \pm 2.2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cálculo 18. Pérdida de humedad durante el proceso de secado de pulpa de café

$$\text{pérdida de humedad} = \text{masa } n \text{ de muestra} - \text{masa } n + 1 \text{ de muestra}$$

$$\text{pérdida de humedad} = 20.5604 \text{ g} - 18.2575 \text{ g} = 2.3029 \text{ g H}_2\text{O}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la pérdida de humedad en todas las pruebas de secado de pulpa de café.

*El cálculo corresponde a la diferencia de masa entre cada medición en intervalos de 5 minutos.

Cálculo 19. Pérdida de humedad acumulada durante el proceso de secado de pulpa de café

$$\text{pérdida de humedad} = \text{masa original de muestra} - \text{masa de muestra}$$

$$\text{pérdida de humedad} = 20.5604 \text{ g} - 5.5113 \text{ g} = 15.0491 \text{ g H}_2\text{O}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la pérdida de humedad en todas las pruebas de secado de pulpa de café.

*El cálculo corresponde a la diferencia de masa entre la masa original de la muestra y la masa de la misma en cada medición en intervalos de 5 minutos.

Cálculo 20. Tasa de evaporación de humedad durante el proceso de secado de pulpa de café

$$\begin{aligned} \text{tasa de evaporación } (N) &= \frac{\text{pérdida de humedad}}{(t_2 - t_1) * \text{área de secado}} \\ \text{tasa de evaporación } (N) &= \left(\frac{2.3029 \text{ g } H_2O}{(300 \text{ s} - 0 \text{ s}) * (0.02 \text{ m}^2)} \right) * \left(\frac{\text{kg}}{1000\text{g}} \right) \\ &= \frac{0.0003838 \text{ kg } H_2O}{\text{m}^2\text{s}} \end{aligned}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la tasa de evaporación de humedad en todas las pruebas de secado de pulpa de café.

Cálculo 21. Humedad restante en la muestra de pulpa de café durante el proceso de secado

$$\begin{aligned} \text{humedad en sólido } (X) &= \frac{\text{masa original de muestra} - \text{masa seca de muestra}}{\text{masa seca de muestra}} \\ \text{humedad en sólido } (X) &= \left(\frac{20.5604 \text{ g} - 2.7144 \text{ g}}{2.7144 \text{ g}} \right) * \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \\ &= \frac{6.5746 \text{ kg agua}}{\text{kg pulpa seca}} \end{aligned}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la humedad restante en la pulpa durante el proceso de secado, en todas las pruebas de secado de pulpa de café.

Cálculo 22. Humedad absoluta en la pulpa de café durante el proceso de secado

$$\begin{aligned} \text{humedad absoluta } (X) &= \frac{\text{humedad relativa}}{1 - \text{humedad relativa}} \\ \text{humedad absoluta } (X) &= \frac{0.15}{1 - 0.15} = \frac{0.1765 \text{ kg } H_2O}{\text{kg pulpa seca}} \end{aligned}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la humedad absoluta en la pulpa durante el proceso de secado, en todas las pruebas de secado de pulpa de café.

Cálculo 23. Tiempo de secado en función de la humedad restante en la pulpa de café durante el proceso de secado, según regresión logarítmica

$$\text{tiempo de secado} = \text{coeficiente de ecuación} * \ln X + \text{desfase en eje } x$$

$$\text{tiempo de scado} = -24.3 * \ln(0.1765) + 48.999 = 91.15 \text{ min}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar el tiempo de secado necesario para alcanzar humedad de 10, 15, 20 y 25 %, en todas las pruebas de secado de pulpa de café.

Cálculo 24. Cantidad de cereza de café que entra al beneficio húmedo

$$\text{cereza café} = \frac{\left(\frac{\text{quintales pergamino}}{\text{cosecha}}\right) * (\text{conversión a cereza})}{\left(\frac{\text{horas de trabajo beneficio húmedo}}{\text{día}}\right)}$$

* (% uso de pulpa)

cereza café

$$= \frac{\left(2500 \frac{\text{quintales pergamino}}{\text{cosecha}}\right) * \left(\frac{\text{cosecha}}{120 \text{ días}}\right) * \left(\frac{4.94 \text{ quintales cereza}}{1 \text{ quintal pergamino}}\right)}{\left(\frac{3 \text{ horas de trabajo beneficio húmedo}}{\text{día}}\right)}$$

$$* \left(\frac{30 \text{ quintales pulpa}}{100 \text{ quintales pulpa}}\right) * \left(\frac{100 \text{ lb}}{1 \text{ quintal}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kg}}{2.205 \text{ lb}}\right) = 466.742 \frac{\text{kg cereza de café}}{h}$$

NOTAS

*Se definió una capacidad de procesamiento de pulpa del 30 %.

*Las conversiones de las partes del grano de café se tomaron de Montilla, 2008.

*La base de cálculo es 2500 quintales de café pergamino por cosecha (120 días).

*Este cálculo se realizó para el balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 25. Cantidad de pulpa en base seca para el balance de masa y energía del secado de pulpa de café

$$S_S = (\text{cantidad de pulpa}) * (\% \text{ de pulpa seca en el flujo})$$

$$S_S = \left(200.699 \frac{\text{kg pulpa húmeda}}{h} \right) * \left(\frac{0.1477 \text{ pulpa seca}}{\text{pulpa húmeda}} \right) = 29.643 \frac{\text{kg pulpa seca}}{h}$$

NOTAS

*El flujo de pulpa está dado por el balance de masa del beneficio húmedo, a una capacidad de procesamiento de pulpa del 30 %.

*El porcentaje inicial promedio de pulpa seca (14.77 %) se basó en la humedad inicial de las muestras en pruebas de secado de pulpa de café (85.23 ± 1.25 %).

*Este cálculo se realizó para el balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 26. Evaporación de agua en el proceso de secado de pulpa de café

$$\text{evaporación} = (S_S) * (x_0 - x_1)$$

$$\text{evaporación} = \left(29.643 \frac{\text{kg pulpa seca}}{h} \right) * (0.8523 - 0.15) = 20.818 \frac{\text{kg agua}}{h}$$

NOTAS

*El flujo de pulpa está dado por el balance de masa del beneficio húmedo, a una capacidad de procesamiento de pulpa del 30 %.

*El porcentaje inicial promedio de humedad se basó en las muestras en pruebas de secado de pulpa de café (85.23 ± 1.25 %).

*Este cálculo se realizó para el balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 27. Fracción de humedad del aire de secado

$$y_i = \frac{Y_i}{1 + Y_i}$$

$$y_i = \frac{0.067 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}}{1 + 0.067 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}} = 0.063 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire}}$$

NOTAS

*La humedad absoluta, Y_i , se obtuvo por medio de un simulador psicrométrico en línea, The Sugar Engineers.

*Los parámetros para el aire de entrada fueron 75.23 °C y 21.22 % (humedad relativa del aire de secado en pruebas del secador de bandejas), a 1500 msnm.

*Los parámetros para el aire de salida fueron 70.74 °C y 47.64 % (humedad relativa del aire de secado a la salida en pruebas del secador de bandejas), a 1500 msnm.

*Este cálculo se realizó para determinar las fracciones de humedad del aire de entrada y salida del balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 28. Humedad en base seca de la pulpa de café en el proceso de secado

$$X_i = \frac{x_i}{1 - x_i}$$

$$X_i = \frac{0.852 \frac{kg\ agua}{kg\ pulpa\ húmeda}}{1 - 0.852 \frac{kg\ agua}{kg\ pulpa\ húmeda}} = 5.770 \frac{kg\ agua}{kg\ pulpa\ seca}$$

NOTAS

*La humedad de la pulpa se obtuvo por medio de mediciones en una balanza de humedad.

*Este cálculo se realizó para determinar la humedad absoluta de la pulpa del balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 29. Entalpía del aire de secado

$$H'_G = (1005 + 1884 * Y_i) * T_{Gi} + 25023000 * Y_i$$

$$H'_{G0} = \left(\left(1005 + 1884 * 0.06741 \frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco} \right) * (75.23\ ^\circ C) + 25023000 \right) * \left(0.06741 \frac{kg\ agua}{kg\ aire\ seco} \right) * \left(\frac{1J}{1000kJ} \right) = 253.840 \frac{kJ}{kg\ aire\ sec}$$

NOTAS

*La humedad absoluta, Y_i , se obtuvo por medio de un simulador psicrométrico en línea, The Sugar Engineers.

*Los parámetros de entrada del aire fueron 75.23 °C y 21.22 % (humedad relativa medida en el aire de secado en pruebas del secador de bandejas), a 1500 msnm

*La ecuación presentada es utilizada para sistemas aire – agua.

*Este cálculo se realizó para determinar las entalpías del aire de entrada y salida del balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 30. Calor específico de la pulpa de café fresca

$$C_P = C_{Pcelulosa}$$

$$C_{Ppulpa} = \left(0.32 \frac{cal}{g\ ^\circ C} \right) * \left(\frac{4.184 J}{cal} \right) = 1.339 \frac{kJ}{kg\ K}$$

NOTAS

*Se tomó como base la composición descrita de la pulpa de café de 43.98 % de celulosa y 27.8 % de hemicelulosa, resultando en 71.78 % total de celulosa (Borrayo, 2014).

Cálculo 31. Entalpía de la pulpa de café en el proceso de secado

$$H'_S = (C_{Ppulpa} * \Delta T) + (X_0 * C_{Pagua}) * (T_0 - T_{ref})$$

$$H'_{S0} = \left(1.339 \frac{kJ}{kg K} * 23.81 \text{ }^\circ C\right) + \left(5.770 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ pulpa seca}} * 4.186 \frac{kJ}{kgK}\right) * (23.81 \text{ }^\circ C)$$

$$= 607.124 \frac{kJ}{kg \text{ pulpa seca}}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para la determinación de la entalpía de la pulpa de café al finalizar el proceso de secado.

*Este cálculo se realizó para determinar las entalpías de la pulpa de café del balance de masa y energía del secador de bandejas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala, y para el balance de masa y energía del secador tipo túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 32. Cantidad de aire en base seca según el balance de humedad del proceso de secado de pulpa de café

$$G_S = \frac{S_S * (X_0 - X_1)}{(Y_1 - Y_0)}$$

$$G_S = \frac{\left(29.643 \frac{kg \text{ pulpa seca}}{h}\right) * \left(5.770 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ pulpa seca}} - 0.176 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ pulpa seca}}\right)}{\left(0.138 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}} - 0.067 \frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}}\right)}$$

$$= 2353.125 \frac{kg \text{ aire seco}}{h}$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar el flujo aire necesario en el proceso de secado de pulpa de café, para secarla desde una humedad de $85.23 \pm 1.25 \%$ a $15.78 \pm 0.01 \%$.

*El dato del flujo de aire se utilizó en el cálculo de la humedad absoluta de salida del aire para el balance del secador de túnel de la planta piloto propuesta para la finca en Chimaltenango.

Cálculo 33. Cantidad de aire en base seca según el balance de entalpías del proceso de secado de pulpa de café

$$G_S = \frac{S_S * (H_{S0} - H_{S1}) + Q}{(H_{G1} - H_{G0})}$$

$$\begin{aligned} G_S &= \frac{\left(29.643 \frac{kg \text{ pulpa seca}}{h}\right) * \left(607.124 \frac{kJ}{kg \text{ pulpa seca}} - 150.027 \frac{kJ}{kg \text{ pulpa seca}}\right) + 0 \frac{kJ}{h}}{\left(434.487 \frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} - 253.840 \frac{kJ}{kg \text{ aire seco}}\right)} \\ &= 75.008 \frac{kg \text{ aire seco}}{h} \end{aligned}$$

NOTAS

*Se tomó el sistema como adiabático en el balance de entalpías, ya que no se puede comparar ni predecir el comportamiento de la pérdida de calor en el secador de bandejas en la Ciudad de Guatemala, y el secador tipo túnel en Chimaltenango.

*El dato sirve como referencia si el sistema de secado de pulpa de café fuera ideal, es decir adiabático.

Cálculo 34. Promedio logarítmico de temperaturas del aire para dimensionamiento de secador de túnel

$$\begin{aligned} \Delta t_{gm} &= \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \\ \Delta t_{gm} &= \frac{(71.54 - 23.81) - (75.23 - 23.81)}{\ln \frac{(71.54 - 23.81)}{(75.23 - 23.81)}} = 47.47 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

NOTAS

*Se realizó el cálculo para las zonas 1, 2 y 3 de secado de la pulpa de café.

Cálculo 35. Largo requerido de secador tipo túnel para el secado de pulpa de café

$$\begin{aligned} Z &= N_{TOG} * H_{TOG} \\ Z &= 0.2395 * 18.02 \text{ m} = 4.32 \text{ m} \end{aligned}$$

NOTAS

* N_{TOG} se refiere a la cantidad de unidades de transferencia de calor y H_{TOG} es la altura de cada una de las unidades de transferencia de calor.

*El secador continuo tipo túnel cotizado cumple con el requerimiento de longitud de secado (5 metros).

Cálculo 36. Velocidad de banda transportadora dentro del equipo de secado de la pulpa de café

$$\text{Velocidad de banda transportadora} = \frac{L}{\text{tiempo de ciclo}}$$

$$v \left(\frac{m}{h} \right) = \frac{5 m}{2.41 h} = 2.08 \frac{m}{h}$$

NOTAS

*Este cálculo representa la velocidad de la banda transportadora dentro del secador de túnel, para el proceso de secado de la pulpa, tomando en cuenta el tiempo de ciclo de 2.41 horas y el largo del equipo, 5 metros.

*El giro máximo del eje del motor, especificado por el proveedor, es 738 rpm.

Cálculo 37. Merma en el proceso de secado de la pulpa de café en el secador tipo túnel

$$\text{merma} = \frac{S_s * \text{merma proveedor}}{x_0}$$

$$\text{merma} = \frac{\left(29.643 \frac{kg \text{ pulpa seca}}{h} \right) * \left(\frac{3}{100} \right)}{0.85 \frac{kg \text{ pulpa seca}}{kg \text{ pulpa comercial}}} = 1.046 \frac{kg \text{ merma}}{h}$$

NOTAS

*El porcentaje de merma especificado por el proveedor fue 3 % del producto comercial, es decir, pulpa seca con composición de 0.176 kg de agua/kg de pulpa comercial.

*La merma en el secado toma en cuenta la acumulación, en forma de pasta al inicio del secado y como polvo al final del secado, de la pulpa de café dentro del secador tipo túnel.

Cálculo 38. Cantidad de bolsas para empacar la pulpa de café seca

$$\text{bolsas} = \frac{\text{flujo pulpa empacada}}{\text{presentación del producto}}$$

$$\text{bolsas} = \left(\frac{33.152 \frac{kg \text{ pulpa empacada}}{h}}{250 \frac{g}{bolsa}} \right) * \left(\frac{1000 g}{1 kg} \right) = 132 \frac{bolsas}{h}$$

NOTAS

*Se toma como base de cálculo la pulpa comercial ya empacada, ya que se estableció una merma del 2 % para el proceso de llenado y sellado, que toma en cuenta acumulación en el elevador de cangilonas, la llenadora y los sacos que se utilizan para guardar la pulpa seca.

*En este caso se asume que el 100 % de las bolsas de empaque van en buen estado.

Cálculo 39. Costo de cada rubro de la inversión inicial, según factores utilizados del Manual del ingeniero Químico

$$\text{costo por instalación} = \text{factor} * \text{costo de equipo entregado (DDP)}$$

$$\text{costo por instalación} = 0.41 * (Q 491,351.90) = Q 201,454.28$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar el costo de cada rubro tomado en cuenta en la inversión inicial.

Cálculo 40. Depreciación de equipos con el método de línea recta

$$\text{depreciación anual} = \text{valor en libros} * \text{tasa depreciación}$$

$$\text{depreciación anual} = (Q 404,667.72) * 0.1 = Q 40,466.77$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar la depreciación de cada equipo.

*La tasa de depreciación varió según ficha técnica de proveedor (10 % para el secador y 14 % para el elevador de cangilones, llenadora y selladora).

Cálculo 41. Costo de horas ordinarias

$$Q / \text{hora ordinaria} = \text{costo MO diario} / 8$$

$$Q / \text{hora ordinaria} = Q 148.13 / 8 = Q 18.52$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para determinar el costo por horas extras y horas dobles.

*En el caso del costo de horas extras, el resultado del cálculo anterior se multiplicó por 1.5.

*En el caso del costo de horas dobles, el resultado del cálculo anterior se multiplicó por 2.

Cálculo 42. Costo semanal de mano de obra

$$Q/\text{semana MO} = \frac{HO * \frac{Q}{HO} + HE * \frac{Q}{HE} + HD * \frac{Q}{HD}}{6/7}$$

$$Q/\text{semana MO} = \frac{34 * Q 18.52 + 8 * Q 27.78 + 2 * Q 37.03}{6/7} = Q 1,080.14$$

NOTAS

*Se realizó este cálculo para la semana de cada tipo de jornada.

*El costo total de mano de obra en la cosecha se determinó sumando el costo de las semanas de cosecha alternadas según la jornada correspondiente.

Cálculo 43. Margen sobre utilidades del precio por presentación de 250 gramos de pulpa seca

$$\% = \frac{\textit{utilidad neta}}{\textit{costo de producción}}$$
$$\% = \frac{Q\ 188,505.66}{Q\ 538,587.60} = 35.00 \%$$

NOTAS

*La utilidad neta se determinó con ventas – costo de producción – impuesto ISR (25 %).

*El costo de producción incluye la materia prima, material de empaque y operación, personal, servicios, y depreciación del equipo.

Cálculo 44. Valor presente neto de la inversión con proyección a 10 años, utilizando función de Excel

$$VPN = NPV (TMAR, \textit{flujo neto del año 1 al 10}) + \textit{inversión inicial}$$
$$VPN = NPV (7.55 \%, \textit{flujo neto del año 1 al 10}) + (-Q\ 1,012,184.91)$$
$$= Q\ 34,127.14$$

NOTAS

*La TMAR utilizada fue 7.55 % y representa la inflación acumulada de Guatemala para agosto, 2022.

Cálculo 45. Tasa interna de retorno de la inversión con proyección a 10 años, utilizando función de Excel

$$TIR = IRR (\textit{flujo neto del año 0 al 10})$$
$$TIR = IRR (\textit{flujo neto del año 0 al 10}) = 8.48 \%$$

NOTAS

*Se tomó el flujo neto de cada año para este cálculo, tomando en cuenta el año 0 de la inversión inicial.

Cálculo 46. Período de recuperación de la inversión con proyección a 10 años

$$\textit{periodo de recuperación} = - \frac{\textit{inversión inicial}}{\textit{promedio del flujo neto anual}}$$
$$\textit{periodo de recuperación} = - \frac{Q\ 1,012,184.91}{Q\ 139,845.47} = 7.24 \text{ años}$$

NOTAS

*Este cálculo representa el período de tiempo necesario para la recuperación de la inversión inicial, sin utilidades.

XIII. GLOSARIO

Base húmeda: Es la referencia de una determinación o medición que se realizó en correspondencia con la masa húmeda del sólido (Chang, 2013).

Base seca: Es la referencia de una determinación o medición que se realizó en correspondencia con la masa seca del sólido (Chang, 2013).

Capilaridad: Es el resultado de la acción de dos fuerzas: cohesión y adhesión. La primera se refiere a la atracción entre moléculas iguales, y la segunda es la atracción entre moléculas diferentes. Como resultado, se obtiene la acción capilar (Chang, 2013).

Ésteres: Compuestos químicos formados a partir de la unión de moléculas de ácidos y alcoholes. Tienden a tener olores agradables y característicos (Pavia, 2011).

Flux de evaporación: Cantidad de masa de H₂O que se evapora por unidad de área en un intervalo de tiempo (Treybal, 1997).

IC₅₀: Valor que indica la concentración necesaria de antioxidantes contenidos en una muestra para inhibir el 50 % de los radicales libres en la solución (Jadid, 2017).