

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico
a escala laboratorio**

Trabajo de graduación presentado por César Roberto Catalán Escobar para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,

2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



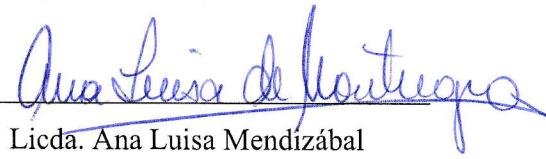
**Proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico
a escala laboratorio**

Trabajo de graduación presentado por César Roberto Catalán Escobar para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química


Guatemala,

2021

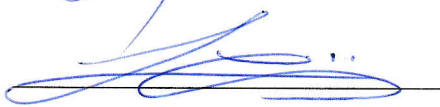
Vo. Bo.:

f(). 
Licda. Ana Luisa Mendizábal

Tribunal examinador:

f(). 
Licda. Ana Luisa Mendizábal

f(). _____
Ing. Gamaniel Zambrano

f(). 
Ing. Luis Núñez

Fecha de aprobación: Guatemala, 7 de mayo 2021

ÍNDICE

Listado de cuadros.....	iii
Listado de figuras.....	v
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
I. Introducción.....	1
II. Antecedentes.....	2
III. Justificación.....	3
IV. Objetivos.....	5
A. General.....	5
B. Específicos.....	5
V. Marco teórico.....	6
A. Café en Guatemala.....	6
B. Taxonomía del café.....	6
C. Descripción del fruto del café.....	6
D. Subproductos del café.....	7
E. Composición química de la pulpa de café.....	7
F. Usos el café en la industria.....	8
G. Ácidos clorogénicos.....	8
H. Ácido 5-cafeoilquínico.....	9
I. Adsorción.....	9
J. Adsorción de gases.....	10
K. Adsorción de líquidos.....	10
L. Tipos de adsorción.....	11
M. Naturaleza de los adsorbentes.....	11
N. Selección de adsorbente.....	12
O. Carbón activado.....	14
P. Carbón adsorbente de gases.....	15
Q. Carbones decolorantes.....	15
R. Carbón de hueso.....	16

S.	Operación de adsorción por etapas	17
T.	Adsorción en una sola etapa	18
U.	Adsorción a corriente cruzada.....	20
V.	Adsorción a contracorriente en varias etapas	21
W.	Tanques con agitación para contacto líquido-sólido	24
VI.	Metodología	26
VII.	Resultados	30
VIII.	Discusión	39
IX.	Conclusiones.....	45
X.	Recomendaciones	46
XI.	Referencias.....	47
XII.	Anexos	52
A.	Datos originales.....	52
B.	Datos calculados.....	58
C.	Cálculos	63
D.	Análisis de error	74
XIII.	Información adicional	75

LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1. Principales materias primas y tecnologías para la fabricación de carbones activados y sus propiedades	16
Cuadro 2. Caracterización de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C.....	31
Cuadro 3. Rendimiento de ácido 5–cafeoilquínico, obtenido a partir de adsorción con carbón activado y extracción líquido-líquido con solventes.....	31
Cuadro 4. Costo de aislamiento a escala laboratorio de ácido 5–cafeoilquínico, obtenido a partir de adsorción con carbón activado y extracción líquido-líquido con solventes	31
Cuadro 5. Evaluación de fuentes bibliográficas de estudios experimentales sobre los beneficios del ácido 5-cafeoilquínico para determinación del nicho de mercado	37
Cuadro 6. Volumen y peso de solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C para determinación de su densidad	52
Cuadro 7. Volumen y peso de carbón activado utilizado para el proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico para determinación de su densidad aparente	52
Cuadro 8. pH de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C	52
Cuadro 9. Tiempo de flujo de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C en viscosímetro de Ostwald	53
Cuadro 10. Tiempo de flujo de la solución de carbón activado y extracto de ácido 5-cafeoilquínico a 60°C en viscosímetro de Ostwald	53
Cuadro 11. Peso de producto obtenido a partir de la extracción líquido – líquido con acetato	53
Cuadro 12. Peso de producto obtenido a partir de la adsorción en carbón activado.....	53
Cuadro 13. Concentración inicial de ácido 5–cafeoilquínico en la solución obtenida a partir del proceso de extracción con agua a 60°C	54
Cuadro 14. Concentración de ácido 5–cafeoilquínico en solvente tras extracción líquido – líquido con acetato de etilo.....	54
Cuadro 15. Concentración de ácido 5–cafeoilquínico presente en solución de etano,l utilizada para la desorción del compuesto de interés en el método de aislamiento y purificación a partir de carbón activado	54

Cuadro 16. Datos experimentales de equilibrio a 60°C de la concentración de ácido 5-cafeoilquínico en solución de etanol al 96% v/v utilizando distintas concentraciones de carbón activado.....	55
Cuadro 17. Concentración de cafeína presente en la solución de etanol utilizada para la desorción de ácido 5-cafeoilquínico del carbón activado a 25°C	55
Cuadro 18. Datos experimentales a 25°C de la solución de etanol utilizada para la desorción de ácido 5-cafeoilquínico del carbón activado.....	56
Cuadro 19. Datos de la tubería seleccionada y características del flujo en las diferentes líneas de transporte de fluidos.....	57
Cuadro 20. Densidad de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C.....	58
Cuadro 21. Densidad aparente del carbón activado utilizado para el proceso de aislamiento y purificación	58
Cuadro 22. Viscosidad de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C.....	58
Cuadro 23. Viscosidad de la solución de carbón activado y extracto de ácido 5-cafeoilquínico a 60°C en viscosímetro de Ostwald	59
Cuadro 24. Capacidad de adsorción del carbón activado determinada a partir de los datos en el equilibrio a 60°C	59
Cuadro 25. Razón de desorción de ácido 5-cafeoilquínico con solución de etanol a distintas concentraciones a 25°C.....	59
Cuadro 26. Razón de desorción de cafeína con solución de etanol a distintas concentraciones a 25°C	60
Cuadro 27. Rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico, obtenido a partir de extracción líquido – líquido con acetato de etilo	60
Cuadro 28. Rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico, obtenido a partir de aislamiento con carbón activado.....	60
Cuadro 29. Parámetros de dimensionamiento de bombas de los distintos flujos volumétricos involucrados en el proceso.....	61
Cuadro 30. Flujo de calor en el proceso propuesto.....	62

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación taxonómica del cultivo de café	6
Figura 2. Estructura del ácido 5-cafeoilquínico	9
Figura 3. Propiedades físicas de los adsorbentes	13
Figura 4. Filtros piloto en columnas con distintos tipos de carbón activado	15
Figura 5. Ejemplo equipo utilizado para proceso de adsorción por etapas	17
Figura 6. Adsorción en una sola etapa	18
Figura 7. Adsorción en una sola etapa, curvas en el equilibrio de Freudlich.....	19
Figura 8. Adsorción a corriente cruzada en dos etapas	21
Figura 9. Relación para n en una operación a corriente cruzada	21
Figura 10. Adsorción a contracorriente en varias etapas	22
Figura 11. Línea de operación y relación de adsorbente mínimo/disolvente para etapas infinitas	23
Figura 12. Relación para n en una operación a contracorriente en dos etapas.....	23
Figura 13. Turbinas utilizadas en tanques de agitación, de hoja plana con o sin disco	24
Figura 14. Diámetros recomendados de turbina para la suspensión de sólidos en líquidos de viscosidad similar a la del agua	25
Figura 15. Diagrama de bloques y balance de masa del proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico propuesto.....	30
Figura 16. Esquema de flujo del proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico propuesto.....	32
Figura 17. Ficha técnica del tanque de mezcla solución con extracto de ácido 5-cafeoilquínico y carbón activado	33
Figura 18. Ficha técnica del filtro Nutsche para solución con extracto de ácido 5-cafeoilquínico y carbón activado	34
Figura 19. Ficha técnica del evaporador para solución etanol 96% (v/v)	35
Figura 20. Ficha técnica de secadora <i>spray</i>	36
Figura 21. Ecuación básica de densidad	63
Figura 22. Ecuación básica de viscosidad.....	64

Figura 23. Ecuación de capacidad de adsorción	64
Figura 24. Ecuación de flujo másico libre de soluto.....	65
Figura 25. Datos en el equilibrio de adsorción de ácido 5-cafeoilquínico en escala logarítmica ..	65
Figura 26. Curva de equilibrio (azul) y operación (verde) para la adsorción de ácido 5-cafeoilquínico.....	66
Figura 27. Ecuación de Freundlich	66
Figura 28. Diagrama de proceso de adsorción contracorriente para una etapa.....	66
Figura 29. Balance de masa de la etapa de adsorción	67
Figura 30. Ecuación de la razón de desorción	67
Figura 31. Ecuación del flujo de calor	69
Figura 32. Ecuación básica calor específico del etanol	69
Figura 33. Ecuación del flujo másico de vapor.....	70
Figura 34. Ecuación del flujo másico de nitrógeno	70
Figura 35. Ecuación del Número de Reynolds	70
Figura 36. Ecuación de la rugosidad relativa.....	71
Figura 37. Ecuación del largo asociado de los accesorios	71
Figura 38. Ecuación del largo asociado de los accesorios	71
Figura 39. Ecuación de caída de presión en tuberías de acero estándar	72
Figura 40. Ecuación cambio de altura en tanque	73
Figura 41. Ecuación cambio de presión en tanque.....	73
Figura 42. Ecuación determinación cabeza total de bomba.....	73
Figura 43. Ecuación para el escalamiento de la tasa de filtración	74
Figura 44. Ecuación de la media aritmética.....	74
Figura 45. Ecuación de la desviación estándar	74
Figura 46. Resultado de la prueba cualitativa de cloruro férrico	75
Figura 47. Relaciones entre el tamaño de la tubería, la velocidad volumétrica del flujo y la velocidad del fluido.....	76
Figura 48. Factor de fricción para tuberías circulares.....	77
Figura 49. Pérdida de presión en accesorios de tuberías y válvulas en flujos turbulentos.....	78
Figura 50. Curvas características utilizadas para determinar la potencia de los sistemas de bombeo	79
Figura 51. Curvas características utilizadas para determinar la potencia de los sistemas de bombeo	80
Figura 52. Curva de calibración de cafeína determinada con equipo HPLC	81

Figura 53. Curva de calibración del ácido 5-cafeoilquínico determinada con equipo HPLC..... 81

Figura 54. Información técnica del equipo de filtración y secado por agitación Nutsche 81

RESUMEN

Se seleccionaron los equipos necesarios para el aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico proveniente de una extracción con agua a 60°C de pulpa de café. La solución proveniente de la extracción fue caracterizada mediante sus propiedades fisicoquímicas: su densidad fue de 0.969 ± 0.004 g/ml con una viscosidad de 1.32 ± 0.02 cp, un pH de 6.54 ± 0.04 y una concentración de ácido 5-cafeoilquínico de 578.925 ± 23.428 g/ml. Para el aislamiento de ácido 5-cafeoilquínico, se evaluaron dos métodos a escala laboratorio. El primero fue mediante extracción líquido – líquido con cloruro de metileno y acetato de etilo, con un rendimiento de $0.219 \pm 0.008\%$ (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa). En el segundo método, se evaluó la adsorción mediante carbón activado y posterior desorción con etanol, en el cual se determinó un rendimiento de $0.242 \pm 0.005\%$ (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa). Se identificó que no había una diferencia significativa ($\alpha = 0.05$) con relación al rendimiento obtenido, por lo que se propuso el proceso a escala piloto de la adsorción de ácido 5-cafeoilquínico con carbón activado que evita el uso de disolventes tóxicos. Se pudieron establecer las operaciones unitarias: adsorción en tanque agitado, filtración y desorción en filtro de *Nutsche*, evaporación de lámina ascendente y secado en *spray*, considerando los parámetros determinados experimentalmente y el balance de masa correspondiente en los equipos. Así mismo se identificaron las principales aplicaciones que podría tener el producto obtenido, siendo su principal nicho de mercado la medicina nutracéutica.

ABSTRACT

The required equipment was selected for the isolation and purification of 5-caffeoylquinic acid from a 60°C water extraction of coffee pulp. The solution from the extraction was characterized by its physicochemical properties: its density was 0.969 ± 0.004 g/ml with a viscosity of 1.32 ± 0.02 cp, a pH of 6.54 ± 0.04 , and a concentration of 5-caffeoylquinic acid of 578.925 ± 23.428 g/ml. For the isolation of 5-caffeoylquinic acid, two laboratory-scale methods were evaluated. The first method involved liquid-liquid extraction with methylene chloride and ethyl acetate, achieving a yield of $0.219 \pm 0.008\%$ (g 5-caffeoylquinic acid/g pulp). In the second method, adsorption with activated carbon followed by desorption with ethanol was evaluated, determining a yield of $0.242 \pm 0.005\%$ (g 5-caffeoylquinic acid/g pulp). It was identified that there was no significant difference ($\alpha = 0.05$) regarding the yield obtained, so the pilot-scale process of 5-caffeoylquinic acid adsorption with activated carbon was proposed, avoiding the use of toxic solvents. The unit operations were established considering the determined parameters and the corresponding mass balance in the equipment: adsorption in a stirred tank, filtration and desorption in a Nutsche filter, rising film evaporation, and spray drying. Additionally, the main applications of the obtained product were identified, with its primary market niche being nutraceutical medicine.

I. INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista económico, el café ha sido uno de los cultivos más rentables en varios países de América Latina y alrededor del mundo. Sin embargo, la obtención del grano comercial representa la generación de subproductos entre los cuales se encuentra la pulpa (29% del peso del fruto entero). A pesar de que se ha dado un aumento en la productividad, la atención que se presta a la generación de subproductos aún es bastante limitada (Bresciani et al, 2014).

En los últimos años, se han presentado varios estudios para aprovechar los subproductos del café, entre estos, la melaza a partir de hidrólisis, vitaminas como la niacina, gas biológico, fertilizante orgánico y compuestos como la cafeína y los ácidos clorogénicos (Bresciani et al, 2014), siendo esta última el principal enfoque de investigación en este trabajo. Los ácidos clorogénicos están formados a partir de la esterificación de ácido quínico con ácido cafeico, ferúlico o p-cumárico (Alton, 1998). Estos compuestos fenólicos son producidos por varios organismos en la naturaleza y poseen propiedades antioxidantes. Los granos de café tienen importantes cantidades de compuestos fenólicos, que influyen sobre su sabor y aroma (Tfouni, 2013). El ácido clorogénico que se encuentra de forma más común es el ácido 5-cafeoilquínico, el cual presenta beneficios de forma potencial debido a su capacidad hipoglicemiante, antiviral, hepatoprotectora y nutracéutica (Somporn et al., 2011).

Los ácidos clorogénicos no se encuentran únicamente en el grano de café, pueden encontrarse en residuos generados a partir del procesamiento de este, como la pulpa fresca que contiene ácido 5-cafeoilquínico, llegando a alcanzar el 42.2% del total de compuestos fenólicos que se han identificado en este sustrato (Bresciani et al, 2014; Ramírez-Martínez, 1988).

De forma general, la mayor parte de los métodos de extracción y purificación de ácidos clorogénicos emplean solventes orgánicos contaminantes, por lo que, en el presente trabajo, se lleva a cabo la comparación a escala laboratorio de un método convencional con un método más amigable con el ambiente. También, se proponen los equipos y el proceso a nivel planta piloto para el aislamiento y purificación del ácido 5-cafeoilquínico.

II. ANTECEDENTES

En el Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, se han realizado estudios previos referentes al aprovechamiento de la pulpa del café para la obtención de ácidos clorogénicos. Entre ellos, se puede mencionar el estudio realizado en 2021 titulado “Extracción de ácido clorogénico a escala laboratorio a partir de pulpa de café para evaluar una alternativa de aprovechamiento” (Garzaro, 2021), que se enfoca en la extracción de este compuesto en solución a escala laboratorio por medio de solventes. Se evalúa como fase previa al trabajo presentado que tiene la finalidad de aislar y purificar el ácido 5-cafeoilquínico de esta solución.

III. JUSTIFICACIÓN

Se tiene un interés creciente a nivel mundial en las investigaciones de los subproductos generados durante el procesamiento del grano de café, considerados generalmente desechos, estos poseen diferentes compuestos fenólicos que pueden tener diversas aplicaciones, uno de los más importantes son los conjugados de ácido quínico conocidos como ácidos clorogénicos (Alton, 1998).

En Guatemala el café se encuentra entre los 10 productos más exportados y a nivel mundial el país ocupa el puesto #14 entre los principales exportadores de café. En los últimos cinco años se estima que se han vendido al exterior un total de US\$ 3.4 mil millones de dólares con un total de 21 millones de dólares exportados (MINECO, 2019). Cuando se procede al cultivo de esta planta se aprovecha aproximadamente solo el 5% del peso del fruto fresco, siendo el 95% residuos sólidos entre los cuáles se encuentra la pulpa, el mucílago, el cisco, las pasillas, la borra y los tallos de café (Rodríguez, et al., 2013).

Por tal motivo se han llevado a cabo varias investigaciones sobre el aprovechamiento de estos subproductos, siendo una de las más relevantes la extracción y purificación de ácidos clorogénicos que, a pesar de no solucionar directamente el problema de la generación de residuos sólidos, permite obtener beneficios económicos a partir de estos. La purificación del ácido 5-cafeoilquínico es crucial por varias razones, facilita su estudio en investigación biomédica, permitiendo una comprensión más profunda de sus mecanismos de acción y sus potenciales aplicaciones. Además, es fundamental para su utilización en la industria farmacéutica, donde podría ser empleado en el desarrollo de nuevos fármacos con propiedades antioxidantes y antiinflamatorias (Rodríguez, et al., 2013). La mayoría de los métodos de purificación de ácidos clorogénicos utilizan solventes orgánicos contaminantes como el metanol, por lo que la adsorción a escala laboratorio puede ser una técnica más respetuosa con el medio permitiendo la separación evitando el uso de disolventes tóxicos, siendo el carbón activado uno de los medios adsorbentes más comunes para separar compuestos fenólicos, por lo que se evaluará su viabilidad para separar ácido 5-cafeoilquínico.

En Guatemala no se cuenta con suficiente información técnica acerca del proceso de aislamiento de ácidos clorogénicos, específicamente ácido 5-cafeoilquínico por lo que su tratamiento con carbón activado puede ser una opción viable. Se pretende evaluar el proceso de adsorción de ácido 5-cafeoilquínico proveniente de subproductos del café, específicamente la pulpa, para analizar el proceso y evaluar su potencial uso en la industria.

Es importante mencionar que la magnitud del mercado global de medicina complementaria y alternativa se valoró en \$82.27 mil millones en el año 2020 y se espera que se expanda a una tasa de crecimiento anual compuesta del 22.03% de 2021 a 2028. Siendo los productos botánicos las medicinas alternativas más utilizadas tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados, en forma de suplementos dietéticos y alimenticios, medicamentos homeopáticos y otros productos naturales (Grand view research, 2021).

IV. OBJETIVOS

A. General

Proponer el proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico a escala laboratorio para aprovechamiento en la industria.

B. Específicos

1. Caracterizar el extracto obtenido a partir de la pulpa de café para determinar propiedades fisicoquímicas de interés para el dimensionamiento del proceso.
2. Comparar dos métodos de aislamiento de ácido 5-cafeoilquínico, a nivel laboratorio, utilizando pulpa de café para determinar cuál posee un mayor rendimiento.
3. Proponer los equipos del aislamiento y purificación del ácido 5-cafeoilquínico, realizando los balances de masa correspondientes.
4. Evaluar las propuestas del uso del ácido 5-cafeoilquínico para encontrar un nicho de mercado.

V. MARCO TEÓRICO

A. Café en Guatemala

El café fue introducido a Guatemala en el año 1760 por sacerdotes pertenecientes a la Orden Jesuita, los primeros registros de plantaciones de este como cultivo datan del año 1800, en las orillas de la ciudad de Guatemala. Sin embargo, hasta el año 1871 su cultivo fue considerado de importancia para la economía del país, teniendo fines lucrativos constituyendo uno de los principales productos de exportación (ANACAFE, 2006).

B. Taxonomía del café

Se estima que existen más de 100 especies de café, las cuales pertenecen al género *Coffea*. Se observa en la Figura 1 con mayor detalle la clasificación taxonómica del cultivo de café. Solamente tres de estas especies se cultivan con fines comerciales, siendo estas *Coffea arábica* L., *Coffea canephora* y *Coffea liberica* (Lacayo, 2013).

Figura 1. *Clasificación taxonómica del cultivo de café*

Taxonomía	Nombre
Reino	<i>Plantae</i>
División	<i>Magnoliophyta</i>
Sub división	<i>Angiospermae</i>
Clase	<i>Magnoliales</i>
Sub clase	<i>Asteridae</i>
Orden	<i>Rubiales</i>
Familia	<i>Rubiaceae</i>
Genero	<i>Coffea</i>

(Lacayo, 2013)

C. Descripción del fruto del café

El fruto de café es cosechado en Centroamérica desde finales del mes de agosto hasta marzo, dependiendo de la altitud de la plantación con relación al nivel del mar. El fruto se caracteriza por ser de superficie lisa, brillante y de pulpa delgada, está compuesto de tres partes principales que son el epicarpio, mesocarpio y el endospermo. Cuando está madura puede ser color amarillo o rojo (Velásquez, 2017).

D. Subproductos del café

En el proceso del café se estima que aproximadamente menos del 5% de la materia vegetal generada se aprovecha en la elaboración de la bebida, el resto forma parte de los residuos (Rodríguez, et al., 2013).

El material fibroso restante está compuesto por hojas, ramas, y tallos que se generan en el proceso de renovación de los cafetales; frutos verdes que caen de la recolección o que son retirados de la masa de café recolectado; pulpa y mucílago generados en el proceso de beneficio del fruto; cascarilla producida en la etapa de trilla, y borra o ripio que es generado en las fábricas de café soluble y al preparar la bebida a partir del grano tostado y molido (Rodríguez, et al., 2013).

Todo este material al no ser manejado de forma apropiada se convierte en una fuente de contaminación de recursos naturales presentes en la zona cafetera (Rodríguez, et al., 2013).

Entre las principales propuestas actuales para el manejo inteligente del agua y de los subproductos del café en el proceso de beneficio húmedo, se encuentra la adopción del despulpado en seco y el respectivo transporte de la pulpa sin agua. Esto genera un gran impacto ya que una gran cantidad de compuestos orgánicos de baja biodegradabilidad se solubilizan en el agua al entrar en contacto con la pulpa, que es responsable de tres cuartas partes de la contaminación potencial que se puede generar en un beneficio (Rodríguez, et al., 2013).

Así mismo se ha adoptado la transformación de pulpa en abono orgánico mediante compostaje o lombricompostaje techado. Se considera una práctica bastante sencilla para el aprovechamiento eficiente de este subproducto, dado que se acelera el proceso de transformación, se disminuye la mano de obra y se mejoran los rendimientos del abono orgánico que se obtiene (Rodríguez, et al., 2013).

E. Composición química de la pulpa de café

Entre los compuestos orgánicos de interés que se encuentran en la pulpa de café se encuentran los taninos, azúcares reductores, azúcares no reductores, cafeína, ácido clorogénico y ácido cafeico total. Estas sustancias son de interés con respecto a su potencial uso como materia prima para fines industriales, así como para la formulación de dietas para animales (Bressani, 1972).

Se estima que el contenido porcentual de estos compuestos en la pulpa de café en base seca oscila entre 1.8 – 8.56% para taninos, 6.5% de sustancias pécticas totales, 12.4% de azúcares reductores, 2.0 % azúcares no reductores, 1.3% de cafeína, 2.6% de ácido clorogénico y 1.6% de ácido cafeico total (Bressani, 1972).

F. Usos el café en la industria

Del grano de café se obtiene una de las bebidas más populares en todo el mundo, siendo la bebida más consumida luego del agua (Daglia et al., 2000). Las exportaciones en los primeros 4 meses del año cafetero 2019 – 2020, alcanzan los 39.53 millones de sacos. En los doce meses que terminaron en enero de 2020, las exportaciones de Arábica totalizaron 82.88 millones de sacos en comparación con 78.26 millones de sacos el año pasado; mientras que las exportaciones de Robusta ascendieron a 46,65 millones de sacos en comparación con 45,2 millones de sacos (International Coffee Organization, 2020).

En el año 2018 los alimentos y bebidas abarcaron el segmento más grande con respecto a la utilización de los granos de café, representando más del 70.0% de participación. Estos se utilizan en pasteles, galletas, magdalenas, etc. Además, se espera un aumento del consumo de bebidas con sabor a café y helados que alimentaria la demanda de estos granos (International Coffee Organization, 2020).

El aumento de la conciencia relacionada con los beneficios del café para la salud es un factor clave que ha impulsado el segmento de la industria farmacéutica. Por ejemplo, los granos de café verde se consumen para reducir el peso y mejorar el metabolismo. Los granos arábica y robusta se usan en diferentes medicamentos y alimentos funcionales debido a su alto contenido de antioxidantes (International Coffee Organization, 2020).

Se espera que el segmento de cosméticos sea testigo de un crecimiento en los próximos años debido al uso cada vez mayor de granos de café en diferentes productos de cuidado personal, como enjuagues faciales, exfoliantes y lápices labiales. El extracto de café proporciona un efecto hidratante prolongado y ayuda a eliminar el bronceado (International Coffee Organization, 2020).

G. Ácidos clorogénicos

Los ácidos clorogénicos comprenden varios ácidos hidroxicinámicos (cafeico, ferúlico, cumárico, sinápico) esterificados con el ácido quínico. Estos compuestos fenólicos constituyen metabolitos secundarios de las plantas, y se encuentran en las paredes celulares, esterificados a los polisacáridos; estos se biosintetizan a partir de la fenilamina, y son precursores de la lignina, influyendo en la textura y plasticidad de las plantas. En la dieta humana, café, frutas, hierbas, té y hortalizas son las principales fuentes de ácidos clorogénicos (Clifford, 1999).

Los ácidos clorogénicos fueron aislados del café en el siglo XIX. El nombre es proveniente del pigmento verde que se forma por su reacción entre el ácido cafeico con el cloruro férrico y así

mismo por la coloración de los precipitados de ácidos clorogénicos del café, formados en varias reacciones de oxidación.

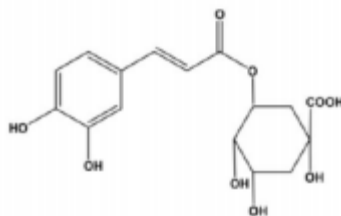
En los últimos años se han realizados varias investigaciones sobre estos ácidos, para determinar su función y contenido en distintos vegetales y en el café; se ha desarrollado la nomenclatura de acuerdo con la International Union of Pure and Applied Chemistry para nombrarlos (Clifford, 1999).

Los ácidos clorogénicos se encuentran en los granos de café mayoritariamente como mono y diésteres, y representan más de 40 ácidos, en grupos de isómeros, con sustituciones en las posiciones 1, 3, 4 o 5, del ácido quínico. Además, han sido determinados en las hojas y en la pulpa del café (Clifford, 1999).

H. Ácido 5-cafeoilquínico

Este ácido ha sido objeto de varias investigaciones, ya que es potencialmente de beneficio para el ser humano, debido a su capacidad antioxidante, hipoglicemiante, antiviral, hepatoprotectora y nutracéutico (Somporn, et al., 2011). Se estima que en la pulpa fresca de café llega a constituir hasta el 42.2% del total de los compuestos fenólicos que se identifican en este sustrato (Ramirez-Martinez, 1988).

Figura 2. Estructura del ácido 5-cafeoilquínico



(Stalikas, 2007)

I. Adsorción

La adsorción implica la acumulación de moléculas de soluto en una interfase. En este caso se consideran las interfases gas-sólido y líquido-sólido con un soluto distribuido selectivamente entre el fluido y la fase sólida (Perry, 1984).

La adsorción física se basa en tres mecanismos de separación:

- a. Estérica: El sólido posee poros con dimensiones que permiten la entrada de moléculas pequeñas mientras desplazan moléculas más grandes. Esto ocurre en zeolitas.
- b. Equilibrio
- c. Cinética: por la rapidez de difusión en los poros. Ejemplo es el tamiz molecular de carbono (Perry, 1984).

J. Adsorción de gases

En las separaciones gaseosas, la adsorción se utiliza para deshumidificar aire y otros gases, eliminar olores e impurezas desagradables de gases industriales como CO₂, para recuperar vapores valiosos de disolvente a partir de mezclas diluidas con aire y otros gases para fraccionar mezclas de gases de hidrocarburos que contienen sustancias como metano, etileno, etano, propileno y propano (Treybal, 1988).

Es una de las aplicaciones más importantes de los adsorbentes de lecho fijo. Los sólidos saturados con disolventes como alcohol, acetona, disulfuro de carbono y benceno pueden secarse por evaporación del disolvente en una corriente de aire. Este es recuperado pasando la mezcla de vapor-gas resultante a través de carbón activado (Treybal, 1988).

En muchas plantas de adsorción es necesario operar con pequeña caída de presión a través del lecho de adsorbente con el fin de mantener bajos los costos de potencia. Por lo que se utilizan absorbentes granulares y no en polvo. Las profundidades de los lechos son relativamente pequeñas entre 0.3 a 1 metro y de sección transversal grande (Treybal, 1988).

K. Adsorción de líquidos

La separación de líquidos incluye la eliminación de humedad disuelta en gasolina, decoloración de productos petróleo y soluciones acuosas de azúcar, eliminación de sabor y olor desagradables de agua y el fraccionamiento de mezclas de hidrocarburo aromáticos y parafínicos. Las plantas industriales pueden llegar a exceder los 135,000 kg de adsorbente (Treybal, 1988).

En muchas operaciones de tratamiento de líquidos se utilizan métodos por semilotes y mediante lechos estacionarios. En estos casos, el adsorbente se llama filtro y puede instalarse en un tanque cilíndrico vertical que tenga fondo cónico o de plato. Con un diámetro de 4.5 metros y altura de 10 metros. En el caso de las arcillas decolorantes pueden contener hasta 50,000 kg de adsorbente. El absorbente granular se coloca sobre una sábana sobre un plato perforado (Treybal, 1988).

Al reactivar el sólido, se detiene el flujo del líquido y se drena en el filtro. Entonces se lava con el disolvente adecuado en el mismo lugar. En el caso de los filtros de refinación de azúcar se utiliza agua y nafta para los productos de petróleo. También puede ser extraído del filtro y reactivado por combustión o mediante otro procedimiento según la naturaleza (Treybal, 1988).

L. Tipos de adsorción

La acumulación por unidad de superficie es pequeña, por lo que se prefieren sólidos porosos con un área interna grande por unidad de volumen. Se puede promover dos tipos de adsorciones (Perry, 1984):

1. Adsorción física

Que involucra fuerzas de Van der Waals, el adsorbente se puede regenerar. Es el resultado de las fuerzas intermoleculares de atracción entre las moléculas del sólido y la sustancia adsorbida (Treybal, 1988).

En el caso de un sólido y un gas, al ocurrir la condensación se desprende cierta cantidad de calor, que generalmente es mayor al calor latente de evaporación y parecida al calor de sublimación del gas. La sustancia adsorbida permanece sobre la superficie sin disolverse en ella. Solo si el sólido es muy poroso y contiene muchos capilares, la sustancia penetra estos intersticios (Treybal, 1988).

Las operaciones industriales de este tipo dependen de su reversibilidad para recuperar el adsorbente, para la recuperación de la sustancia adsorbida o para el fraccionamiento de mezclas (Treybal, 1988).

2. Adsorción activada o quemisorción

Que involucra enlaces químicas o disociación como en la catálisis. Es el resultado de la interacción química entre el sólido y la sustancia adsorbida. La fuerza de unión puede variar considerablemente. La fuerza de adhesión es mayor que la de la adsorción física (Treybal, 1988).

El calor liberado durante la quemisorción es grande, parecido al calor de una reacción química. y el proceso es normalmente irreversible (Treybal, 1988).

M. Naturaleza de los adsorbentes

Pueden ser naturales o sintéticos de estructuras amorfas o cristalinas. Los más utilizados en las grandes industrias son (Perry, 1984):

- a. Carbón activado
- b. Tamices moleculares
- c. Sílica gel
- d. Alúmina activada

Por lo general se utilizan en forma granular. Varían de tamaño desde 12 mm de diámetro hasta 50 μ . Según la IUPAC (International Unit of Pure and Applied Chemistry) se puede clasificar a los poros por su diámetro (Perry, 1984):

Microporos $d < 2$ nm

Mesoporos $2 < d < 50$ nm

Macroporos $d > 50$ nm

Industrialmente se pueden clasificar en:

- a. Carbones: su activación se da al eliminar de sus poros la materia adsorbida durante la carbonización.
- b. Tierras: bentonitas, montmorillonitas, tierras arcillosas, bauxitas, magnesia.
- c. Geles inorgánicos: sílice, alúmina y otros (Perry, 1984).

N. Selección de adsorbente

La selección del adsorbente debe ser en función de sus propiedades en el equilibrio. Como su capacidad y selectividad en función de la temperatura y concentración del componente. Para no utilizar una gran cantidad de sólido ni necesitar mucho tiempo de residencia. Su capacidad de regeneración y su costo (Perry, 1984).

Si se utilizan en lecho fijo a través del cual fluye un líquido o un gas, no deben tener una gran caída de presión del flujo. Ni deben ser arrastrados con facilidad por la corriente que fluye. Deben ser resistentes e indeformables para tener adecuada consistencia para no reducir su tamaño o que no se rompan al soportar su mismo peso. Sí se van a sacar y meter con frecuencia de los recipientes que los contiene, deben fluir libremente. También se debe tomar en cuenta su densidad y punto de fusión. Químicamente resistir los adsorbatos y agentes regenerantes (Perry, 1984).

Aparte de su identidad química, influye el método de su fabricación y sus antecedentes de adsorción y desorción. Es esencial una gran superficie por unidad de peso para todos los

adsorbentes o un volumen de microporo relativamente alto. Y tener una red de poros grande ya que su gran número proporciona una gran superficie de adsorción (Perry, 1984).

Entre los factores que afectan la adsorción están las propiedades de textura del adsorbente como:

- a. Área específica: área interna de los poros y área externa de las partículas del adsorbente por unidad de masa.
- b. Diámetro promedio de los poros.
- c. Volumen de los poros.
- d. Carga de la superficie.
- e. Tipo de sitios activos.
- f. Composición química del adsorbente (Perry, 1984).

Las propiedades de textura: área, diámetro y volumen, se determinan por medio de un equipo de fisisorción de nitrógeno líquido y usando varios métodos para interpretar los datos de fisisorción entre ellos el método BET (Perry, 1984).

Su estructura porosa depende del precursor o materia prima, así como el procedimiento de preparación y activación. En la Figura 3 se muestran las propiedades de varios adsorbentes, que varían de un uno a otro.

Figura 3. Propiedades físicas de los adsorbentes

Material and uses	Shape* of particles	Size range, U.S. standard mesh†	Internal porosity, %	Bulk dry density, kg/L	Average pore diameter, nm	Surface area, km ² /kg	Sorptive capacity, kg/kg (dry)
Aluminas							
Low-porosity (fluoride sorbent)	G, S	8-14, etc.	40	0.70	-7	0.32	0.20
High-porosity (drying, separations)	G	Various	57	0.85	4-14	0.25-0.36	0.25-0.33
Desiccant, CaCl ₂ -coated	G	3-8, etc.	30	0.91	4.5	0.2	0.22
Activated hauxite	G	8-20, etc.	35	0.85	5		0.1-0.2
Chromatographic alumina	G, P, S	80-200, etc.	30	0.93			-0.14
Silicates and aluminosilicates							
Molecular sieves							
Type 3A (dehydration)	S, C, P	Various	-30	0.62-0.68	0.3	-0.7	0.21-0.23
Type 4A (dehydration)			-32	0.61-0.67	0.4	-0.7	0.22-0.26
Type 5A (separations)			-34	0.60-0.66	0.5	-0.7	0.23-0.28
Type 13X (purification)			-38	0.58-0.64	1.0	-0.6	0.25-0.36
Silicalite (hydrocarbons)	S, C, P	Various		0.64-0.70	0.6	-0.4	0.12-0.16
Dealuminated Y (hydrocarbons)	S, C, P	Various		0.48-0.53	0.8	0.5-0.8	0.28-0.42
Mordenite (acid drying)				0.88	0.3-0.8		0.12
Chabazite (acid drying)				0.72	0.4-0.5		0.20
Silica gel (drying, separations)	G, P	Various	38-48	0.70-0.82	2-5	0.6-0.8	0.35-0.50
Magnesium silicate (decolorizing)	G, P	Various	-33	-0.50		0.18-0.30	
Calcium silicate (fatty-acid removal)	P		75-80	-0.20		-0.1	
Clay, acid-treated (refining of petroleum, food products)	G	4-8		0.85			
Fuller's earth (same)	G, P	<200		0.80			
Diatomaceous earth	G	Various		0.44-0.50		-0.002	
Carbons							
Shell-based	G	Various	60	0.45-0.55	2	0.8-1.6	0.40
Wood-based	G	Various	-80	0.25-0.30		0.8-1.8	-0.70
Petroleum-based	G, C	Various	-80	0.45-0.55	2	0.9-1.3	0.3-0.4
Peat-based	G, C, P	Various	-55	0.30-0.50	1-4	0.8-1.6	0.5
Lignite-based	G, P	Various	70-85	0.40-0.70	3	0.4-0.7	0.3
Bituminous-coal-based	G, P	8-30, 12-40	60-80	0.40-0.60	2-4	0.9-1.2	0.4
Synthetic polymer based (pyrolyzed)	S	20-100	40-70	0.49-0.60		0.1-1.1	
Carbon molecular sieve (air separation)		Various	35-50	0.5-0.7	0.3-0.6		0.5-0.20

(Perry, 1984)

O. Carbón activado

Se refiere a una serie de carbones porosos preparados artificialmente a partir de carbonización para elevar su grado de porosidad y tener una alta superficie interna (Luna et al., 2007). Es muy versátil ya que el tamaño y distribución de poros puede ser controlado para las necesidades industriales. Se obtienen a partir materiales con alto contenido de carbono como materiales orgánicos entre ellos madera, huesos, semillas, cáscara de arroz, aserrín, cáscara de coco y residuos de fruta. Como también carbón mineral, turba y coque. Tienen un alto costo que va desde \$1,200 hasta \$14,000 la tonelada (Luna et al., 2007).

Sus primeras aplicaciones fueron médicas y datan del año 1550 a.C. Sin embargo, industrialmente se utilizó por primera vez en 1794 como decolorante del azúcar. En 1854 un alcalde de Inglaterra ordena colocar en la ventilación de los drenajes. Von Raphael Ostrejko se considera el inventor del carbón activado ya que desarrolló varios métodos y en 1901 patentó varios métodos (Luna et al., 2007).

Sus aplicaciones son purificar el agua, desodorizar, adsorber gases, decolorar e ionizar. Es útil en industrias de minería, alimentos, cigarreras, farmacéuticas, fabricación de filtros, cosmética, entre otras. Se presenta en la Figura 4 una serie de filtros en columna a escala piloto con carbón activado (Luna et al., 2007).

La activación del carbón puede ser física (térmica) y química (deshidratación química). En la activación térmica, se parte de un material orgánico y se inicia con la carbonización a una temperatura baja que no favorezca la grafitación. El carbón resultante se somete a altas temperaturas de 1,000°C, en atmósfera inerte saturada con vapor de agua. El rendimiento es de 0.25 a 0.50 kg de carbón activado por kilo de carbón (Luna et al., 2007).

La activación química puede aplicarse a ciertos materiales orgánicos relativamente blancos y formados por celulosa como madera de pino. Primero, se deshidrata la materia prima con un agente reactivo como ácido fosfórico, cloruro de zinc o carbonato de potasio. Luego, se carboniza a baja temperatura entre 450° y 600°C, y se lava (Luna et al., 2007).

Figura 4. *Filtros piloto en columnas con distintos tipos de carbón activado*



(Luna et al., 2007)

P. Carbón adsorbente de gases

Se obtiene por carbonización de cáscaras de coco, semillas de fruta, carbón, lignita y madera. Debe ser activado por un proceso parcial de oxidación con tratamiento de aire o vapor caliente a altas temperaturas de 800°C. Se puede obtener microporoso con ultra microporos menores a 0.7 nm para aplicaciones en separación de gases. Si se activa a temperaturas de 450°C con agentes químicos como ácido fosfórico o cloruro de zinc, se obtienen poros más anchos con mesoporos mayores a 2 nm para aplicaciones en fase líquida (Luna et al., 2007).

Se utiliza para la recuperación de vapores de disolventes en mezclas gaseosas y máscaras de gas. Recuperación de hidrocarburos de la gasolina a partir de gas natural; y fraccionamiento de gases de hidrocarburos. Se puede revivir por evaporación del gas adsorbido (Luna et al., 2007).

Los de coco poseen ventajas sobre los carbones obtenidos de madera, ya que tiene mayor dureza y resistencia. Y el porcentaje de cenizas es menor comparado con los obtenidos con materiales inorgánicos (Luna et al., 2007).

Q. Carbones decolorantes

Se obtiene por medio de (Treybal, 1988):

1. Mezclas de materia vegetal con sustancias inorgánicas como cloruro de calcio, se carboniza y elimina por lixiviación la materia inorgánica.
2. Mezclas de materia orgánica, como aserrín, con sustancias porosas como piedra pómez, se calientan y carbonizan para depositar la materia carbónica en todas las partículas porosas.
3. Al carbonizar madera, aserrín y similares, y se activan con aire o vapor.

La lignita y carbón bituminoso también pueden emplearse. Se utilizan en la decoloración de soluciones de azúcar, sustancias químicas industriales, drogas y líquidos de limpieza en seco, purificación de agua, refinamiento de aceites vegetales y animales y para la recuperación de oro y plata de soluciones de cianuro (Treybal, 1988).

R. Carbón de hueso

Se obtiene por destilación destructiva de huesos pulverizados y secados a temperaturas entre 600 a 900°C. Se utilizan para el refinamiento de azúcar. Se pueden reutilizar luego de ser lavado y quemado (Treybal, 1988).

En el cuadro 1 se presenta un resumen de las principales materias primas y tecnologías para la fabricación de carbones activados y sus propiedades.

Cuadro 1. *Principales materias primas y tecnologías para la fabricación de carbones activados y sus propiedades*

Materia prima	Método de activación	Resistencia a la abrasión o erosión	Radio medio del poro	Radio de poro dominante
Madera de pino	Deshidratación química con ácido fosfórico o cloruro de zinc	30-50	200-2,000 nm	50-10,000 nm
Carbón mineral bituminoso	Térmica en atmósfera de vapor de agua o gases de combustión	70-85	1.4 nm	1-100 nm

(Luna et al., 2007)

Continuación Cuadro 1. Principales materias primas y tecnologías para la fabricación de carbones activados y sus propiedades

Materia prima	Método de activación	Resistencia a la abrasión o erosión	Radio medio del poro	Radio de poro dominante
Cáscara de coco	Térmica en atmósfera de vapor de agua o gases de combustión	90-99	0.8 nm	Menor a 10 nm

(Luna et al., 2007)

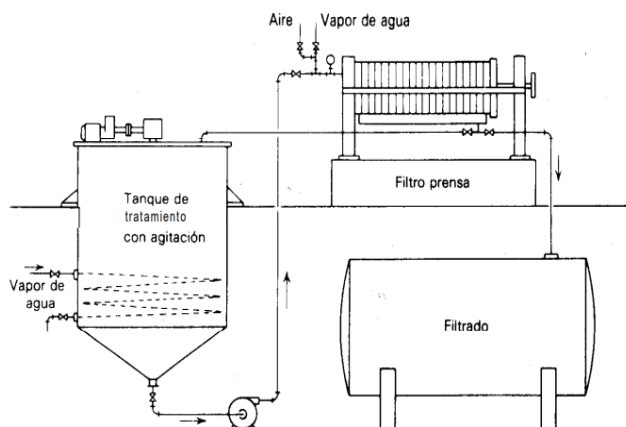
S. Operación de adsorción por etapas

La operación por etapas consiste en operaciones donde el soluto de las soluciones líquidas que se quiere separar se adsorbe más o menos fuertemente en comparación con el resto de la solución. Estas operaciones se tratan de operaciones tanto por lotes, semicontinuas o continuas (Treybal, 2007).

Las aplicaciones típicas del proceso incluyen:

1. La recuperación de solutos valiosos a partir de soluciones diluidas.
2. La eliminación de contaminantes indeseables de una solución (Treybal, 2007).

Figura 5. Ejemplo equipo utilizado para proceso de adsorción por etapas



(Treybal, 2007)

El equipo que se utiliza para aplicar la adsorción como una operación por etapas es variado, el que se muestra en la Figura 5 es característico de varias instalaciones operadas por lotes. El líquido para procesar y el adsorbente están mezclados íntimamente en el tanque de tratamiento a la temperatura deseada y durante el periodo requerido; después se filtra la fina colada para separar el adsorbente sólido y el adsorbato que acompaña el líquido. También es utilizada la agitación con aire, sobre todo en el caso de intercambio iónico. El equipo se adapta de forma fácil a la operación en varias etapas al colocar la cantidad de tanques y filtros que sea necesaria (Treybal, 2007).

T. Adsorción en una sola etapa

En esta, el círculo representa todo el equipo y los procedimientos que constituyen una sola etapa. La operación es básicamente análoga a la absorción de gases en una sola etapa. La solución que se va a tratar contiene cierta masa de sustancia no adsorbida o disolvente L_s y la concentración de soluto adsorbable se reduce de Y_0 a Y_1 (masa soluto/masa disolvente). El adsorbato S_s (masa sólido libre de adsorbato) se agrega y el contenido en soluto adsorbato aumenta de X_0 a X_1 (masa de soluto/masa de adsorbente). Si se utiliza adsorbente fresco X_0 es 0 (Treybal, 2007).

$$L_s(Y_0 - Y_1) = S_s(X_1 - X_0)$$

Figura 6. Adsorción en una sola etapa

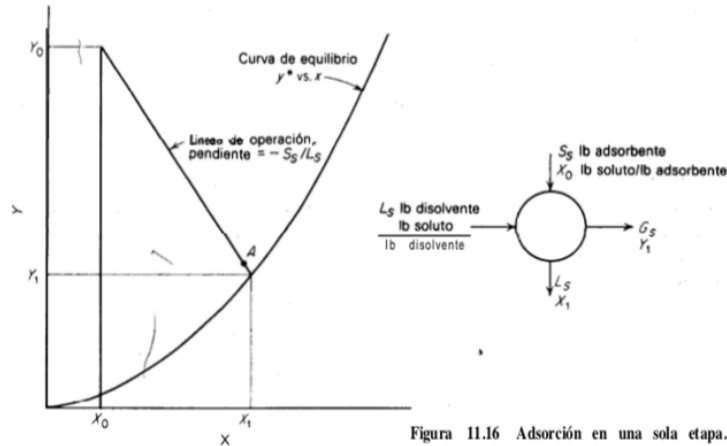


Figura 11.16 Adsorción en una sola etapa.

(Treybal, 2007)

Si la etapa es una sola teórica o ideal, como se aprecia en la Figura 6, las corrientes efluentes están en equilibrio, de forma que el punto cae sobre la isoterma de adsorción en el equilibrio. La curva en el equilibrio debe de ser la que se obtiene en la temperatura final de la operación. Sin embargo, si no se da el tiempo suficiente de contacto, de tal forma que no se alcance el equilibrio,

las concentraciones finales del líquido y el sólido pertenecen a un punto en la curva tal como A que se acerca bastante al equilibrio (Treybal, 2007).

La ecuación de Freudlich, puede aplicarse a la adsorción de este tipo y la razón principal es que generalmente se consideran pequeñas concentraciones del soluto adsorbable. Esto puede escribirse de la siguiente forma:

$$Y^* = mX^n$$

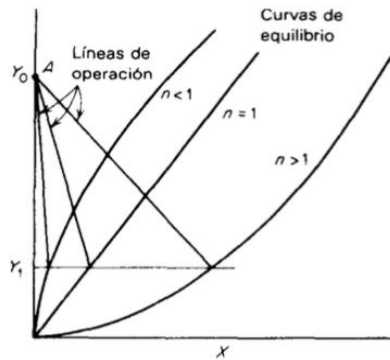
$$X_1 = \left(\frac{Y_1}{m}\right)^{1/n}$$

$$\frac{S_s}{L_s} = \frac{Y_0 - Y_1}{\left(\frac{Y_1}{m}\right)^{1/n}}$$

(Treybal, 2007)

En la Figura 7, se muestran tres isotérmicas típicas de Freudlich. Si en cada uno de los casos se va a reducir la concentración de la solución Y_0 a Y_1 , se aplican las tres líneas de operación que salen del punto A. La pendiente de la línea de operación en cada uno de los casos, directamente proporcional a la relación de adsorbante/solución. Cuando los valores de n se encuentran en el rango entre 2 y 10 representan características de adsorción buenas, si están de 1 a 2 se consideran moderadamente difíciles y menor que 1 malas, en este caso es posible que la dosis necesaria de adsorbentes sean tan grandes que no pueda lograrse una eliminación fraccional apreciable de soluto (Treybal, 2007).

Figura 7. Adsorción en una sola etapa, curvas en el equilibrio de Freudlich



(Treybal, 2007)

U. Adsorción a corriente cruzada

La eliminación de una cantidad dada de soluto puede lograrse con gran economía de adsorbente, al tratar la solución con pequeños lotes separados y una filtración entre cada etapa. La economía es importante cuando se utiliza un adsorbente bastante caro como el carbón activado. El ahorro es mayor cuanto mayor sea el número utilizado de lotes, sin embargo, causa gastos mayores de filtración y otros costos de manejo, es por ello que casi nunca se utilizan más de dos etapas (Treybal, 2007).

$$L_s = (Y_0 - Y_1) = S_{s1}(X_1 - X_0)$$

$$L_s = (Y_1 - Y_2) = S_{s2}(X_2 - X_0)$$

$$\frac{S_{s1}}{L_s} = \frac{Y_0 - Y_1}{\left(\frac{Y_1}{m}\right)^{1/n}}$$

$$\frac{S_{s2}}{L_s} = \frac{Y_1 - Y_2}{\left(\frac{Y_2}{m}\right)^{1/n}}$$

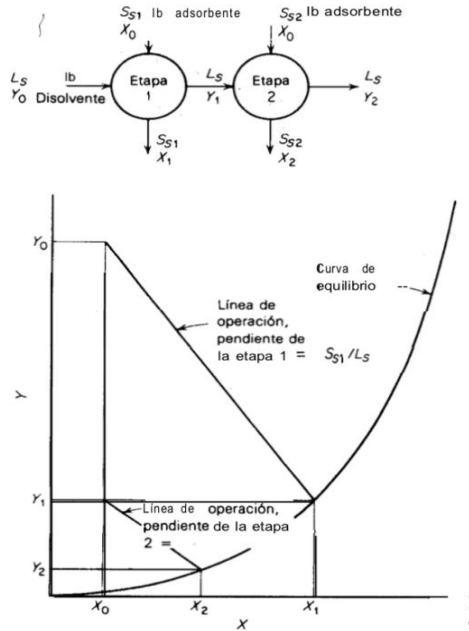
Y la cantidad total de adsorbente utilizada es

$$\frac{S_{s1} + S_{s2}}{L_s} = m^{1/n} \left(\frac{Y_0 - Y_1}{Y_1^{1/n}} + \frac{Y_1 - Y_2}{Y_2^{1/n}} \right)$$

(Treybal, 2007)

La Figura 8, muestra tanto las curva en el equilibrio y de operación como el diagrama de flujo para una operación normal de dos etapas ideales a corriente cruzada (Treybal, 2007).

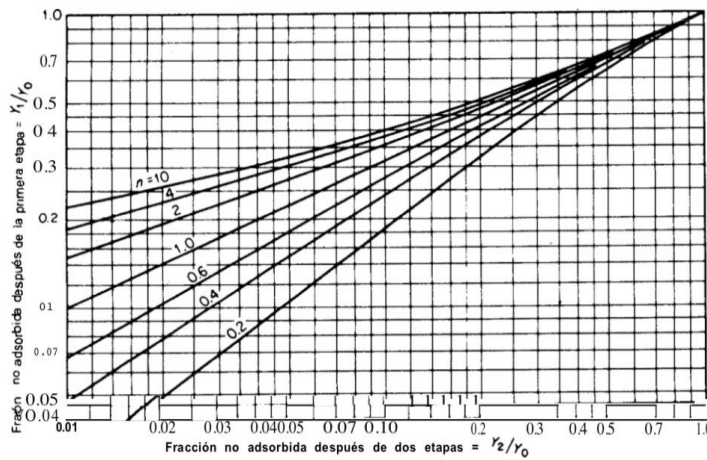
Figura 8. Adsorción a corriente cruzada en dos etapas



(Treybal, 2007)

Y a partir de la Figura 9 se puede obtener la n, a partir de la relación de Y₂/Y₀ vs. Y₁/Y₀.

Figura 9. Relación para n en una operación a corriente cruzada

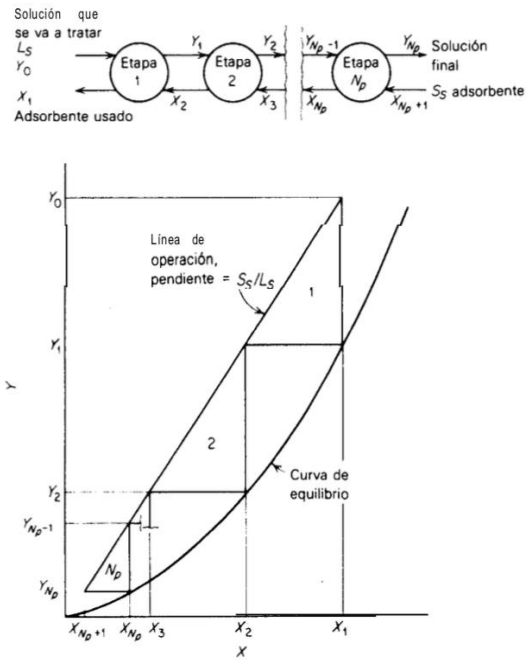


(Treybal, 2007)

V. Adsorción a contracorriente en varias etapas

En este proceso se puede obtener una mayor economía de adsorbente. El esquema que describe este proceso se muestra en la Figura 10 (Treybal, 2007).

Figura 10. Adsorción a contracorriente en varias etapas



(Treybal, 2007)

La aplicación de la ecuación de Freundlich se describe a partir del balance de soluto en la N_p etapa:

$$L_s(Y_0 - Y_{N_p}) = S_s(X_1 - X_{N_p+1}).$$

$$S_s(X_1 - 0) = L_s(Y_0 - Y_2).$$

$$X_1 = \left(\frac{Y_1}{m}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\frac{S_s}{L_s} = \frac{Y_0 - Y_2}{\left(\frac{Y_1}{m}\right)^{1/n}}$$

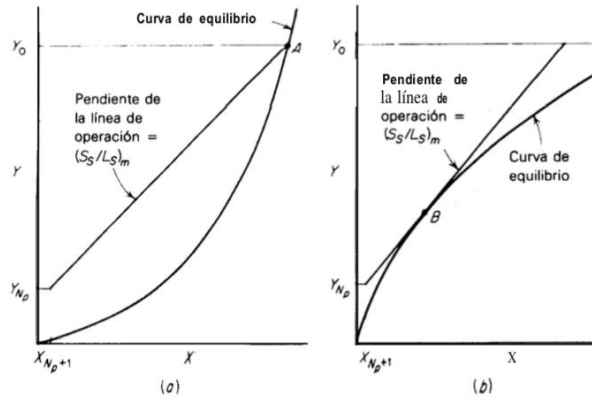
$$L_s(Y_1 - Y_2) = S_s X_2 = S_s \left(\frac{Y_2}{m}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\frac{Y_0}{Y_2} - 1 = \left(\frac{Y_1}{Y_2}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{Y_1}{Y_2} - 1\right)$$

(Treybal, 2007)

La relación mínima adsorbente/disolvente será la mayor que tenga como resultado un número infinito de etapas para el cambio deseado en la concentración. La Figura 11 muestra la línea de operación y relación de adsorbente mínimo/disolvente para etapas infinitas (Treybal, 2007).

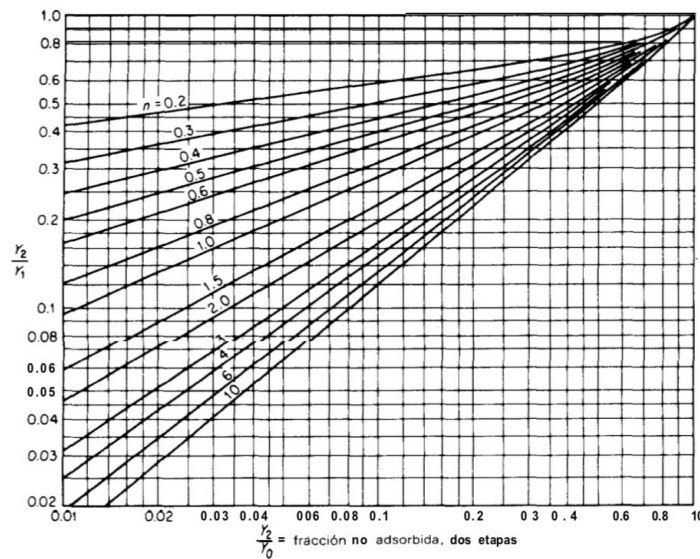
Figura 11. Línea de operación y relación de adsorbente mínimo/disolvente para etapas infinitas



(Treybal, 2007)

En este caso, para encontrar n , se utilizó la Figura 12, en donde está representada por la relación de Y_2/Y_0 vs. Y_2/Y_1 .

Figura 12. Relación para n en una operación a contracorriente en dos etapas



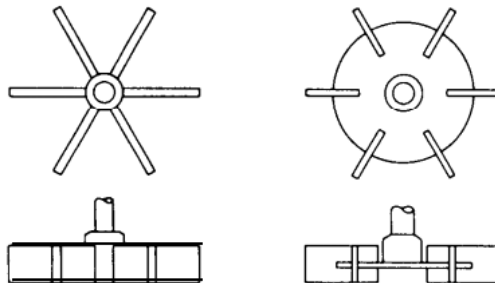
(Treybal, 2007)

W. Tanques con agitación para contacto líquido-sólido

En general son cilindros verticales, circulares; presentan profundidades de líquido de 0.75 a 15 diámetros del tanque. Se utilizan cuatro mamparas de pared, generalmente de $T/12$ de ancho (T = diámetro del tanque), para eliminar los vórtices en tanques abiertos y producir el movimiento vertical del líquido que se necesita para levantar las partículas sólidas. Con frecuencia se arreglan dejando un claro, que tiende a ser la mitad del espesor de las mamparas, entre la mampara y la pared del tanque para prevenir la acumulación de sólidos detrás de las mamparas (Treybal, 2007)

Para estas operaciones se recomienda la utilización de turbinas de hoja plana, como las presentes en la Figura 13 arregladas un eje localizado de forma axial. En algunas ocasiones se utilizan turbinas múltiples sobre el mismo eje para la obtención de una mejor uniformidad de la suspensión sólido líquido en todo el tanque. El claro del impulsor inferior desde el fondo del tanque puede ser $d_i/3$ (d_i = diámetro del impulsor), pero de forma general es mejor que este sea mayor que la profundidad sedimentada de los sólidos en un líquido tranquilo, por si se detiene el impulsor no se tape. Si los sólidos se sedimentan rápidamente debido a su densidad o tamaño de partícula, los diámetros grandes de impulsor son los más indicados (Treybal, 2007)

Figura 13. Turbinas utilizadas en tanques de agitación, de hoja plana con o sin disco



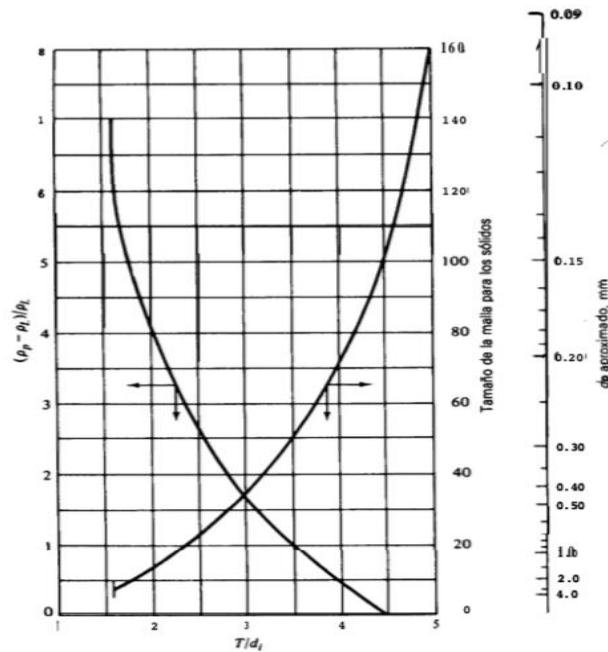
(Treybal, 2007)

Por otro lado, al tener impulsores grandes los cuales funcionan a velocidades relativamente bajas se requiere menos potencia para un flujo específico de bombeo que para los impulsores pequeños los cuales funcionan a altas velocidades. El diámetro del impulsor es el indicado cuando los sólidos tienden a sedimentarse rápidamente debido a que son muy densos o bien, su tamaño de partícula es grande (Treybal, 2007).

La Figura 14 muestra dos relaciones T/d_i , una que depende de las densidades y la otra del tamaño de partícula, y se escoge el promedio entre ambos para los diámetros recomendados de turbinas. Esta figura únicamente funciona para la suspensión de sólidos en fluidos de viscosidad similar a la

del agua. Asimismo, si los sólidos son de densidades y tamaños mixtos se utiliza el más denso y mayor. No es recomendable tener en cualquiera de los casos una relación de T/d_i menor que 1.6, ya que se obstaculiza el flujo libre de la mezcla en la pared del tanque. Cabe resaltar, que la selección del diámetro del impulsor puede variar debido a las consideraciones del torque ya que los impulsores más grandes requieren un torque mayor para poder girar y su costo se eleva ya que se requiere de un engranaje para reducir la velocidad (Treybal, 2007).

Figura 14. *Diámetros recomendados de turbina para la suspensión de sólidos en líquidos de viscosidad similar a la del agua*



(Treybal, 2007)

VI. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo la siguiente metodología, con la finalidad de extraer, caracterizar y purificar ácido 5-cafeoilquínico.

1. Extracción de ácido clorogénico

- a. Se trituraron 25 gramos de pulpa de café con licuadora y se añadieron 125 ml de agua destilada en un beaker.
- b. Se calentó a 60°C, durante 1 hora cubriendo el beaker con papel aluminio.
- c. Se procedió a filtrar la solución.

2. Determinación de la densidad relativa

- a. Se determinó la temperatura de la muestra y se llevó a 60°C.
- b. Se pesó un picnómetro limpio (vacío y seco) y se llenó con la muestra de modo que no quedaran burbujas.
- c. Se pesó el picnómetro y se vació.
- d. Se lavó el picnómetro con alcohol etílico y agua.
- e. Se repitió el ensayo con agua asegurando que se encontrara a 60°C.

3. Determinación de pH

- a. Con ayuda de un potenciómetro, se equilibraron los electrodos sumergiéndolos en tres o cuatro porciones sucesivas de muestra y se procedió a tomar una muestra fresca para medir el pH.

4. Determinación de viscosidad de la solución con ayuda de viscosímetro de Ostwald

- a. En este viscosímetro, se utilizan distintas cavidades como marcas para cronometrar el tiempo que tarda en caer el fluido desde una marca hasta otra. Dependiendo de este lapso, la viscosidad de este será mayor o menor, siendo proporcional al tiempo empleado.
- b. Se llevó la muestra con la que se estaba trabajando a la temperatura con la que se deseaba determinar el valor de viscosidad.

- c. Se midió con el cronómetro el desplazamiento de la muestra de una marca a la otra.
- d. Se determinó el valor de la viscosidad con la constante proporcionada por los datos de fabricante y la densidad de la muestra.

5. Prueba cualitativa de presencia de fenoles

- a. Se añadieron de 3 a 4 gotas de cloruro férrico a una muestra de 5 ml de extracto de ácido 5-cafeoilquinico, hasta identificar un cambio en la coloración de la muestra.

6. Aislamiento y cuantificación de ácidos clorogénicos, extracción líquido– líquido

- a. Se agregaron a 125 ml del extracto obtenido, ácido fosfórico 4% para favorecer la solubilidad en acetato de etilo.
- b. Se realizaron tres lavados con 75 ml de cloruro de metilo para extraer la cafeína en la fase orgánica.
- c. Se extrajeron los ácidos clorogénicos, utilizando acetato de etilo realizando cuatro lavados utilizando nuevamente 75 ml
- d. Se determinó la concentración de ácido 5-cafeoilquinico presente en la solución mediante HPLC (inciso 9)
- e. Se filtró con papel Whatman N° 1 y se procedió a secar a 40°C y 120 rpm en un evaporador rotativo.

7. Aislamiento y cuantificación de ácidos clorogénicos, adsorción con carbón activado

- a. Al extracto obtenido se añadió 40 g/L de carbón activado y se mezcló con agitador magnético por 1 hora a 60°C, bajo la oscuridad.
- b. Se filtró al vacío con papel Whatman N° 1
- c. Se procedió a separar los ácidos clorogénicos utilizando 20 ml etanol al 96% (v/v).
- d. Se determinó la concentración de ácido 5-cafeoilquinico presente en la solución mediante HPLC (inciso 9)
- e. Se filtró al vacío con papel Whatman N.º 1
- f. Se colocó en evaporador rotativo a 60°C y 120 rpm.

8. Curva de calibración para análisis HPLC (AOAC, 2005)

- a. Se pesaron 25 mg del estándar de ácido clorogénico, se transfirieron a balón de 25 ml y se diluyó con agua destilada.

- b. Se preparó serie de soluciones estándar transfiriendo alícuotas a distintos balones de 25 ml.
- c. Se determinó el área a 324 nm de cada solución contra agua.
- d. Se obtuvo una gráfica de la concentración de ácido clorogénico en mg/ml contra el área.

9. Análisis HPLC (Quiroz, et al., 2013)

- a. Filtrado de muestras en columna (Millex-HV, Millipore Co.) (0,45 μm)
- b. Inyectar (10 μL) en HPLC (Hypersil C18; 5 μm ; 250 x 4,6 mm; detección por absorbancia UV a 324 nm y temperatura ambiente).
- c. Realizar elución utilizando metanol acuoso (70%, v / v) a 0.5 ml / min, y 40°C.

10. Determinación datos de equilibrio adsorción carbón activado

- a. Se agregó al extracto obtenido previamente distintas concentraciones 10g/L, 20g/L, 30g/L, 40 g/L, 50 g/L, 60 g/L y 70 g/L de carbón activado y se mezcló con agitador magnético por 6 horas a 60°C, bajo la oscuridad.
- b. Se desorbió el ácido 5-cafeoilquínico utilizando etanol 80% v/v y determinar la concentración de ácido 5-cafeoilquínico presente en la solución mediante HPLC (inciso 9).

11. Determinación razón de desorción de ácido 5-cafeoilquínico con distintas concentraciones de etanol a temperatura de operación

- a. Agregar al extracto obtenido previamente distintas concentraciones de carbón a una concentración de 40g/L de carbón activado y mezclar con agitador magnético por 1 hora a 60°C, bajo la oscuridad.
- b. Desorber el ácido 5-cafeoilquínico utilizando etanol a distintas concentraciones y determinar la concentración de ácido 5-cafeoilquínico presente en la solución mediante HPLC (inciso 9).

12. Bases para la propuesta de línea de producción a escala

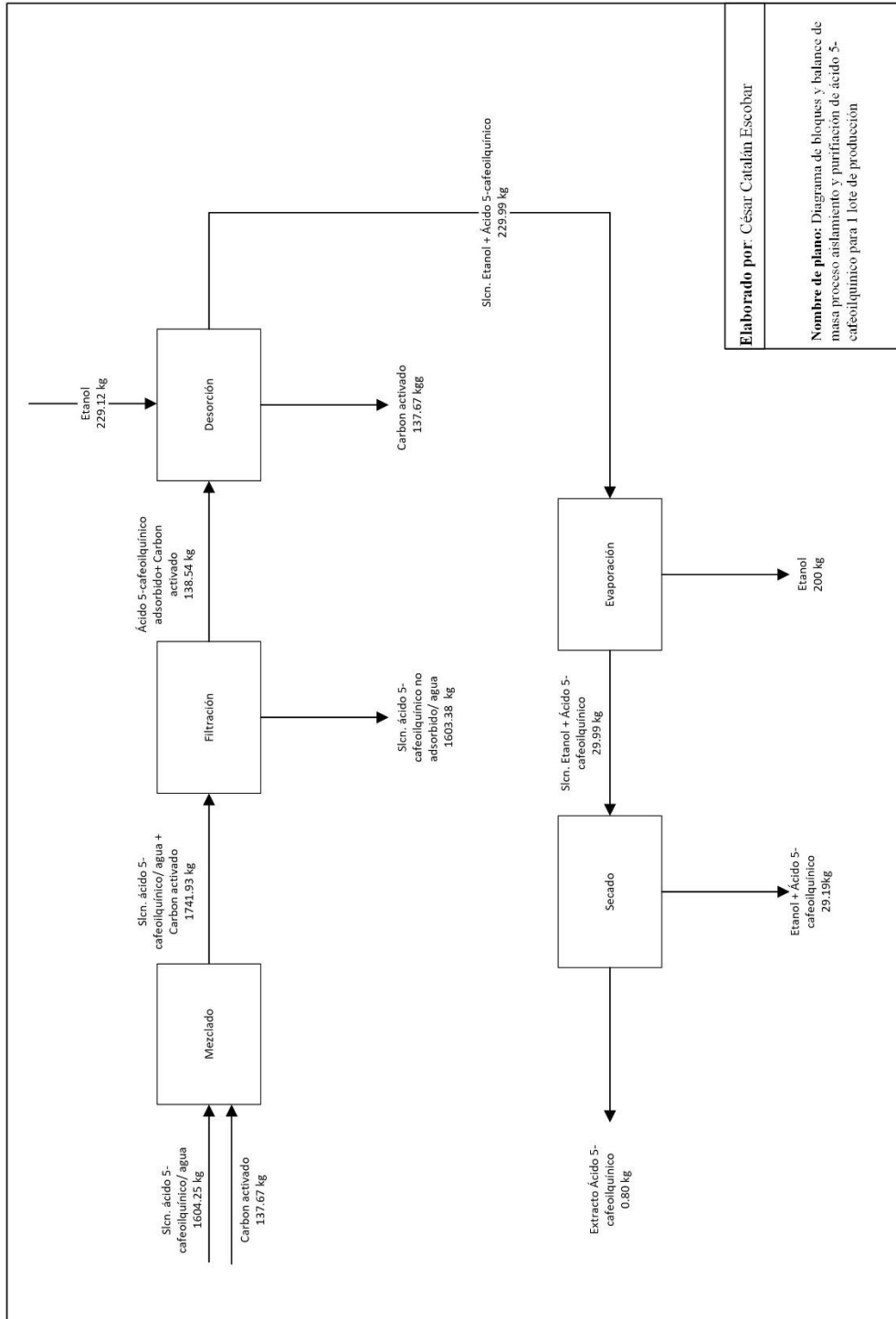
- a. Determinar la capacidad de la línea de producción.
- b. Realizar un balance de materia del proceso.
- c. Proponer el equipo requerido para la línea de producción.

13. Evaluación de propuestas para determinar un nicho de mercado

- a. Realizar revisión bibliográfica de artículos científicos relacionados a la extracción de ácido 5-cafeoilquínico y sus propiedades para distintas aplicaciones.

VII. RESULTADOS

Figura 15. Diagrama de bloques y balance de masa del proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico propuesto



Cuadro 2. Caracterización de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C

Descripción	Media	Desviación estándar
Densidad (g/ml)	0.969	0.004
pH	6.54	0.04
Viscosidad (cP)	1.32	0.02
Concentración de ácido 5-cafeoilquínico (mg/L)	578.925	23.428
Concentración cafeína (mg/L)	194.567	15.236

Cuadro 3. Rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico, obtenido a partir de adsorción con carbón activado y extracción líquido-líquido con solventes

Descripción	Método purificación	Media	Desviación estándar
Rendimiento 5-cafeoilquínico (% g 5CQA / g pulpa)	Extracción líquido-líquido con acetato de etilo	0.219	0.008
Rendimiento ácido 5-cafeoilquínico (% g 5CQA / g pulpa)	Adsorción con carbón activado	0.242	0.005

Cuadro 4. Costo de aislamiento a escala laboratorio de ácido 5-cafeoilquínico, obtenido a partir de adsorción con carbón activado y extracción líquido-líquido con solventes

Método aislamiento	Costo (Q/mg)
Extracción líquido-líquido con acetato de etilo	Q. 4.40
Adsorción con carbón activado	Q. 1.60

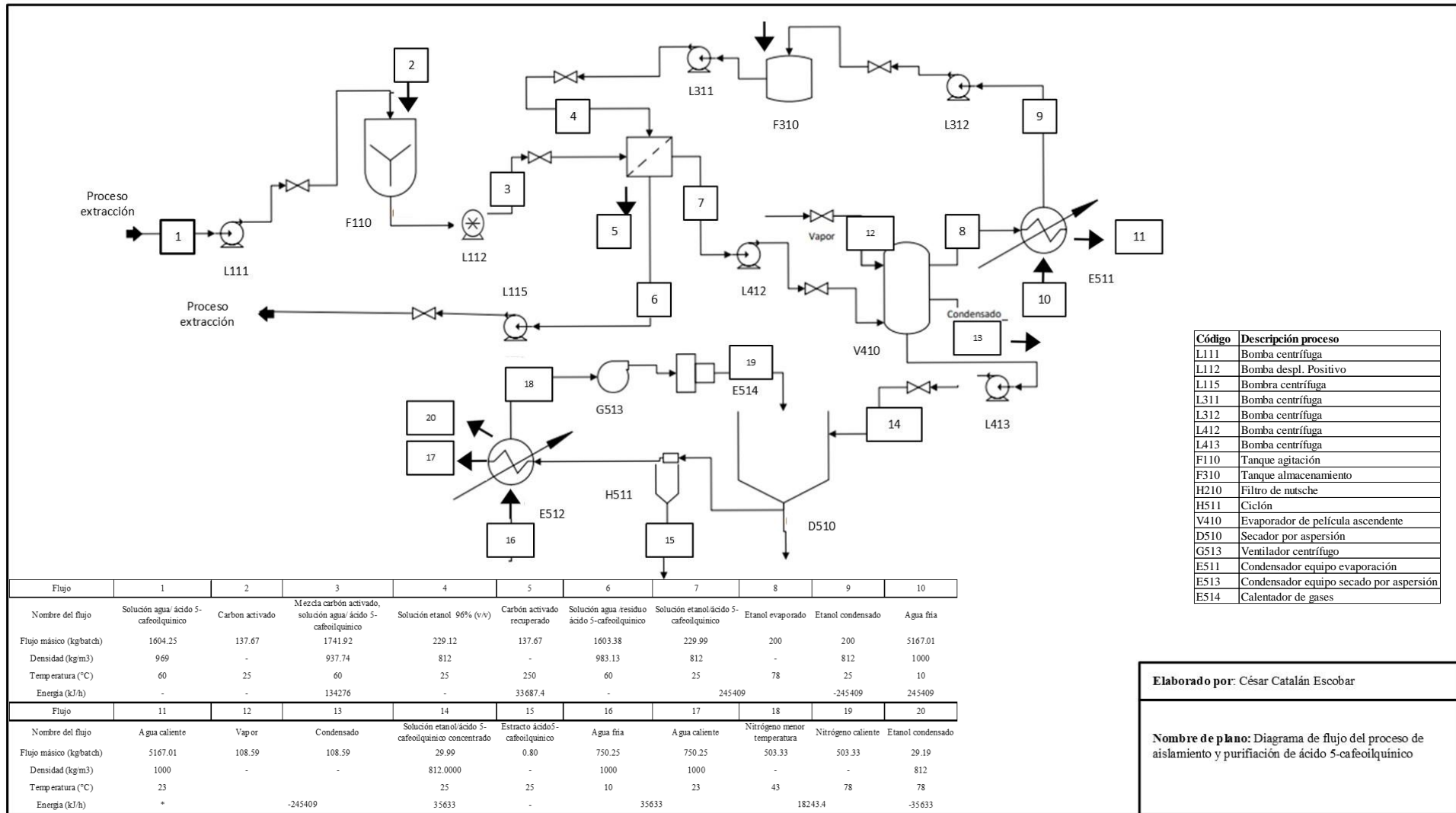


Figura 16. Esquema de flujo del proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquinico propuesto

Figura 17. Ficha técnica del tanque de mezcla solución con extracto de ácido 5-cafeoilquínico y carbón activado

		FICHA TÉCNICA LÍNEA DE PURIFICACIÓN	
Preparado por: César Catalán	Aprobado por:	Fecha de elaboración: 24/03/2021	Actualización:
Nombre del equipo		Tanque de mezcla	
Descripción general		Producto para procesar: solución extracto ácido 5 - cafeoilquínico y carbón activado Material del equipo: Acero inoxidable 304	
Marca	Cedarstone		
Modelo	CSMT - 2000		
Flujo a procesar	1860 L/h		
Capacidad del equipo	2 000 L - 528 gal		
Cantidad de equipos	1		
Dimensiones			
Diámetro (mm)	1300		
Altura (mm)	1500		
Parámetros de diseño			
Temperatura (°F)	32 - 320		
Material interior	304 SS		
Material enchaquetado	304 SS		
Aislante	Poliuretano		
Mezclado			
Potencia (kW)	2.2		
RPM (r/min)	36 - 53		



Figura 18. Ficha técnica del filtro Nutsche para solución con extracto de ácido 5-cafeoilquínico y carbón activado



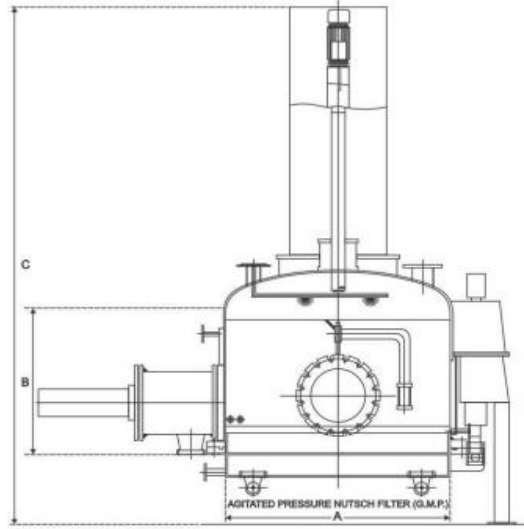
		FICHA TÉCNICA LÍNEA DE PURIFICACIÓN	
Preparado por: César Catalán	Aprobado por:	Fecha de elaboración: 24/03/2021	Actualización:
Nombre del equipo		Filtro Nutsche	
Descripción general	Producto para procesar: solución y carbón activado Material del equipo: Acero inoxidable 304		
Marca	BEW		
Modelo	BEW ANFD 5		
Flujo a procesar	1860 L/h		
Volumen de trabajo	10000 L		
Área de filtración	10 m ²		
Capacidad torta	4050		
Cantidad de equipos	1		
			
A (mm)		3600	
B (mm)		1200	
C (mm)		5300	
Agitador (RPM)		8	
Potencia motor (hp)		30	
Potencia motor pack (kw)		2	

Figura 19. Ficha técnica del evaporador para solución etanol 96% (v/v)



		FICHA TÉCNICA LÍNEA DE PURIFICACIÓN		
Preparado por: César Catalán		Aprobado por:	Fecha de elaboración: 24/03/2021	Actualización:
Nombre del equipo		Evaporador película ascendente		
Descripción general		Producto para procesar: solución etanol y ácido 5-cafeoilquinico (desorción) Material del equipo: Acero inoxidable 304		
Marca		LAB1ST		
Modelo		RFE200L		
Cantidad de equipos		1		
Capacidad de evaporación		200 kg/h		
Área de calentamiento		4 m ²		
Presión de vapor		0.25 Mpa		
Consumo de vapor		220 kg/h		
Área de condensación		0.5 m ²		
Temperatura agua entrada enfriamiento		32 °C		
Temperatura salida agua enfriamiento		40 °C		
Capacidad agua enfriamiento		15 m ³ /h		
Colector líquido		210L		
Cámara de evaporación		350L		
Separador gas líquido		30		
				

Figura 20. Ficha técnica de secadora spray

		FICHA TÉCNICA LÍNEA DE PURIFICACIÓN	
Preparado por: César Catalán	Aprobado por:	Fecha de elaboración: 24/03/2021	Actualización:
Nombre del equipo		Secador centrífugo en spray	
Descripción general		Producto para procesar: solución etanol y ácido 5-cafeoilquínico Material del equipo: Acero inoxidable 304	
Marca	Hawai Scientific		
Modelo	CSD 50 L		
Flujo a procesar	37 L/h		
Capacidad del equipo	50 L		
Cantidad de equipos	1		
Dimensiones			
Altura (mm)	4500		
Longitud (mm)	2800		
Ancho (mm)	5500		
Parámetros de diseño			
Temperatura (°F)	60 -350°C		
Velocidad rotación (RPM)	21500 RPM		
Potencia (kW)	60		
			

Cuadro 5. Evaluación de fuentes bibliográficas de estudios experimentales sobre los beneficios del ácido 5-cafeoilquínico para determinación del nicho de mercado

Evaluación experimental	Descripción estudio	Conclusiones	Fuente bibliográfica
Hipertensión	A los sujetos se les dio una sopa instantánea con sabor a salsa de soja con extracto de café (equivalente a 0, 25, 50 y 100 mg de ácido clorogénico) durante 28 días.	Se observaron reducciones significativas de la presión arterial sistólica (SBP) y diastólica (DBP) (-4.7 y -3.2 mmHg, respectivamente) con una dosis mínima de 93 mg de extracto de café/día.	Kozuma, et al., 2005
	Los sujetos recibieron agua (control) y 400 mg de ácido clorogénico disuelto en 200 ml de agua baja en nitrato.	La presión arterial sistólica (SBP) y diastólica (DBP) se redujeron significativamente (-2.41 y -1.53 mmHg, respectivamente) con el tratamiento de ácido clorogénico.	Mubarak, et al., 2012
Diabetes	Sujetos recibieron 12 g de café descafeinado, 1 g de ácido clorogénico, 500 mg de trigonelina, o 1 g de manitol disueltos en 270 ml de agua.	El ácido clorogénico redujo significativamente las concentraciones de glucosa e insulina (-0.7 mmol/L y -73 pmol/L, respectivamente) 15 minutos después de una prueba de tolerancia oral a la glucosa	Van Dijk, et al., 2009
	Sujetos saludables con los niveles más altos de glucosa posprandial, 10 hombres y 8 mujeres (N = 18) A los sujetos se les dio un bocadillo rico en carbohidratos con 100 o 300 mg de extracto (13.9% ácido clorogénico en peso seco) en 200 ml de agua, o solo 200 ml de agua.	La glucosa plasmática y el AUC se redujeron significativamente con la bebida de extracto de 100 mg	Iwai, et al., 2009)

Continuación Cuadro 5. *Evaluación de fuentes bibliográficas de estudios experimentales sobre los beneficios del ácido 5-cafeoilquínico para determinación del nicho de mercado*

Evaluación experimental	Descripción estudio	Conclusiones	Fuente bibliográfica
Síndrome metabólico	Los sujetos recibieron 2 píldoras de suplemento con ácido clorogénico, al día durante 4 meses como terapia adicional	El tratamiento con este suplemento redujo significativamente el peso corporal, el IMC, la circunferencia de la cintura, la glucosa en ayunas y el colesterol total (~2, 1, 3, 1.5, 6% de disminución, respectivamente).	Patti, et al., 2015
Obesidad	Sujetos consumieron 185 ml de una bebida de prueba con o sin CGAs (329 mg) diariamente durante 4 semanas.	La bebida con CGAs aumentó significativamente el gasto energético posprandial y la utilización de grasa	Soga, et al., 2013

VIII. DISCUSIÓN

El objetivo principal de este trabajo fue proponer un proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico a partir de pulpa de café a escala laboratorio para su aprovechamiento a nivel industrial. Para lograrlo, se realizaron distintos experimentos y análisis de manera que se pudieran identificar las variables de mayor importancia dentro del proceso.

El proceso propuesto (ver Figura 16) inicia con el mezclado en el que se lleva a cabo la operación de adsorción con carbón activado del ácido 5-cafeoilquínico, presente en una solución obtenida a partir de extracción sólido – líquido de la pulpa de café, utilizando agua como solvente a 60°C. Luego, esta mezcla pasa un proceso de filtración que permite la separación del carbón activado con una mayor concentración de ácido 5-cafeoilquínico de la solución acuosa. Posteriormente, se lleva a cabo la desorción de ácido 5-cafeoilquínico utilizando una solución de etanol al 96% v/v a 25°C.

El solvente con una mayor concentración de ácido 5-cafeoilquínico es enviado hacia un proceso de evaporación que tiene la finalidad de aumentar su concentración. La solución con una mayor concentración del producto obtenido pasa un proceso de secado en *spray* que permite la recuperación del ácido 5-cafeoilquínico en estado sólido.

El proceso fue seleccionado tras comparar dos técnicas de aislamiento de ácido 5-cafeoilquínico a escala laboratorio. La primera fue a través de la extracción líquido-líquido, utilizando cloruro de metileno para remover el contenido de cafeína y acetato de etilo para extraer el contenido de ácido 5-cafeoilquínico en la muestra, obteniendo un rendimiento de $0.219 \pm 0.008\%$ (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa) como se observa en el Cuadro 3. La segunda técnica se realizó mediante adsorción con carbón activado del compuesto de interés con un rendimiento de $0.242 \pm 0.005\%$ (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa). De esta manera, se identificó que no hay diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre el rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico de los métodos evaluados.

Con base en la información obtenida de los métodos de aislamiento y purificación, se seleccionó la técnica de adsorción con carbón activado para ser evaluada como proceso a escala, debido a que no involucra solventes tóxicos, al igual que su realización fue más sencilla y requirió de un menor tiempo e inversión a escala laboratorio. Para llevar a cabo el escalamiento del proceso, fue necesario caracterizar ciertas propiedades fisicoquímicas del extracto con agua. Al ser tratado por el método de aislamiento y purificación mencionado, como se observa en el Cuadro 2, se determinó densidad, pH, viscosidad y concentración de ácido 5-cafeoilquínico en la solución, tomando como referencia una temperatura de 60°C. De manera previa, se llevó a cabo una prueba de carácter cualitativo para identificar la presencia de compuestos fenólicos utilizando cloruro férrico, la cual fue positiva, como se observa en la Figura 46, al presentarse una coloración verde pardo.

Basado en el análisis de HPLC, la concentración inicial de ácido 5-cafeoilquínico en la solución de extracción con agua a 60°C fue de 578.925 ± 23.428 mg/L, es importante mencionar que este factor es de bastante importancia en relación a los rendimientos obtenidos con las técnicas aplicadas para el aislamiento, pues representa un rendimiento aproximado de 0.29% (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa), mientras que de acuerdo con la literatura este tipo de extracción permite obtener un rendimiento de hasta 5.62% (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa) (Quiroz, et al., 2013).

Este método de extracción fue propuesto en el trabajo de graduación “Extracción de ácido clorogénico a escala laboratorio a partir de pulpa de café como alternativa para su aprovechamiento” (Garzaro, 2021), identificando como uno de los principales factores el tamaño de partícula de la pulpa pues este tiene influencia sobre la extracción de antioxidantes, asimismo parámetros como la relación sólido-solvente, tiempo de extracción, condiciones de almacenamiento de la pulpa y temperatura de extracción que tienen una alta influencia en la cantidad y composición de antioxidantes en los extractos (Michiels, Kevers, Pincemail, Defraigne, & Jacques Dommes, 2012).

Para poder proponer un proceso efectivo para la adsorción y desorción del ácido clorogénico fue necesario, determinar las propiedades de adsorción del carbón activado en condiciones de equilibrio, y la relación de desorción del solvente utilizado a distintas concentraciones, bajo las condiciones de temperatura determinadas para cada proceso.

La capacidad de adsorción del carbón activado para el compuesto de interés, se evaluó añadiendo distintas concentraciones de este adsorbente a la solución de agua con ácido 5-cafeoilquínico y agitando durante un periodo de tiempo prolongado a la temperatura que se deseaba analizar que es de 60°C, es importante mencionar que generalmente se lleva a cabo una evaluación de 24 horas aproximadamente para determinar los datos en condiciones de equilibrio, sin embargo debido a la disposición de espacio para realizar la experimentación, solamente se pudo llevar a cabo la agitación a temperatura constante durante 6 horas, lo cual podría afectar los datos de equilibrio obtenidos.

Estos datos pueden observarse en el Cuadro 24, y fueron analizados bajo el modelo de Freundlich para isothermas de adsorción, utilizado principalmente por su simplicidad, razonable exactitud, y porque se adapta generalmente a situaciones en las que se consideran pequeñas concentraciones del soluto adsorbible (Treybal, 1988). Como se puede observar en la Figura 25, al expresar los datos en escala logarítmica se puede apreciar un comportamiento lineal, y se identificó un coeficiente de determinación de 0.9246 que indica que los datos se ajustaron al modelo propuesto.

Al analizar los parámetros obtenidos por el modelo se identifica que la constante n , que es la pendiente de la línea de operación, y es directamente proporcional a la relación adsorbente/solución, tiene un valor de 2.47, indicando una buena adsorción pues se establece de forma general que los valores de n en el rango de 2 a 10 representan características de adsorción bastante eficientes (Treybal, 1988).

Para determinar la cantidad de carbón activado que se requiere para trabajar con el flujo másico de solución obtenida a partir del proceso de extracción con agua a 60°C que es de 1604.25 kg/batch se llevó a cabo un balance de masa para adsorción por lotes en una sola etapa, El flujo mencionado se determinó a partir de la producción promedio de pulpa en el beneficio del que se obtiene la muestra evaluada, que corresponde a un estimado de 100qq/día. Se decidió trabajar la adsorción con un solo lote pues, la economía es particularmente importante cuando se utiliza carbón activado, que es un adsorbente relativamente caro. Y a pesar de que el ahorro es mayor cuando se aumenta el número de lotes de adsorción, se generan mayores costos por la filtración y otros costos de manejo (Treybal, 1988). Es importante mencionar que se tomó como consideración en el balance

de masa que se utiliza adsorbente fresco en cada etapa de adsorción. Finalmente, se estableció una relación para el requerimiento de carbón activado siendo esta de 0.0858 kg de carbón activado/kg solución libre de soluto.

Debido a que el compuesto de interés corresponde al adsorbato, se procede a establecer un proceso de desorción del sólido con un disolvente distinto al que se encontraba en la solución original, en este caso uno en el que presenta mayor solubilidad. La concentración etanólica adecuada fue seleccionada a partir de la evaluación de la razón de desorción de ácido 5-cafeoilquínico, para ello se prepararon soluciones con distintas concentraciones de etanol, como se puede observar en el Cuadro 25. A medida que incrementaba la concentración de etanol en la solución se iba incrementando la concentración de ácido 5-cafeoilquínico presente en la misma, se identificó que a una concentración de 96% v/v se obtuvo una razón de desorción de 94.23%, lo cual coincide con la concentración de etanol propuesta en distintas fuentes bibliográficas para la desorción de ácido 5-cafeoilquínico, y se debe a que este compuesto es soluble en agua solamente a temperaturas elevadas, mientras que es bastante soluble en etanol (Quiroz, et al., 2013). Mediante este porcentaje o razón de desorción se pudo establecer la cantidad de etanol al 96% v/v que se requiere en el proceso a escala.

. Como se mencionó previamente una de las principales ventajas del método de adsorción por carbón activado es que no requiere de la utilización de solventes con efectos tóxicos como el cloruro de metileno para la remoción de cafeína pues la concentración de esta se encuentra fuertemente influenciada por la concentración de los solventes orgánicos en agua, específicamente el etanol, como se observa en el Cuadro 26 la concentración de cafeína en la mezcla disminuye entre la desorción realizada por etanol 80 – 96% v/v, lo cual concuerda con estudios bibliográficos en los que este comportamiento se ha mencionado previamente, y que está relacionado con la polaridad del etanol que es mucho más baja que la del agua, y al ajustar el ratio etanol agua se puede obtener una polaridad adecuada para la extracción de la cafeína (Bi, Zhou, y Ho; 2010)

Otra de las ventajas de la utilización de carbón activado es que se puede regenerar de forma térmica, y se estima solamente un porcentaje de pérdida por ciclo de 1 a 5 % (Narbaiz, s.f.). Con esta finalidad se seleccionó el filtro de *Nutsche* que replica la acción

realizada por la filtración al vacío llevada a cabo a escala laboratorio y así mismo, porque mediante un sistema de agitación térmica permite que el adsorbente se regenere.

La selección de un filtro de *Nutsche* presenta una serie de aspectos positivos que lo convierten en una opción atractiva para diversas aplicaciones de filtración en la industria. Este tipo de filtro ofrece una alta capacidad de retención de sólidos y permite una fácil descarga del producto filtrado, lo que facilita la operación y minimiza los tiempos de inactividad. Además, su diseño permite realizar una filtración eficiente de grandes volúmenes de líquido y sólidos, lo que resulta en una alta productividad y rendimiento del proceso. Sin embargo, es importante tener en cuenta algunas desventajas asociadas con los filtros de *Nutsche*. Entre ellas se encuentran su costo inicial relativamente alto y la necesidad de un mantenimiento periódico para garantizar su correcto funcionamiento. Además, su tamaño y peso pueden limitar su aplicabilidad en ciertos entornos de producción, y su operación puede requerir personal capacitado para evitar posibles problemas de seguridad o manejo incorrecto. En este caso debido a la limitación de datos experimentales de la etapa del proceso de filtración, se propuso la utilización de este equipo, sin embargo, por las características del proceso se requiere de un área de filtración relativamente grande, y por consiguiente las dimensiones del equipo también siendo una de sus principales desventajas.

Posterior al proceso de desorción se propuso introducir la operación unitaria de evaporación para aumentar la concentración del soluto presente en la solución de etanol al 96% v/v, tomando en consideración una razón de evaporación de 200 kg/batch del solvente de acuerdo con los datos técnicos del equipo utilizado, finalmente se lleva a cabo la operación de secado en aerosol, asumiendo recuperación del 92% del producto sólido de acuerdo con los rendimientos teóricos alcanzados por distintos equipos a escala laboratorio.

El proceso de separación de ácido 5-cafeoilquínico de sus isómeros se caracteriza por ser bastante complicado debido a que estos compuestos se distinguen por ser químicamente inestables, y su facilidad para degradarse/formar otros compuestos químicos, llegando a formar incluso más de 20 derivados de los cuáles algunos aún no han sido reportados su formación. Debido a esto su procesamiento a nivel industrial podría llevar a obtener extractos con un contenido biológico de compuestos fenólicos activos bastante bajo, por lo

que se considera que para obtener el ácido 5-cafeoilquínico con una mayor pureza es más favorable que este proceso se realice solamente a escala laboratorio, sobre todo porque actualmente hay una creciente demanda en relación a productos de origen natural, y al ser uno de los ácidos clorogénicos que se obtiene con mayor porcentaje, se considera que se puede comercializar exitosamente con las composiciones obtenidas tras el proceso de aislamiento y purificación con carbón activado y etanol, sin necesidad de someterlo a mayor procesamiento a nivel industrial, así mismo el número disponible de estándares para identificar la composición de los isómeros que se forman en menores porcentajes es bastante limitado y sus costos son bastante elevados (Shearer et al. 2003; Jaiswal et al. 2012; Wianowska, 2015; Dawidowicz and Typek 2010, 2017).

En cuanto a los posibles usos que se le puede dar a nivel comercial a este producto se han encontrado distintas formulaciones en polvo con concentraciones de entre 10 a 50% de ácido 5-cafeoilquínico, con bajo contenido de cafeína, enfocadas en regular los niveles de glucosa en la sangre y mejorar el metabolismo lipídico, así como combatir la obesidad (Hirata et al., 2011). Hay diversos estudios clínicos, como se observa en el Cuadro 5 que respaldan la utilización de este compuesto enfocándolo en los beneficios que tiene para enfermedades como la diabetes, obesidad, índice metabólico e hipertensión, por lo que es recomendable continuar con la investigación referente.

Así mismo, actualmente se utiliza comúnmente en alimentos como antioxidante y conservante en el procesamiento y almacenamiento (Santana-Gálvez et al., 2017). También en cremas con una pureza entre 20- 40%, pues puede proteger el colágeno de daño por oxígeno reactivo, y puede reducir eficazmente el daño de rayos UV a piel humana (Castro et al., 2018), también es promovido para ser utilizado en distintas formulaciones cosméticas enfocadas blanqueamiento, hidratación, y cuidado del cabello.

IX. CONCLUSIONES

1. Se establecieron las operaciones unitarias, balance de masa y respectivos equipos involucrados en el proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico, considerando parámetros determinados, como adsorción en tanque agitado, filtración, desorción, evaporación y secado.
2. Se determinó un rendimiento de $0.219 \pm 0.008\%$ (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa) para la técnica de aislamiento de ácido 5-cafeoilquínico, realizada con cloruro de metileno y acetato de etilo. Para la técnica de adsorción con carbón activado del compuesto de interés, se determinó un rendimiento de $0.242 \pm 0.005\%$ (g ácido 5-cafeoilquínico/g pulpa), identificando así que no hay diferencia significativa ($\alpha=0.05$) entre el rendimiento de los métodos evaluados.
3. Se determinó la relación de carbón activado que se requiere para la cantidad de solución a procesar, siendo esta de 0.0858 kg de carbón activado por kg de solución libre de soluto, a la temperatura de operación (60°C) en condiciones de equilibrio.
4. Se determinó el radio de desorción que se obtiene a distintas concentraciones de etanol con la finalidad de determinar la concentración que se requiere para obtener una mayor concentración del compuesto de interés, siendo esta a 96% v/v, obteniendo un radio de 94.23% de desorción.
5. Se identificaron, tras la evaluación de distintas fuentes bibliográficas, los beneficios que el ácido 5-cafeoilquínico ha tenido en estudios experimentales con enfermedades relacionadas a la diabetes, obesidad e hipertensión, siendo su principal nicho de mercado en el área de medicina nutracéutica.

X. RECOMENDACIONES

1. Analizar la capacidad de adsorción de ácido 5-cafeoilquínico con carbón activado, evaluando el comportamiento de la isoterma de adsorción mediante la modificación de distintos parámetros como pH, temperatura y concentración inicial de adsorbato, para determinar si se presenta una influencia significativa frente a las condiciones evaluadas.
2. Evaluar la implementación de un proceso de tratamiento en la pulpa de café antes de la extracción y aislamiento del ácido 5-cafeoilquínico, con la finalidad de analizar su influencia en la concentración del compuesto de interés.
3. Evaluar diferentes opciones para la disposición o tratamiento de los residuos sólidos obtenidos tras el proceso de extracción de ácido 5-cafeoilquínico a partir de la pulpa de café con la finalidad de proponer una solución viable frente a la magnitud de desechos sólidos generados por el proceso de producción de café para consumo humano.
4. Realizar un análisis energético y de costos del proceso de secado para determinar el método más eficiente para realizar la recuperación del compuesto de interés.
5. Evaluar de forma experimental la filtración de la solución de agua con ácido 5-cafeoilquínico en el carbón activado para determinar la velocidad adecuada para la separación, el diámetro del poro de medio filtrante, el tiempo de operación y la resistencia específica de la torta y del medio.

XI. REFERENCIAS

- Alton, M. (1998). The chemical components of coffee. *Caffeine*. FL, USA: CRC Press. p. 97-162.
- Asociación Nacional del Café (ANACAFE) (2016). Manual de Buenas Prácticas de Manejo de Subproductos de beneficiado húmedo de Café. <https://shre.ink/DsHI>
- Association of Analytical Communities. (2005). *Ácido clorogénico en café verde*. En *Métodos oficiales de análisis de AOAC International* (18.^a ed.). Arlington, VA: AOAC International.
- Bi, W., Zhou, J., y Ho Row, K. (2010). Decaffeination of coffee bean waste by solid–liquid extraction. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28(1), 221-224. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0264-x>
- Bresciani, L., Calani, L., Bruni, R., Brighenti, F., y Del Río, D. (2014). Phenolic composition, caffeine content, and antioxidant capacity of coffee silverskin. *Food Research International*, 61, 196-201. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.10.047>
- Bressani, R. (1972). *Pulpa de café: composición, tecnología y utilización*. Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá.
- Clifford, M. (1999). Chlorogenic acids and other cinnamates – nature, occurrence, and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(3), 362-372.
- Colpas, F., Tarón, A., y González, R. (2017). Área superficial de carbones activados y modificados obtenidos del recurso agrícola *Saccharum officinarum*. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(2), 62-72.
- Daglia, M., Papetti, A., Gregotti, C., Berté, F., y Gazzani, G. (2000). In vitro antioxidant and ex vivo protective activities of green and roasted coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(5), 1449-1454. <https://doi.org/10.1021/jf990510g>

- Dawidowicz, A. L., y Typek, R. (2010). Thermal stability of 5-O-caffeoylquinic acid in aqueous solutions at different heating conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(23), 12578-12584.
- Ediboon. (2018). Equipo de Adsorción de Lecho Fijo. <https://shre.ink/DsHn>
- Garzaro, G. (2021). *Extracción de ácido clorogénico a escala laboratorio a partir de pulpa de café para evaluar una alternativa de aprovechamiento* (Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala). <https://shre.ink/DsHU>
- GEA. (2018). Batch Processing Solutions. <https://shre.ink/DsHH>
- Harkinks, W. (1943). *Chemical Engineering*. <https://shre.ink/DsH1>
- International Coffee Organization. (2020). Coffee market report. <https://icocoffeeorg.com>
- Iwai, K., Narita, Y., Fukunaga, T., Nakagiri, O., Kamiya, T., Ikeguchi, M., y Kikuchi, Y. (2012). Study on the postprandial glucose responses to a chlorogenic acid-rich extract of decaffeinated green coffee beans in rats and healthy human subjects. *Food Science and Technology Research*, 18(6), 849-860.
- Kozuma, K., Tsuchiya, S., Kohori, J., Hase, T., y Tokimitsu, I. (2005). Antihypertensive effect of green coffee bean extract on mildly hypertensive subjects. *Hypertension Research*, 28, 711–718.
- Lacayo, L. (2013). *Formulación de una bebida en polvo a base de café y leche incorporando materias primas que potencializan el sabor dulce y lácteo que permiten la disminución de azúcar y grasas en comparación con la bebida existente en el mercado* (Tesis de Ingeniería Química Industrial). Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ingeniería.
- Luna, D., González, A., Gordon, M., y Martín, N. (2007). Obtención de carbón activado a partir de cáscara de coco. México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- McCabe, W. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7a ed.). México, DF: Interamericana Editores: McGraw-Hill.

- Mendenhall, W., Beaver, R. J., y Beaver, B. M. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística* (10a ed.). México, D.F.: Cengage Learning.
- Monente, C., Bravo, J., Vitas, A., Arbillaga, L., de Peña, M., y Cid, C. (2015). Coffee and spent coffee extracts protect against cell mutagens and inhibit growth of food-borne pathogen microorganisms. *Journal of Functional Foods*, *12*, 365-374. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.12.006>
- Mubarak, A., Bondonno, C. P., Liu, A. H., Considine, M. J., Rich, L., Mas, E., Croft, K. D., y Hodgson, J. M. (2012). Acute effects of chlorogenic acid on nitric oxide status, endothelial function, and blood pressure in healthy volunteers: A randomized trial. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *60*, 9130–9136.
- Narbaitz, R. (s.f.). Electrochemical reactivation of activated carbon. University of Ottawa, Ottawa, Ontario, Canada.
- Patti, A. M., Al-Rasadi, K., Katsiki, N., Banerjee, Y., Nikolic, D., Vanella, L., Giglio, R. V., Giannone, V. A., Montalto, G., y Rizzo, M. (2015). Effect of a natural supplement containing Curcuma longa, guggul, and chlorogenic acid in patients with metabolic syndrome. *Angiology*, *66*, 856–861.
- Perry, R., y Green, D. (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (6a ed.). United States: International Editions: McGraw-Hill.
- Ramírez-Martínez, J. R. (1988). Phenolic compounds in coffee pulp: Quantitative determination by HPLC. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *43*, 135-144. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740430204>
- Rakotomalala, J. (1992). Diversité biochimique des caféiers: analyse des acides hydroxycinnamiques, bases puriques et diterpènes glycosides. Particularités des caféiers sauvages de la région malgache (*Mascarocoffea chev.*). Université Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II, France, Montpellier, France.
- Rodríguez, V. (2013). Manejo y disposición de los subproductos y de las aguas residuales del beneficio del café. En *Manual del cafetero colombiano: Investigación y*

tecnología para la sostenibilidad de la caficultura (Vol. 3). Chinchiná: FNC: CENICAFÉ.

- Santana-Gálvez, J., Cisneros-Zevallos, L., y Jacobo-Velázquez, D. A. (2017). Chlorogenic acid: Recent advances on its dual role as a food additive and a nutraceutical against metabolic syndrome. *Molecules*, 22(3), 358.
- Shearer, J., Farah, A., y De Paulis, T. (2003). Quinides of roasted coffee enhance insulin action in conscious rats. *Journal of Nutrition*, 133, 3529–3532.
- Skoog, D., West, D., Holler, F., y Crouch, S. (2014). *Fundamentos de Química Analítica* (9a ed.). México, D.F.: Cengage Learning.
- Somporn, C., Kamtuo, A., Theerakulpisut, P., y Siriamornpun, S. (2011). Effect of shading on yield, sugar content, phenolic acids and antioxidant property of coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor) harvested from north-eastern Thailand. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92, 1956-1963. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5568>
- Stalikas, C. (2007). Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids. *Journal of Separation Science*, 30, 3268-3295. <https://doi.org/10.1002/jssc.200700261>
- Tfouni, S. (2013). Caffeine and chlorogenic acids intake from coffee brew: influence of roasting degree and brewing procedure. *Journal of Food Science and Technology*, 49, 747-752. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12361>
- Treybal, R. (1988). *Operaciones de Transferencia de Masa* (2a ed.). México, DF, México: McGraw-Hill.
- Quiroz, M., Campos, A., Alfaro, G., Ríos, O., Villeneuve, P., y Figueroa-Espinoza, M. (2013). Isolation of green coffee chlorogenic acids using activated carbon. *Journal of Food Composition and Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2013.10.005>
- Soga, S., Ota, N., y Shimotoyodome, A. (2013). Stimulation of postprandial fat utilization in healthy humans by daily consumption of chlorogenic acids. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 77, 1633–1636.

- Van Dijk, A. E., Olthof, M. R., Meeuse, J. C., Seebus, E., Heine, R. J., y van Dam, R. M. (2009). Acute effects of decaffeinated coffee and the major coffee components chlorogenic acid and trigonelline on glucose tolerance. *Diabetes Care*, 32, 1023–1025.
- Velazques, V. (2017). *Evaluación Agro. Morfológica y productiva de 9 cultivares de café arábigo (Coffea arábica l) en el tercer año del cultivo, en el cantón Caluma, provincia Bolívar - Ecuador* (Proyecto de Investigación). Universidad Estatal De Bolívar, Facultad De Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales Y Del Ambiente.
- Wianowska, D., Typek, R., y Dawidowicz, A. L. (2015). Chlorogenic acid stability in pressurized liquid extraction conditions. *Journal of AOAC International*, 98, 415–421.
- Wianowska, D., y Gil, M. (2018). Recent advances in extraction and analysis procedures of natural chlorogenic acids. *Phytochemistry Reviews*, 18(1), 273-3

XII. ANEXOS

A continuación, se presentan los datos originales del estudio recopilados en el proceso de experimentación; los cálculos realizados para el análisis del trabajo de investigación; y el resumen de los datos obtenidos a partir de los cálculos para su interpretación.

A. Datos originales

Cuadro 6. *Volumen y peso de solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C para determinación de su densidad*

Muestra	Volumen (± 0.5 ml)	Peso (± 0.05 g)
1	25.0	24.30
2	25.0	24.30
3	25.0	24.10

Cuadro 7. *Volumen y peso de carbón activado utilizado para el proceso de aislamiento y purificación de ácido 5-cafeoilquínico para determinación de su densidad aparente*

Muestra	Volumen (± 0.5 ml)	Peso (± 0.05 g)
1	25.0	9.41
2	25.0	9.36
3	25.0	9.35

Cuadro 8. *pH de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C*

Muestra	pH (± 0.01)
1	6.62
2	6.53
3	6.57
Media	6.54

Cuadro 9. *Tiempo de flujo de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C en viscosímetro de Ostwald*

Muestra	Tiempo ($\pm 0.01s$)
1	135.15
2	138.45
3	139.51

Cuadro 10. *Tiempo de flujo de la solución de carbón activado y extracto de ácido 5-cafeoiquinico a 60°C en viscosímetro de Ostwald*

Muestra	Tiempo ($\pm 0.01s$)
1	191.88
2	198.14
3	195.01

Cuadro 11. *Peso de producto obtenido a partir de la extracción líquido – líquido con acetato*

Muestra	Peso ($\pm 0.0001g$)
1	0.0669
2	0.0676
3	0.0701
Promedio	0.0682
Desviación estándar	0.0014

Cuadro 12. *Peso de producto obtenido a partir de la adsorción en carbón activado*

Muestra	Peso ($\pm 0.0001g$)
1	0.0746
2	0.0743
3	0.0723
Promedio	0.0737
Desviación estándar	0.0012

Cuadro 13. *Concentración inicial de ácido 5–cafeoilquínico en la solución obtenida a partir del proceso de extracción con agua a 60°C*

Muestra	Concentración de ácido 5-cafeoilquínico (mg/L)
1	576.900
2	603.300
3	556.575
Media	578.925
Desviación estándar	23.428

Cuadro 14. *Concentración de ácido 5–cafeoilquínico en solvente tras extracción líquido – líquido con acetato de etilo*

Muestra	Concentración de ácido 5-cafeoilquínico (mg/L)
1	856.875
2	823.300
3	842.200
Media	840.7912
Desviación estándar	16.832

Cuadro 15. *Concentración de ácido 5–cafeoilquínico presente en solución de etanol utilizada para la desorción del compuesto de interés en el método de aislamiento y purificación a partir de carbón activado*

Muestra	Concentración de ácido 5-cafeoilquínico (mg/L)
1	3273.000
2	3173.400
3	3155.912
Media	3200.771
Desviación estándar	63.131

Cuadro 16. Datos experimentales de equilibrio a 60°C de la concentración de ácido 5-cafeoilquínico en solución de etanol al 96% v/v utilizando distintas concentraciones de carbón activado

Concentración carbón activado en solución (g/L)	Concentración de ácido 5-cafeoilquínico en solución (g/L)
10	0.4284
20	0.3273
30	0.2553
40	0.1977
50	0.1530
60	0.09337
70	0.06810

Cuadro 17. Concentración de cafeína presente en la solución de etanol utilizada para la desorción de ácido 5-cafeoilquínico del carbón activado a 25°C

Concentración etanol (%v/v)	Concentración de cafeína en solución (g/L)
5	0.4423
10	0.8414
30	0.6954
50	0.8002
70	0.0611
90	0.0046
96	0.0002

Cuadro 18. *Datos experimentales a 25°C de la solución de etanol utilizada para la desorción de ácido 5-cafeoilquínico del carbón activado*

Concentración etanol (%v/v)	Concentración de ácido 5-cafeoilquínico en solución (g/L)
5	0.3424
10	0.4217
30	0.5282
50	0.6308
70	1.9453
90	2.2306
96	3.4095

Cuadro 19. Datos de la tubería seleccionada y características del flujo en las diferentes líneas de transporte de fluidos

Línea de flujo	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Flujo másico (kg/h)	1604.25	1741.93	1603.17	229.12	230.20	200.00	30.20
Densidad (kg/m ³)	969.00	937.74	983.13	812.00	812.00	812.00	812.05
Flujo volumétrico (m ³ /h)	1.655	1.983	1.708	0.2821	0.283	0.239	0.043
Flujo volumétrico (gpm)	7.289	8.731	7.518	1.242	1.247	1.056	0.191
Diámetro interno (in)	2.067	2.067	2.067	2.067	2.067	2.067	1.049
Diámetro interno (m)	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0525	0.0266
Área (m ²)	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.0005
Grosor (in)	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.133
Velocidad (m/s)	0.212	0.254	0.219	0.030	0.038	0.030	0.010
Viscosidad (kg/ms)	0.00132	0.00187	0.00047	0.00125	0.0125	0.00125	0.00125
Material	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero	Acero
Cédula No.	40 ST	40 ST	40 ST	40 ST	40 ST	40 ST	40 ST
Largo tubería (m)	5	5	10	3	3	3	3

En este caso, F1 representa el flujo de alimentación de solución de ácido 5-cafeoilquínico extraída a 60°C; F2, el flujo de solución de ácido 5-cafeoilquínico y carbón activado; F3, la solución de agua que fue separada con el filtro; F4, la solución de etanol 96 %v/v que ingresa en el sistema; F5, la solución de etanol 96% v/v y ácido 5-cafeoilquínico que sale del filtro; F6, la solución de etanol que sale del evaporador; y F7, la solución concentrada de ácido 5-cafeoilquínico que ingresa al secador en *spray*.

B. Datos calculados

Cuadro 20. Densidad de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C

Muestra	Densidad (g/ml)
1	0.972 ± 0.0195
2	0.972 ± 0.0195
3	0.964 ± 0.0194
Media	0.969
Desviación estándar	0.004

Cuadro 21. Densidad aparente del carbón activado utilizado para el proceso de aislamiento y purificación

Muestra	Densidad (g/ml)
1	0.476 ± 0.008
2	0.474 ± 0.008
3	0.474 ± 0.008
Media	0.475
Desviación estándar	0.001

Cuadro 22. Viscosidad de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C

Muestra	Viscosidad (± 0.01 cP)
1	1.30
2	1.33
3	1.34
Media	1.32
Desviación estándar	0.02

Cuadro 23. Viscosidad de la solución de carbón activado y extracto de ácido 5-cafeoilquínico a 60°C en viscosímetro de Ostwald

Muestra	Viscosidad (± 0.01 cP)
1	1.84
2	1.90
3	1.87
Media	1.87
Desviación estándar	0.03

Cuadro 24. Capacidad de adsorción del carbón activado determinada a partir de los datos en el equilibrio a 60°C

Concentración carbón activado en solución (g/g)	Capacidad adsorción del carbón activado (g Ácido 5-cafeoilquínico/g carbón)
0.010	0.0150
0.021	0.0126
0.031	0.0108
0.041	0.00953
0.052	0.00852
0.062	0.00809

Cuadro 25. Razón de desorción de ácido 5-cafeoilquínico con solución de etanol a distintas concentraciones a 25°C

Concentración etanol (%v/v)	Razón de desorción (%)
5	9.4617
10	11.6533
30	14.5967
50	17.4323
70	53.7617
80	61.6467
96	94.2284

Cuadro 26. Razón de desorción de cafeína con solución de etanol a distintas concentraciones a 25°C

Concentración etanol (%v/v)	Razón de desorción (%)
5	36.3846
10	69.2154
30	57.2051
50	65.8262
70	5.0262
80	0.3784
96	0.0165

Cuadro 27. Rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico, obtenido a partir de extracción líquido – líquido con acetato de etilo

Muestra	Rendimiento (% g 5CQA / g pulpa)
1	0.2196
2	0.2272
3	0.2104
Media	0.2191
Desviación estándar	0.0084

Cuadro 28. Rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico, obtenido a partir de aislamiento con carbón activado

Muestra	Rendimiento (% g 5CQA / g pulpa)
1	0.2420
2	0.2468
3	0.2439
Media	0.2419
Desviación estándar	0.0050

Cuadro 29. *Parámetros de dimensionamiento de bombas de los distintos flujos volumétricos involucrados en el proceso*

Línea de flujo	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Número de Reynolds	8187.13	6698.79	23867.55	1234.76	856.13	724.89	131.30
Rugosidad relativa	0.00087	0.00087	0.00087	0.00087	0.00087	0.00087	0.00087
Factor de fricción Fanning	0.0081	0.0082	0.0065	0.0129	0.0187	0.0112	0.122
Caída de presión (N/m ²)	829.448	964.266	938.381	29.803	36.261	30.70	5.561
Cabeza dinámica (m)	0.0873	0.1048	0.0987	0.0037	1.713	1.970	0.258
Cabeza estática (m)	- 12.659	-13.014	19.041	6.368	1.096	0.796	1.995
Cabeza total (m)	12.572	12.909	19.135	6.367	2.810	2.766	2.254
Potencia (kW)	0.40	0.41	0.70	0.30	0.24	0.25	0.20
Eficiencia	74%	74%	74%	74%	74%	74%	74%
Potencia real (kW)	0.54	0.54	0.946	0.41	0.32	0.34	0.2
Potencia de diseño (hp)	0.81	0.81	1.42	0.61	0.49	0.51	0.41

En este caso, F1 representa el flujo de alimentación de solución de ácido 5-cafeoilquínico extraída a 60°C; F2 el flujo de solución de ácido 5-cafeoilquínico y carbón activado; F3 la solución

de agua que fue separada con el filtro; F4 la solución de etanol 96 %v/v que ingresa en el sistema; F5 la solución de etanol 96% v/v y ácido 5-cafeoilquínico que sale del filtro; F6 la solución de etanol que sale del evaporador; y F7, la solución concentrada de ácido 5-cafeoilquínico que ingresa al secador en *spray*.

Cuadro 30. *Flujo de calor en el proceso propuesto*

Descripción	Flujo másico (kg/h)	Calor específico (kJ/kg*K)	Calor latente de vaporización kJ/kg	Diferencial de temperatura (K)	Flujo de calor (kJ/h)
Regeneración térmica carbón activado	137.675	1.0875	-	225	33687.4
Evaporación solución etanol.	200	3.4031	1046	53.2	245409
Condensación solución etanol recuperado tras evaporación	200	3.4031	-1046	-53.2	-245409
Nitrógeno para secado por aspersión	501.102	1.0404	-	35	18243.4
Condensación solvente recuperado tras secado por aspersión	29.04	3.4031	-1046	53.2	-35633

Cuadro 31. Prueba de hipótesis de comparación del rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico de los dos métodos de aislamiento evaluados. Con un 95% de confianza

Prueba t para dos muestras		
Descripción	Variable 1	Variable 2
Media	0.24186667	0.21906667
Varianza	2.5013E-05	7.07733E-05
Observaciones	3	3
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	4.03499447	
P(T<=t) una cola	0.1170483	
P(T<=t) dos colas	0.2340966	

Para la prueba de hipótesis, se rechaza la hipótesis nula si el valor P es menor a $\alpha = 0.05$, se rechaza la hipótesis nula a favor de la hipótesis alternativa. Por lo tanto, para la prueba el valor P es mayor a α y se concluye que “no existe evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula” y se puede tomar la media de ambas como igual.

C. Cálculos

Cálculo 1. Determinación de la densidad de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C.

Figura 21. Ecuación básica de densidad

$$\rho = \frac{m}{v}$$

m = masa soluto

ρ = densidad solución

v = volumen solución

(Perry, 1984)

$$\rho = \frac{24.30 \pm 0.05g}{25.0 \pm 0.5mL} = 0.972 \pm 0.020 \frac{g}{mL}$$

Se utilizó el mismo cálculo para todas las soluciones en las que se necesitaba determinar la densidad.

Cálculo 2. Determinación de la viscosidad de la solución obtenida a partir del proceso de extracción de ácido clorogénico a 60°C.

Figura 22. Ecuación básica de viscosidad

$$\mu = Ct * t * \rho$$

Ct = constante viscosímetro de Ostwald

t = tiempo desplazamiento de fluido en viscosímetro de Ostwald

ρ = densidad solución

μ = viscosidad

(Perry, 1984)

$$(0.009896 \pm 0.000015) \frac{mm^2}{s^2} * (135.15 \pm 0.01)s * (0.969 \pm 0.020) \frac{g}{mL} = 1.30 \pm 0.01 cP$$

Se utilizó el mismo cálculo para todas las soluciones en las que se necesitaba determinar la viscosidad.

Cálculo 3. Determinación del rendimiento de ácido 5-cafeoilquínico obtenido a partir de la extracción líquido-líquido con acetato de etilo

$$\% \text{ base seca} = \frac{0.0857 \pm 0.0001 \text{ g } 5CQA}{50.00 \pm 0.05 \text{ g pulpa de café}} = 0.171 \% \left(\frac{\text{g } 5CQA}{\text{g pulpa de café}} \right).$$

Cálculo 4. Determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado.

Figura 23. Ecuación de capacidad de adsorción

$$Q_e = \frac{C_o - C_e}{q}$$

Q_e = capacidad de adsorción

C_o = concentración inicial de ácido 5-cafeoilquínico

q = concentración del adsorbente (carbón activado) en la solución.

(Treybal, 2007)

$$Q_e = \frac{0.000597 \frac{g \text{ } 5CQA}{g} - 0.0000440 \frac{g \text{ } 5CQA}{g}}{0.010 \frac{g \text{ CA}}{g}} = 0.0150 \frac{g \text{ } 5CQA}{g \text{ CA}}$$

Cálculo 5. Determinación flujo másico libre de soluto.

Figura 24. Ecuación de flujo másico libre de soluto

$$L(1 - Y1) = Ls$$

L = flujo másico solución

$Y1$ = concentración soluto en solución

Ls = flujo másico libre de soluto

(Treybal, 2007)

$$Ls = 1604.25 \text{ kg/h} \left(1 - 0.000597 \frac{\text{kg } 5\text{CQA}}{\text{kg solución}} \right) = 1603.29 \text{ kg/h}$$

Cálculo 6. Determinación de la cantidad de carbón activado a utilizar empleando los parámetros de la ecuación de Freundlich obtenidos a partir de la linealización de los datos experimentales de equilibrio de la adsorción de ácido 5-cafeoilquínico a 60°C.

Figura 25. Datos en el equilibrio de adsorción de ácido 5-cafeoilquínico en escala logarítmica

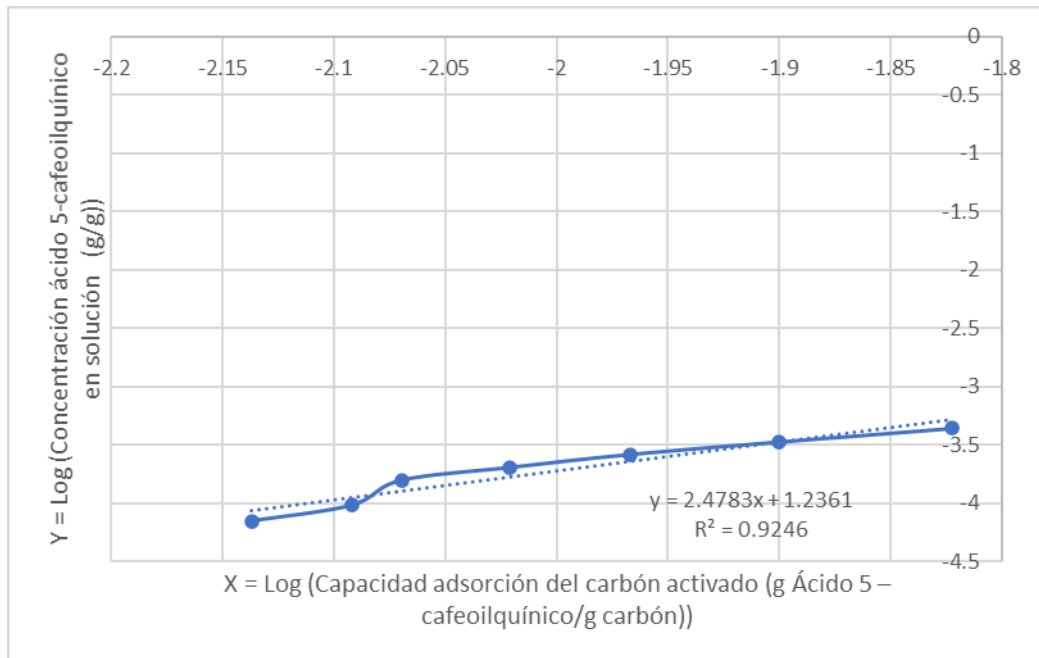


Figura 26. Curva de equilibrio (azul) y operación (verde) para la adsorción de ácido 5-cafeoilquinico

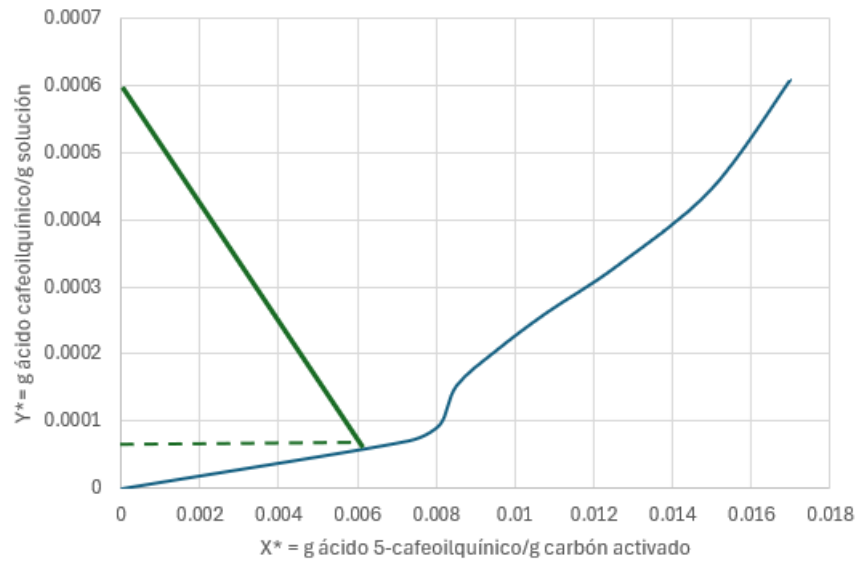


Figura 27. Ecuación de Freundlich

$$Y^* = mX^n$$

Y^* = concentración en el equilibrio de adsorbato en solución

m = constante de Freundlich, capacidad de adsorción

X = concentración adsorbato sobre el adsorbente

n = constante de afinidad adsorbente/soluto adimensional

(Treybal, 2007)

$$Y^* = 17.22X^{2.4783}$$

Figura 28. Diagrama de proceso de adsorción contracorriente para una etapa

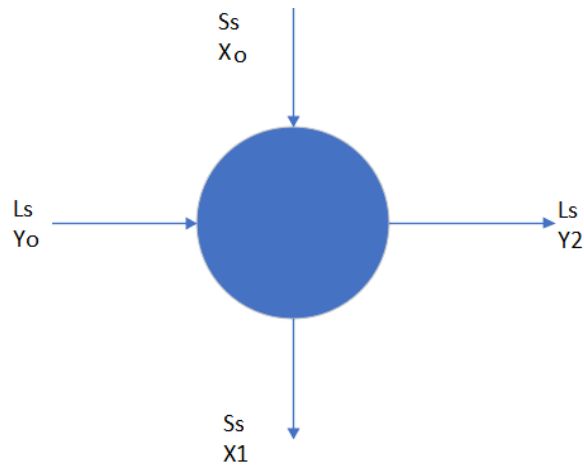


Figura 29. Balance de masa de la etapa de adsorción

$$Ls(Yo - Y1) = Ss(Xo - X1)$$

Debido a que $Xo = 0$ y $X1 = \left(\frac{Y1}{m}\right)^{1/n}$ el balance anterior puede expresarse como

$$\frac{Ss}{Ls} = \frac{Yo - Y1}{\left(\frac{Y1}{m}\right)^{1/n}}$$

Ls = masa sustancia no adsorbida / disolvente

Yo = concentración inicial soluto adsorbable

$Y1$ = concentración final soluto adsorbable

Ss = masa sólido libre de adsorbato

Xo = contenido inicial de adsorbato en adsorbente

$X1$ = contenido final de adsorbato en adsorbente

(Treybal, 2007)

$$\frac{Ss}{Ls} = \frac{0.00006g \frac{5CQA}{gslcn} - 0.00006g \frac{5CQA}{gslcn}}{\left(\frac{0.00006g \frac{5CQA}{gslcn}}{17.2227}\right)^{1/2.4783}} = 0.0858 \frac{g CA}{g disolvente.}$$

$$Ss = 0.0858 \frac{kg CA}{kg disolvente} * 1,603.29 kg disolvente = 137.675 kg carbón activado$$

Cálculo 6. Determinación de la razón de desorción de ácido 5-cafeoilquínico de carbón activado con etanol a distintas concentraciones a 25°C.

Figura 30. Ecuación de la razón de desorción

$$D = \frac{Cd Vd}{CoVo} * 100$$

D = razón de desorción

Cd = concentración de soluto en la solución de desorción

Vd = volumen de solución de desorción

Vo = volumen de solución inicial

Co = concentración inicial de soluto en solución

(Treybal, 2007)

$$D = \frac{\frac{0.3423g}{L}(0.02L)}{\left(\frac{0.5789g}{L}\right)(0.125L)} * 100 = 9.416 \%$$

Cálculo 7. Determinación de la razón de desorción de cafeína de carbón activado con etanol a distintas concentraciones a 25°C.

$$D = \frac{\frac{0.0002g}{L}(0.02L)}{\left(\frac{0.1945g}{L}\right)(0.125L)} * 100 = 0.016 \%$$

Cálculo 8. Determinación de la cantidad de etanol 96% (v/v) requerida para la desorción de ácido clorogénico a partir de la razón de desorción determinada de forma experimental.

$$Vd = 94.23\% * \frac{0.5789 \frac{g}{L} * \frac{1655.73L}{h}}{3.2008 \frac{g}{L}} = 282.164 \frac{L}{h} \text{ etanol } 96\% \left(\frac{v}{v}\right)$$

Cálculo 9. Determinación flujo másico de solución de etanol y ácido 5-cafeoilquínico concentrada.

$$\begin{aligned} \text{Etanol no evaporado} &= 282.164 L \text{ etanol} * \frac{0.812 kg}{1 L} \text{ etanol} - \left(\frac{200kg}{h}\right) \\ &= 29.117 \frac{kg}{h} \text{ etanol no evaporado} \\ 29.117 \frac{kg}{h} \text{ etanol no evaporado} &+ 0.8663 \frac{kg}{h} 5 - CQA \\ &= 29.99 kg \text{ solución concentrada } 5 - CQA \end{aligned}$$

La capacidad de evaporación se determinó a partir de la información técnica proporcionada por la ficha técnica del equipo, y el flujo másico de ácido 5-cafeoilquínico se determinó a partir de la razón de desorción con etanol al 96% (v/v)

Cálculo 10. Determinación de la cantidad de ácido 5-cafeoilquínico recuperado tras proceso de secado por aspersión.

$$0.8663 \frac{kg \ 5 - CQA}{h} * 92\% = 0.80 \frac{kg \ 5 - CQA}{h}$$

El rendimiento del secado por aspersión se estableció en base a los rendimientos experimentales identificados en distintos equipos a escala laboratorio que oscilan entre 90 – 95%.

Cálculo 11. Flujo de calor requerido calentamiento de solución de agua con ácido 5-cafeoilquínico.

Figura 31. Ecuación del flujo de calor

$$Q = m * cp * \Delta t$$

Q = flujo de calor

m = flujo másico

cp = calor específico

Δt = cambio o diferencial de temperatura

(Perry, 1984)

$$Q = 1604.25 \frac{kg}{h} * \frac{4.185 kJ}{kg * K} * (60 - 40)K = 134,276 kJ$$

Cálculo 12. Determinación de calor específico solución de etanol 96% (v/v)

Figura 32. Ecuación básica calor específico del etanol

$$Cp_{sol} = 5.16765 - 0.0026108T - 3.80691x_1 - 0.00469903x_1^3T + 35.1179 * 10^{-6}x_1T^2$$

Cp_{sol} = calor específico solución

x_1 = fracción molar etanol

T = temperatura

$$\begin{aligned} Cp_{sol} = & 5.16765 - 0.0026108 - 3.80691 \left(\frac{0.93 kg \text{ etanol}}{kg \text{ slcn}} \right) \\ & - 0.00469903(354.35K) \left(\frac{0.93 kg \text{ etanol}}{kg \text{ slcn}} \right)^3 + 35.1179 \\ & * 10^{-6} \left(\frac{0.93 kg \text{ etanol}}{kg \text{ slcn}} \right) - (354.35K)^2 = 3.4031 \frac{kJ}{kg * K} \end{aligned}$$

Cálculo 13. Flujo másico de vapor requerido para vaporización

Figura 33. Ecuación del flujo másico de vapor

$$Q = m * L$$

(Perry, 1984)

$$m = \frac{Q}{L} = \frac{245408.7 \text{ kJ/h}}{2260 \text{ kJ/kg}} = \frac{108.59 \text{ kg}}{h}$$

Cálculo 14. Flujo másico de nitrógeno necesario para el secado por aspersión.

Figura 34. Ecuación del flujo másico de nitrógeno

$$m_{gas} = \frac{m_{sol}}{R_{min}}$$

m_{sol} = flujo másico solución

m_{gas} = flujo másico gas utilizado

R_{min} = relación mínima flujo másico solución – gas

(Perry, 1984)

$$m_{gas} = \frac{m_{sol}}{R_{min}} = \frac{\frac{30.20 \text{ kg}}{h}}{0.06} = \frac{503.33 \text{ kg}}{h}$$

Cálculo 15. Determinación de número de Reynolds para el flujo de la solución de ácido 5-cafeoilquinico y agua hacia tanque de mezcla.

Figura 35. Ecuación del Número de Reynolds

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{D_{iR} * V_R * \rho}{\mu}$$

D_i = diámetro real tubería

V_r = velocidad real

ρ = densidad

μ = viscosidad

(Perry, 1984)

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{(0.05250m)(0.26m/s)(969 \text{ kg/m}^3)}{0.00132 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 8.19 \times 10^3$$

Para este cálculo, se hizo uso del diámetro interior real de la tubería, el cual se obtuvo de la Figura 47 localizada en la página 84.

Cálculo 16. Rugosidad relativa en tubería de acero estándar.

Figura 36. Ecuación de la rugosidad relativa

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{k}{D_{iR}}$$

D_{iR} = diámetro tubería

k = constante de rugosidad

(Perry, 1984)

$$\text{Rugosidad Relativa} = \frac{0.00005m}{0.05250m} = 0.0009$$

Debido a que el material de la tubería a manejar será de acero, la constante de rugosidad (k) es de 0.00005m, misma que se encontró en la Figura 48.

Cálculo 17. Determinación de largo asociado de accesorios.

Figura 37. Ecuación del largo asociado de los accesorios

$$\text{Largo Asociado de Accesorios} = D_{iR} * D_{eq.T}$$

$D_{eq.T}$ = diámetro equivalente total

(Perry, 1984)

$$\text{Largo Asociado de Accesorios} = 0.05250m * 395 = 20.738m$$

El diámetro equivalente total de accesorios en la tubería se obtuvo a partir de los datos que se encuentran en la Figura 49.

Cálculo 18. Largo total de tubería.

Figura 38. Ecuación del largo asociado de los accesorios

$$\text{Largo Total de Tubería} = L_{Sin \text{ Accs.}} + L_{As.Accs.}$$

(Perry, 1984)

$$\text{Largo Total de Tubería} = 10.0000m + 20.7382m = 30.7382m$$

Cálculo 19. Caída de presión en tubería de acero estándar.

Figura 39. Ecuación de caída de presión en tuberías de acero estándar

$$\Delta P_f = 8f \left(\frac{L}{D_i} \right) \frac{\rho V_r^2}{2}$$

ΔP_f = caída de presión en tubería

f = factor de fricción de Fanning

L = largo total de tubería

D_i = diámetro de tubería

V_r = velocidad real

ρ = densidad real

(Perry, 1984)

$$\Delta P_f = 8(0.0081) \left(\frac{30.73m}{0.0520m} \right) \frac{(969kg/m^3)(0.212m/s)^2}{2} = 829.44N/m^2$$

Es importante mencionar que el factor de fricción de Fanning se obtuvo de la lectura en el eje izquierdo (tras la intersección de las líneas del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería de acero estándar) de la Figura 48.

Cálculo 20. Determinación de cabeza dinámica para bomba de entrada de la columna del sistema natural.

$$\frac{829.44N}{m^2} * \frac{1m^3}{969kg} * \frac{1s}{9.81m} = 0.0873m$$

Para este cálculo, se consideró la caída de presión en la tubería calculada, y se multiplicó por la densidad del fluido y la gravedad para realizar la conversión de N/m^2 a m.

Cálculo 21. Determinación de cabeza estática para la bomba de desplazamiento del flujo de la solución de ácido 5-cafeoilquínico y agua hacia tanque de mezcla.

Figura 40. Ecuación cambio de altura en tanque

$$dH = H_2 - H_1$$

H_1 = altura origen

H_2 = altura destino

(Perry, 1984)

$$dH = (1.50 - 5)m = -3.5 \text{ m}$$

Figura 41. Ecuación cambio de presión en tanque

$$dP = P_2 - P_1$$

P_1 = presión origen

P_2 = presión destino

(Perry, 1984)

$$dP = (14258.53 - 101325)Pa \text{ abs}$$

$$dP = -87066.17 Pa \text{ abs}$$

$$\text{Cabeza estática} = (-3.50 - 9.15)m = -12.66$$

Cálculo 22. Determinación de cabeza total de bomba de entrada de la columna del sistema natural.

Figura 42. Ecuación determinación cabeza total de bomba

$$\text{Cabeza total} = \text{Cabeza dinámica} + \text{cabeza estática}$$

(Perry, 1984)

$$\text{Cabeza total} = |(0.087 + (-12.572))|m = 12.57 \text{ m}$$

Cálculo 23. Determinación de área requerida de filtración para el flujo de mezcla carbón activado con la solución de ácido 5-cafeoilquínico.

Figura 43. Ecuación para el escalamiento de la tasa de filtración

$$\text{Tasa de filtración} = 1.3138 \text{ gpm}/m^2 * 0.8 \text{ (factor de escalamiento)}$$

(Perry, 1984)

$$\text{Tasa de filtración} = 1.05104 \text{ gpm}/m^2$$

$$\text{Área de filtración} = 8.73 \text{ gpm} * \frac{1m^2}{1.05104 \text{ gpm}} = 8.3061 m^2$$

D. Análisis de error

Cálculo 23. Media del pH final de la solución extraída de ácido 5-cafeoilquínico a 60°C.

Figura 44. Ecuación de la media aritmética

$$\bar{x} = \frac{\sum X_i}{n}$$

$\sum X_i$ = sumatoria de los datos

n = el número de datos

(Mendenhall et al., 2010)

$$\bar{x} = \frac{(6.62 + 6.53 + 6.57)}{3} = 6.54$$

Cálculo 24. Desviación estándar del pH de la solución extraída de ácido 5-cafeoilquínico a 60°C.

Figura 45. Ecuación de la desviación estándar

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$s = \sqrt{\frac{(6.54 - 6.62)^2 + (6.54 - 6.53)^2 + (6.574 - 6.57)^2}{3 - 1}} = 0.04$$

XIII. INFORMACIÓN ADICIONAL

A continuación, se proporcionan datos complementarios y referencias que enriquecen el análisis principal del estudio. Esta sección incluye tablas detalladas, gráficos, y documentos relevantes que no se presentaron en el cuerpo principal, pero que son esenciales para una comprensión más profunda de los temas discutidos.

Figura 46. *Resultado de la prueba cualitativa de cloruro férrico*



Figura 47. Relaciones entre el tamaño de la tubería, la velocidad volumétrica del flujo y la velocidad del fluido

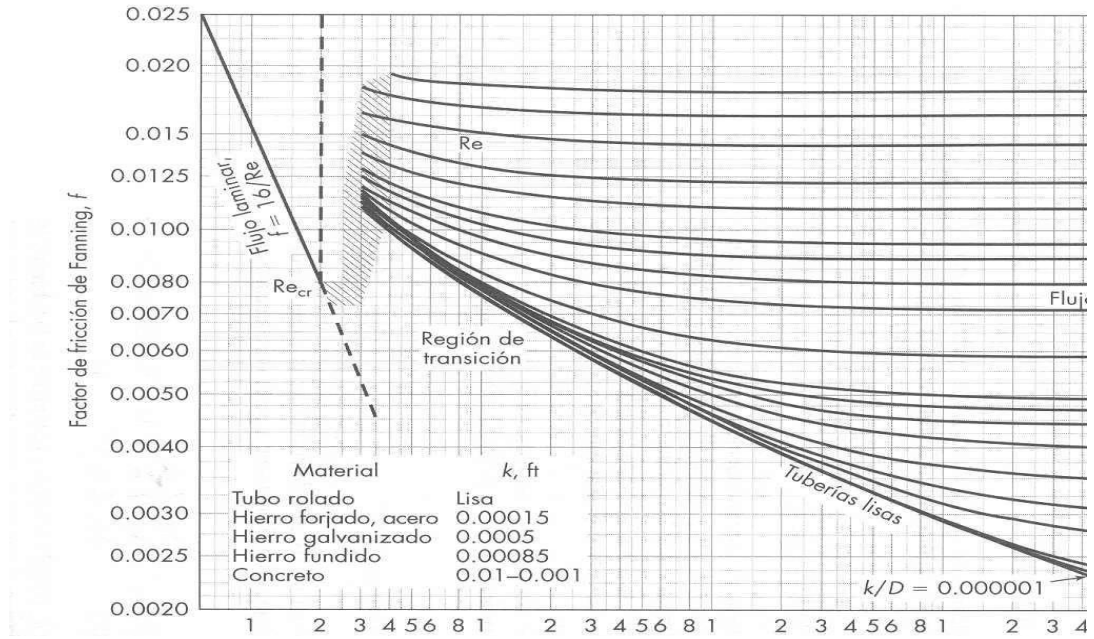
Dimensiones, capacidades y pesos de tuberías estándar de acero[†]

Tamaño nominal de tubería, in.	Diámetro exterior, in.	Número de células	Espesor de pared, in.	Diámetro interior, in.	Área de la sección transversal del metal, in. ²	Área de la sección interior, ft ²	Circunferencia, ft, o superficie, ft ² /ft de longitud		Capacidad para la velocidad de 1 ft/s		Peso de la tubería, lb/ft
							Exterior	Interior	U.S. gal/min	Agua, ft ³ /h	
1/8	1.005	40	0.068	0.269	0.072	0.00040	0.106	0.0705	0.179	89.5	0.24
		80	0.095	0.215	0.093	0.00025	0.106	0.0563	0.113	56.5	0.31
1/4	1.540	40	0.088	0.364	0.125	0.00072	0.141	0.095	0.373	161.5	0.42
		80	0.119	0.302	0.157	0.00050	0.141	0.079	0.224	112.0	0.54
3/8	1.675	40	0.091	0.493	0.167	0.00133	0.177	0.129	0.596	298.0	0.57
		80	0.126	0.423	0.217	0.00098	0.177	0.111	0.440	220.0	0.74
1/2	1.840	40	0.109	0.622	0.250	0.00211	0.220	0.163	0.945	472.0	0.85
		80	0.147	0.546	0.320	0.00161	0.220	0.143	0.730	365.0	1.09
3/4	1.050	40	0.113	0.824	0.335	0.00371	0.275	0.216	1.665	832.5	1.13
		80	0.154	0.742	0.433	0.00300	0.275	0.194	1.345	672.5	1.47
1	1.315	40	0.133	1.049	0.494	0.00600	0.344	0.275	2.690	1.345	1.68
		80	0.179	0.957	0.639	0.00499	0.344	0.250	2.240	1.120	2.17
1 1/8	1.660	40	0.140	1.380	0.668	0.01040	0.435	0.361	4.57	2.285	2.27
		80	0.191	1.278	0.881	0.00891	0.435	0.335	3.99	1.995	3.00
1 1/4	1.900	40	0.145	1.610	0.800	0.01414	0.497	0.421	6.34	3.170	2.72
		80	0.200	1.500	1.069	0.01225	0.497	0.393	5.49	2.745	3.63
2	2.375	40	0.154	2.067	1.075	0.02330	0.622	0.541	10.45	5.225	3.65
		80	0.218	1.939	1.477	0.02050	0.622	0.508	9.20	4.600	5.02
2 1/2	2.875	40	0.203	2.469	1.704	0.03322	0.753	0.647	14.92	7.460	5.79
		80	0.276	2.323	2.254	0.02942	0.753	0.608	13.20	6.600	7.66
3	3.500	40	0.216	3.068	2.228	0.05130	0.916	0.803	23.00	11.500	7.58
		80	0.300	2.900	3.016	0.04587	0.916	0.759	20.55	10.275	10.25
3 1/2	4.000	40	0.226	3.548	2.680	0.06870	1.047	0.929	30.80	15.400	9.11
		80	0.318	3.364	3.676	0.06170	1.047	0.881	27.70	13.850	12.51
4	4.500	40	0.237	4.026	3.17	0.08840	1.178	1.054	39.6	19.800	10.79
		80	0.337	3.826	4.41	0.07986	1.178	1.002	35.8	17.900	14.98
5	5.563	40	0.258	5.047	4.30	0.1390	1.456	1.321	62.3	31.150	14.62
		80	0.375	4.813	6.11	0.1263	1.456	1.260	57.7	28.850	20.78
6	6.625	40	0.280	6.065	5.58	0.2006	1.734	1.588	90.0	45.000	18.97
		80	0.432	5.761	8.40	0.1810	1.734	1.508	81.1	40.550	26.57
8	8.625	40	0.322	7.981	8.396	0.3474	2.258	2.089	155.7	77.850	26.55
		80	0.500	7.625	12.76	0.3171	2.258	1.996	142.3	71.150	43.39
10	10.75	40	0.365	10.020	11.91	0.5475	2.814	2.620	246.0	123.000	40.48
		80	0.594	9.562	18.95	0.4987	2.814	2.503	223.4	111.700	64.40
12	12.75	40	0.406	11.938	15.74	0.7773	3.338	3.13	349.0	174.500	53.56
		80	0.688	11.374	26.07	0.7056	3.338	2.98	316.7	158.350	88.57

[†]Basado en ANSI B36.10-1970, con autorización de ASME.

(McCabe, 2007)

Figura 48. Factor de fricción para tuberías circulares



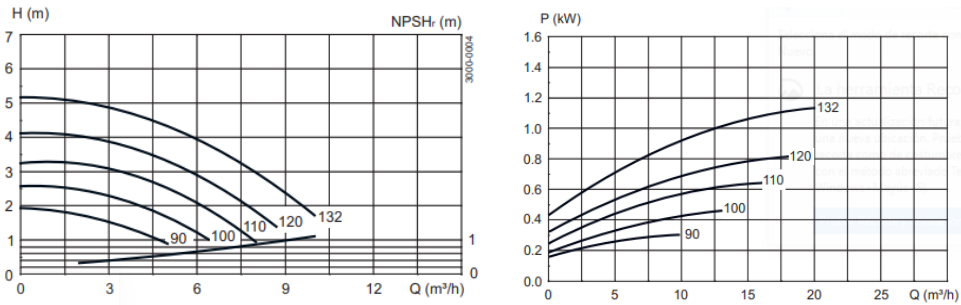
(Adaptado de L. W. Moody, "Friction Factors for Pipe Flow", Trans. ASME 66:672 [1944])

Figura 49. *Pérdida de presión en accesorios de tuberías y válvulas en flujos turbulentos*

Fitting or Valve	K, Number of Velocity Heads	Number of Equivalent Pipe Diameters
45° standard elbow	0.35	15
45° long radius elbow	0.2	10
90° standard radius elbow	0.6–0.8	30–40
90° standard long elbow	0.45	23
90° square elbow	1.5	75
Tee-entry from leg	1.2	60
Tee-entry into leg	1.8	90
Union and coupling	0.04	2
Sharp reduction (tank outlet)	0.5	25
Sudden expansion (tank inlet)	1.0	50
Gate valve		
fully open	0.15	7.5
1/4 open	16	800
1/2 open	4	200
3/4 open	1	40
Globe valve, bevel seat-		
fully open	6	300
1/2 open	8.5	450
Globe valve, plug disk-		
fully open	9	450
1/2 open	36	1800
1/4 open	112	5600
Plug valve - open	0.4	18

(McCabe, 2007)

Figura 50. *Curvas características utilizadas para determinar la potencia de los sistemas de bombeo*



Performance Curves

Alfa Laval LKH-5, 50 Hz

Motor: **3000 rpm. synchron.**
 Tolerance: **±5%**
 Impeller, Max. dia.: **132 mm**
 Impeller, Min. dia.: **90 mm**
 Pump inlet, Dia.: **51 mm, DN 50**
 Pump outlet, Dia.: **38 mm, DN 40**

Motor: **1500 rpm. synchron.**
 Tolerance: **±5%**
 Impeller, Max. dia.: **132 mm**
 Impeller, Min. dia.: **90 mm**
 Pump inlet, Dia.: **Dia.: 51 mm, DN 50**
 Pump outlet, Dia.: **Dia.: 38 mm, DN 40**

Performance data refer to water at 20 °C.

Performance data refer to water at 20 °C.

NOTE! The curves refer to motor: 1.5 kW, 2870 rpm. asynchron., 50 Hz. For smaller motors, reduce head (H) with: 3%.

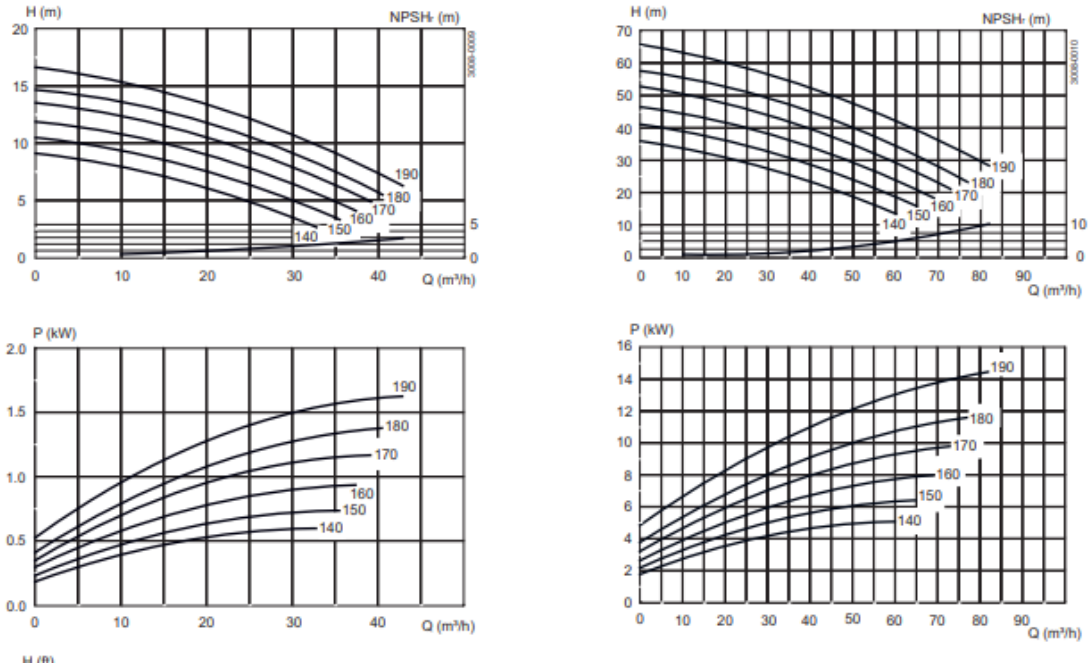
NOTE! The curves refer to motor: 1.1 kW, 1410 rpm. asynchron., 50 Hz. For smaller motors, reduce head (H) with: 3%.

DO NOT FORGET THE SAFETY FACTOR.

DO NOT FORGET THE SAFETY FACTOR.

(Alfa Laval, s.f.)

Figura 51. *Curvas características utilizadas para determinar la potencia de los sistemas de bombeo*



Performance Curves			
Alfa Laval SolidC-2, 60 Hz			
Motor:	1800 rpm. synchron.	Motor:	3600 rpm. synchron.
Tolerance:	3600 rpm. synchron. ±8% for Q ±6% for H	Tolerance:	±8% for Q ±6% for H
Impeller, Max. dia.:	190 mm	Impeller, Max. dia.:	190 mm
Impeller, Min. dia.:	7.48" 140 mm	Impeller, Min. dia.:	140 mm
Pump inlet, Dia.:	5.51" 63.5 mm, DN 65	Pump inlet, Dia.:	63.5 mm, DN 65
Pump outlet, Dia.:	2 1/4", DN 65 38 mm, DN 40 1 1/2", DN 40	Pump outlet, Dia.:	38 mm, DN 40
Performance data refer to water at 20 °C.		Performance data refer to water at 20 °C.	
Performance data refer to water at 68 °F.		NOTE!	
NOTE! The curves refer to motor: 2.7 kW, 1710 rpm. asynchr., 60 Hz. For smaller motors, reduce head (H) with: 3%.		The curves refer to motor: 18 kW, 3535 rpm. asynchr., 60 Hz. For smaller motors, reduce head (H) with: 3%.	
NOTE! The curves refer to motor: 22.8 Hp, 3535 rpm. asynchr., 60 Hz. For smaller motors, reduce head (H) with: 3%.			
DO NOT FORGET THE SAFETY FACTOR.		DO NOT FORGET THE SAFETY FACTOR.	

(Alfa Laval, s.f.)

Figura 52. Curva de calibración de cafeína determinada con equipo HPLC

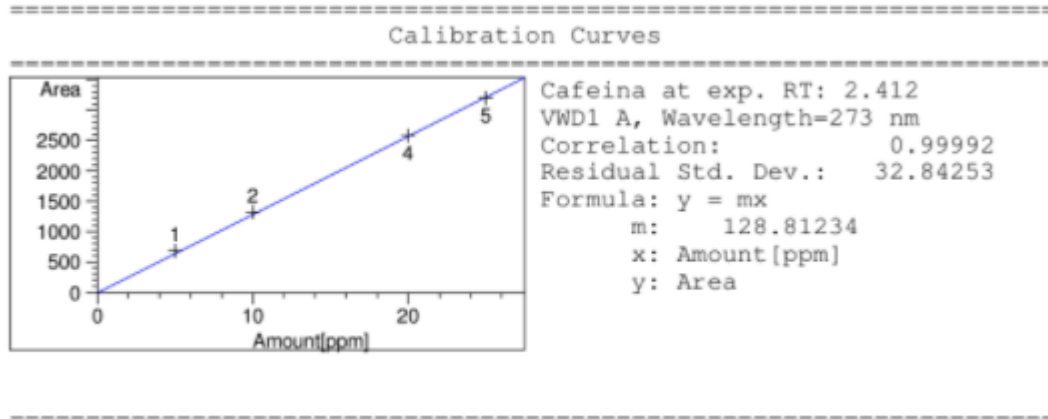


Figura 53. Curva de calibración del ácido 5-cafeoilquínico determinada con equipo HPLC

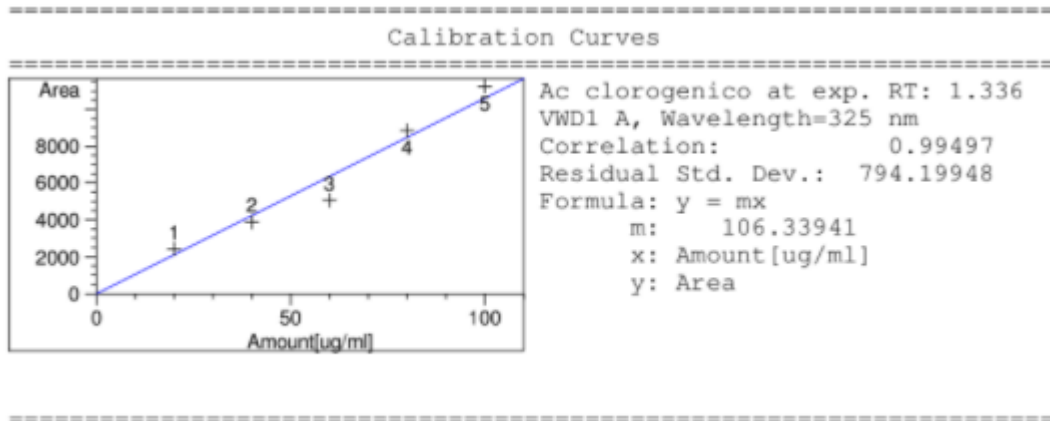


Figura 54. Información técnica del equipo de filtración y secado por agitación Nutsche

TECHNICAL DATA FOR AGITATED NUTSCHE FILTER DRYER (ANFD)													
	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW	BEW
MODEL NO.	ANFD-1	ANFD-2	ANFD-5	ANFD-10	ANFD-20	ANFD-30	ANFD-40	ANFD-50	ANFD-60	ANFD-80	ANFD-100	ANFD-150	ANFD-180
WORKING CAPACITY (LITS)	100	200	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000	15000	19000
FILTRATION AREA (M ²)	0.2	0.28	0.78	1.1	2	3.1	4.1	5	6.1	8	10.1	12.5	15.9
AGITATOR (R.P.M.)	12	12	10	10	8 TO 10	8 TO 10	8 TO 9	8 TO 9	6 TO 8	6 TO 8	6 TO 8	6 TO 8	6 TO 8
MAIN MOTOR (H.P.)	2	3	5	5	7.5	10	12.5	20	25	30	30	40	40
POWER PACK MOTOR (H.P.)	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
VERTICAL STROKE (MM)	200	200	300	300	300	300	350	350	400	400	400	500	500
CAKE CAPACITY (LITS)	40	55	230	330	600	940	1450	1700	2450	3200	4050	6250	7950
A (MM)	500	600	1000	1200	1600	2000	2300	2500	2800	3200	3600	4000	4500
B (MM)	600	700	800	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1100	1200	1200	1200
C (MM)*	2600	3000	3300	3800	4200	4400	4600	4700	4800	5000	5300	5800	6000