

Obtención de extractos antioxidantes de cáscara de café (*Coffea arabica* var. Cenicafé 1) mediante un proceso secuencial de extracción con CO₂ supercrítico y líquidos presurizados (PLE)

Laura Castro-Molina, Laura Enriquez-Jojoa, Camilo Pardo-Castaño, Rubén Camargo-Amado.

Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Química, CL. 13 100-00, Cali, Colombia.

Material suplementario

Este documento presenta información suplementaria correspondiente a el pretratamiento de la materia prima, los métodos de extracción, el análisis estadístico, la búsqueda bibliográfica sobre la aplicabilidad industrial de los extractos obtenidos a partir de la cáscara de café, así como el análisis técnico y financiero preliminar del proceso. Estos datos amplían y respaldan los resultados presentados en el artículo, proporcionando un soporte adicional para la interpretación de los hallazgos experimentales y la evaluación de la prefactibilidad del proceso.

Autor correspondiente.

Dirección email: camilo.pardo@correounivalle.edu.co

A. Pretratamiento

A1. Molienda y tamizado

La cáscara seca fue triturada empleando un molino de cuchillas y posteriormente tamizada utilizando mallas Tyler de diferentes aperturas (12, 14, 18, 20, 25, 30, 100, 170 y 200). Como resultado, se obtuvieron tres fracciones con tamaños de partícula promedio de 1335 µm, 713 µm y 100 µm, respectivamente. En la Tabla A1 se presentan los valores de tamaño y promedio geométrico de partícula correspondientes a cada rango de malla empleado.

Tabla A1. Tamaño de partícula promedio según la malla Tyler utilizada.

Malla	Tamaño (µm)	P. geométrico (µm)
12	1700	1335
14	1400	
18	1000	
20	850	713
25	710	
30	600	
100	150	100
170	90	
200	75	

B. Método de extracción

B1. Rendimiento ScFE

El rendimiento de extracción obtenido con ScFE se calculó empleando la Ecuación B1, que expresa el porcentaje resultante de la relación entre la masa de extracto seco recuperado y la masa seca de la muestra utilizada en el proceso de extracción:

$$Y(\%) = \frac{\text{masa de extracto seco}}{\text{masa de MP seca}} \times 100 \quad (\text{EC.B1})$$

El rendimiento máximo alcanzado en este proceso fue de 2.11 %, obtenido tras una hora de extracción a una temperatura de 50 °C y una presión de 300 bar.

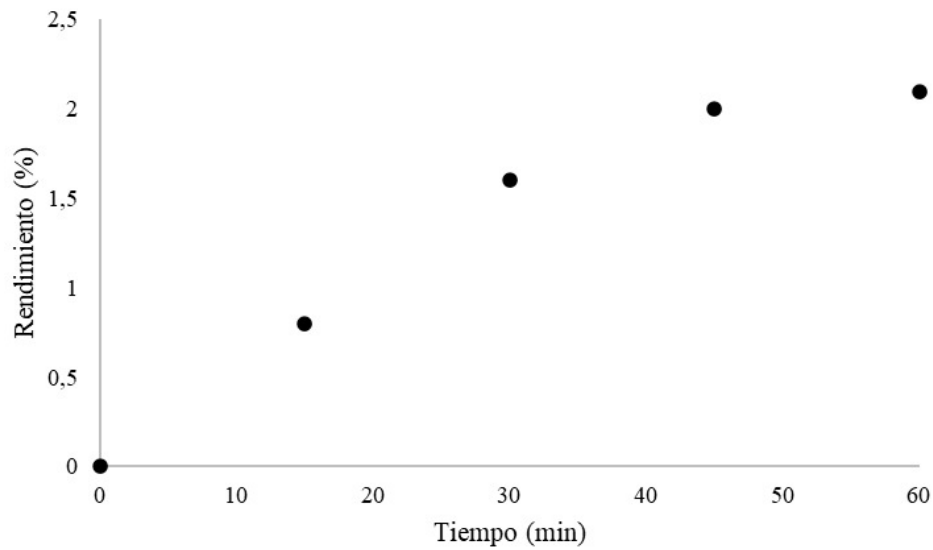


Figura B1. Curva de rendimiento para ScFE

B2. Tiempo de extracción líquidos presurizados

El tiempo operativo de PLE se determinó bajo condiciones de 80 °C, 2500 psi, utilizando agua como solvente y un tamaño de partícula grande. Durante el proceso, se observó un cambio en la coloración del extracto, pasando de un tono rojizo a uno amarillo pálido, casi incoloro, conforme avanzó el tiempo de extracción (Figura B2). Este cambio de color evidencia una disminución en la solubilización de compuestos de la matriz y sugiere que, a partir de ese punto, la extracción ha alcanzado un nivel de saturación, por lo que el proceso debe detenerse para evitar un consumo innecesario de energía y solvente



Figura B2. Variación del color de las muestras durante la extracción PLE

C. Modelamiento curvas de rendimiento

C1. Modelo basado en la teoría BET

El modelo basado en la teoría BET propuesto por Pardo-Castaño et al. [1] se empleó para describir las curvas de rendimiento obtenidas durante la extracción de compuestos bioactivos de la cáscara de café mediante líquidos presurizados. Este modelo, fundamentado en la teoría de adsorción de Brunauer–Emmett–Teller (BET), permite expresar el rendimiento de extracción en función del tiempo a partir de tres parámetros ajustables, cada uno con un significado físico claramente definido. Las Ecuaciones C1 a C12 presentan las formulaciones matemáticas asociadas a este modelo.

$$t = \frac{m_o}{2m_f y^*} \{x'_0 - x' + (2 - K)\} \left[x - x_m \ln \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \right] + K x_m \ln \left[\frac{\alpha'}{\beta'(1-x)^2} \right] \quad (C1)$$

Donde:

$$x'_0 = \sqrt{a + b + c} \quad (C2)$$

$$x' = \sqrt{a(1-x)^2 + b(1-x) + c} \quad (C3)$$

$$a = K^2 \quad (C4)$$

$$b = 2(2 - K)Kx_m \quad (C5)$$

$$c = (Kx_m)^2 \quad (C6)$$

$$\alpha = x' + K(1 - x) + (2 - K)x_m \quad (C7)$$

$$\alpha' = x' + (2 - K)(1 - x) + Kx_m \quad (C8)$$

$$\beta = x'_0 + K + (2 - K)x_m \quad (C9)$$

$$\beta' = x'_0 + (2 - K) + Kx_m \quad (C10)$$

$$y^* = y_{sat} \left[1 - \exp \left(\frac{kL}{uc} \right) \right] \quad (C11)$$

$$k = (1 - \varepsilon)a_{sf}k_{sf} \quad (C12)$$

Donde x es el cociente entre la masa de soluto extraído al tiempo t y la masa del soluto extraíble presente inicialmente en el lecho empacado; m_o es la masa inicial de soluto extraíble en el lecho empacado; m_f es el flujo másico de solvente; y_{sat} es la fracción de masa del soluto en una fase saturada de solvente; L es el longitud del extractor; u es la velocidad intersticial del solvente; a_{sf} es el área de contacto efectivo para transferencia de masa sólido-fluido; k_{sf} es el coeficiente de transferencia de masa para el transporte del soluto a través de la capa externa del fluido alrededor de las partículas sólidas; y^* está relacionado con la solubilidad del soluto en el solvente corregido por las limitaciones difusionales, x_m con la masa del soluto en la primera monocapa y K con el radio entre las constantes de equilibrio del soluto en la primera monocapa y las subsecuentes; estos tres últimos términos son los parámetros ajustables del modelo con su respectivo significado fenomenológico.

C2. Correlación del modelo de Pardo-Castaño a los datos experimentales obtenidos por PLE

La Tabla C1 presenta los parámetros ajustables del modelo usado para correlacionar los datos de extracción de compuestos bioactivos a partir de la cáscara de café mediante líquidos presurizados. Para el ajuste del modelo a los datos experimentales, se utilizó un único valor de x_m , dado que este parámetro no depende significativamente de las condiciones operativas, sino que constituye una propiedad característica del sistema sólido-soluto [1].

Tabla C1. Parámetros ajustables del modelo de Pardo-Castaño a los datos experimentales de este estudio.

Corrida #	Patrón	Condiciones de operación				Parámetros del modelo		
		T (°C)	P (bar)	Cet (%v/v)	Tp (μm)	Xm	K	$y^* \times 10^3$
1	0	60	1750	50	712.76		3883.22	51.18
2	+--+	80	1000	0	1335.14		4517.18	84.31
3	0	60	1750	50	712.76		4815.82	52.25
4	+--+	80	1000	100	100		7888.18	70.95
5	0	60	1750	50	712.76		4837.47	52.70
6	++++	80	2500	100	1335.14	0.591	2430.16	33.13
7	----	40	1000	0	100		5.45	294.38
8	++--	80	2500	0	100		444.35	90.80
9	-++-	40	2500	100	100		13.81	308.58
10	-+-+	40	2500	0	1335.14		3795.95	54.32
11	--++	40	1000	100	1335.14		4561.76	132.83

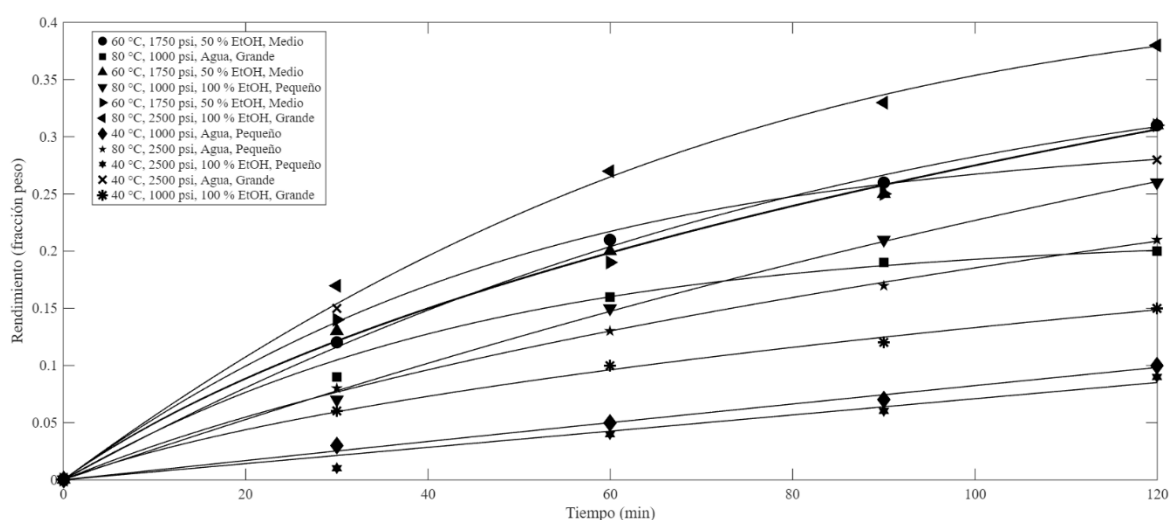


Figura C1. Curvas de rendimiento de extracción de cáscara de café mediante PLE con mezclas de etanol y agua. Los puntos representan los datos experimentales y las líneas continuas la correlación (AARD = 3.78%) usando el modelo propuesto por Pardo-Castaño et al. [1]

Como se observa en la Figura C1, la cinética de extracción en PLE presenta tres etapas características. La primera corresponde a un período de tasa de extracción constante, asociado a la rápida remoción de los compuestos fácilmente accesibles en la superficie de la matriz. Posteriormente, se desarrolla un período de disminución de la velocidad de extracción, durante el cual el disolvente extrae gradualmente los compuestos localizados en los poros internos. Finalmente, se alcanza una etapa de tasa controlada por difusión, en la que la liberación de los compuestos está limitada por su difusión desde el interior de la matriz hacia la superficie, reduciendo de manera significativa la velocidad de extracción [2].

D. Análisis estadístico de las variables de respuesta

D1. Análisis de varianza (ANOVA)

La Tabla B1 presenta el resumen de efectos significativos obtenidos para los dos modelos luego de incorporar el término cuadrático y eliminar la interacción no significativa T*P del modelo inicial (Tabla 3). Se observa que todos los factores y sus interacciones presentan valores $p < 0.05$, lo que indica que influyen significativamente sobre la respuesta global del proceso de extracción. Los factores con mayor impacto estadístico fueron la temperatura (T) y su término cuadrático (T*T), seguidos por la interacción T*CET, lo que confirma la fuerte dependencia del rendimiento y la capacidad antioxidante con respecto a la temperatura y la composición del disolvente. La inclusión del término cuadrático se justifica por su impacto sobre las variables de respuesta reportado en la literatura sobre sistemas de extracción [3]. También, los factores presión (P) y tamaño de partícula (TP) mostraron efectos significativos, aunque en menor magnitud, evidenciando que ambos parámetros también contribuyen al comportamiento del sistema.

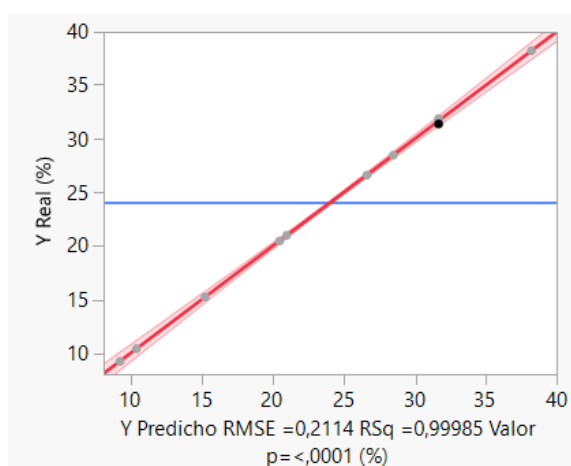
Tabla D1. Resumen de efectos para los cuatro modelos agregando un término cuadrático.

Factor	Valor p
T*T	0.00001
T	0.00001
T*CET	0.00001
TP	0.00001
P	0.00003
T*TP	0.00021
CET	0.00064

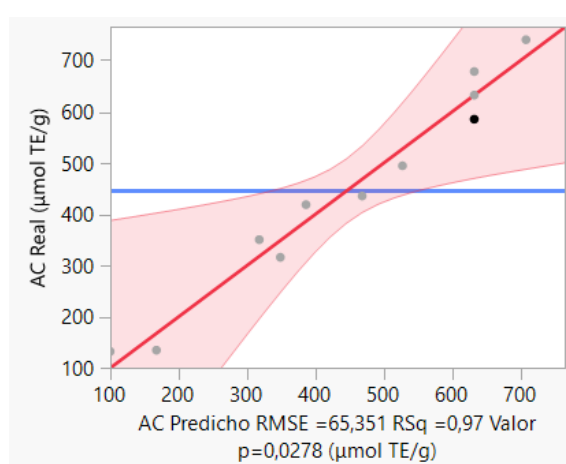
La Figura D1 presenta los gráficos de ajuste entre los valores experimentales y los valores predichos por los modelos para el rendimiento (Y) y la capacidad antioxidante (AC). En ambos casos, se observa

una alta correlación lineal entre los datos reales y los estimados, evidenciando la precisión y confiabilidad de los modelos obtenidos. La estrecha proximidad de los puntos a la línea de tendencia y la reducida dispersión observada en los intervalos de confianza (zonas sombreadas en rojo) reflejan un bajo nivel de error y una alta capacidad predictiva. Estos resultados demuestran que los modelos ajustados representan adecuadamente el comportamiento experimental del proceso de extracción, permitiendo predecir de manera confiable el rendimiento y la capacidad antioxidante bajo las condiciones operativas estudiadas en este artículo. Es importante resaltar que la capacidad predictiva del modelo se encuentra limitada al espacio experimental evaluado, por lo que, las predicciones fuera de los rangos estudiados pueden no reflejar el comportamiento real del sistema.

La Figura D2 presenta el perfilador de predicción obtenido a partir de los modelos ajustados, donde se observa el efecto individual de cada variable sobre las respuestas: rendimiento (Y) y capacidad antioxidante (AC). Los modelos permiten identificar las condiciones que maximizan simultáneamente ambas respuestas dentro del espacio experimental estudiado. En la gráfica se evidencia que el rendimiento de extracción aumenta de manera pronunciada con la temperatura (T), alcanzando su punto máximo alrededor de los 60 °C, mientras que la presión (P) muestra un efecto positivo menos marcado dentro del rango evaluado. Por su parte, la composición de etanol (CET) muestra poca influencia directa sobre las variables de respuesta. En cuanto al tamaño de partícula (TP), se observa una ligera mejora en ambas respuestas cuando se emplean partículas más grandes.



(a)



(b)

Figura D1. Correlación de datos experimentales con los modelos. (a) Rendimiento, (b) Capacidad antioxidante.

Dado que las ecuaciones de búsqueda iniciales no arrojaron información suficiente sobre la aplicación directa de los extractos obtenidos en las industrias mencionadas, se optó por realizar un nuevo enfoque de búsqueda basado en los principales compuestos bioactivos identificados en el extracto, principalmente cafeína y ácido clorogénico. En esta segunda búsqueda se mantuvieron los mismos criterios de delimitación descritos anteriormente, incluyendo el uso de operadores booleanos (AND, OR, NOT) y de truncamiento (*), además del uso de palabras clave en inglés para mejorar la precisión de los resultados. Sin embargo, se excluyó la tecnología de extracción, ya que en este caso se consideraron extractos obtenidos tanto de otras partes del café como de diferentes tecnologías, y se restringió la búsqueda exclusivamente a la industria cosmética, con el propósito de concentrar el análisis en aplicaciones dentro de este sector. Adicionalmente, se limitó el rango temporal a publicaciones posteriores al año 2018, con el fin de garantizar la actualidad y relevancia de la información recopilada. Por tanto, en las Tablas E2 y E3 se presentan las ecuaciones de búsqueda diseñadas para explorar las aplicaciones cosméticas de estos compuestos, con el objetivo de analizar su potencial incorporación en formulaciones dentro de la industria cosmeceútica.

Tabla E1. Tabla de ecuaciones de búsqueda en SCOPUS.

D1	(TITLE-ABS-KEY ("coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee cascara" OR "coffee by-product*") AND ("pressurized liquid extraction" OR "PLE" OR "subcritical water extraction" OR "supercritical fluid extraction") AND ("antioxidant*" OR "polyphenol*" OR "bioactive compound*") AND ("formulation" OR "product*" OR "application*" OR "nutraceutical*" OR "cosmetic*" OR "food product*" OR "pharmaceutical*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))	99
D2	(TITLE-ABS-KEY ("coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee cascara") AND ("antioxidant*" OR "polyphenol*" OR "bioactive*") AND ("nutraceutical*" OR "dietary supplement*" OR "functional food*") AND ("formulation" OR "product development" OR "application*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))	126
D3	(TITLE-ABS-KEY ("coffee by-product*" OR "coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee cascara") AND ("cosmetic*" OR "skin care" OR "antiaging" OR "dermatology") AND ("extract*" OR "antioxidant*" OR "polyphenol*") AND ("formulation" OR "topical product*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))	41
D4	(TITLE-ABS-KEY ("coffee husk extract*" OR "coffee cascara extract*" OR "coffee by-product extract*") AND ("food preservation" OR "functional food*" OR "beverage*" OR "fortified food*") AND ("antioxidant*" OR "polyphenol*") AND ("formulation" OR "application*")) AND NOT ("coffee beverage") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))	15
D5	(TITLE-ABS-KEY ("pressurized liquid extraction" OR "subcritical water extraction" OR "PLE") AND ("coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee cascara") AND ("antioxidant*" OR "bioactive compound*") AND ("pharmaceutical*" OR "drug delivery" OR "capsule*" OR "tablet*" OR "formulation*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))	16
D6	(TITLE-ABS-KEY ("coffee husk" OR "coffee cascara" OR "coffee pulp") AND ("extract*" OR "polyphenol*" OR "bioactive*") AND ("stability" OR "bioavailability" OR "encapsulation" OR "nanoparticle*" OR "delivery system*") AND ("nutraceutical*" OR "cosmetic*" OR "food product*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))	64
D7	(TITLE-ABS-KEY ("coffee husk" OR "coffee pulp" OR "coffee cascara") AND ("antioxidant*" OR "polyphenol*") AND ("application*" OR "formulation*") AND ("skin care" OR "antiaging" OR "food supplement" OR "functional food" OR "cosmetic" OR "pharmaceutical")) AND NOT ("waste management") AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))	131

Tabla E2. Tabla de ecuaciones de búsqueda para aplicaciones de la cafeína en SCOPUS.

Nivel	Ecuación	Número
D1	TITLE("caffeine" AND "topical") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee" OR "green coffee" OR "brew") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	22
D2	TITLE("caffeine") AND TITLE-ABS- KEY("emulsion" OR "gel" OR "cream") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	53
D3	TITLE("caffeine") AND TITLE-ABS- KEY("drug delivery" OR "transdermal patch" OR "controlled release") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	43
D4	TITLE("caffeine") AND TITLE-ABS- KEY("microencapsulation" OR "nano*") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	88
D5	TITLE("caffeine") AND TITLE-ABS- KEY("HPLC" OR "method validation") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	77

Tabla E3. Tabla de ecuaciones de búsqueda para aplicaciones del ácido clorogénico en SCOPUS.

Nivel	Ecuación	Número
D1	TITLE("chlorogenic acid") AND TITLE-ABS-KEY("topical" OR "skin" OR "cosmetic") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("green coffee" OR "coffee extract") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	30
D2	TITLE("chlorogenic acid") AND TITLE-ABS-KEY("drug delivery" OR "formulation" OR "transdermal") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	39
D3	TITLE("chlorogenic acid") AND TITLE-ABS-KEY("antioxidant" OR "anti-inflammatory") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	156
D4	TITLE("chlorogenic acid") AND TITLE-ABS-KEY("microencapsulation" OR "nano*") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	65
D5	TITLE("chlorogenic acid") AND TITLE-ABS-KEY("stability" OR "polyphenol protection") AND TITLE-ABS-KEY("application") AND NOT TITLE-ABS-KEY("coffee") AND DOCTYPE(ar) AND PUBYEAR > 2018	80

F. Análisis técnico y económico preliminar

La Tabla E1 presenta el desglose de los costos operativos mensuales estimados para la planta de extracción. Estos se clasifican en tres categorías principales: costos directos, costos fijos y costos generales. Los valores fueron determinados a partir de cotizaciones de proveedores externos y fórmulas estimativas, con el fin de obtener una aproximación representativa de los gastos asociados al funcionamiento de la planta.

Tabla F1. Costos operativos de la planta

Costos directos	COP/mes
Materia prima	\$1,000,000
Dióxido de carbono	\$35,046,264
Etanol anhidro	\$178,500,000
Tratamiento de residuos	\$0
Alquiler	\$5,000,000
Servicios	\$38,830,000
Mantenimiento y limpieza de membrana [4]	\$17,811,064
Mano de obra	\$18,000,000
Supervisión	\$3,600,000
Mantenimiento y reparaciones	\$148,292,996
Suministros de operación	\$33,220,812
Gastos de laboratorio	\$3,600,000
Patentes y regalías	\$37,697,890
Costos fijos	COP/mes
Depreciación	\$296,585,993
Impuestos	\$94,907,518
Fabricación	\$112,622,436
Costos generales	COP/mes
Administración	\$25,483,949
Distribución y venta	\$100,527,706

La Figura F1 muestra la evolución del flujo de caja proyectado a lo largo de diez años para el proceso de obtención de extractos antioxidantes de la cáscara de café. Se observa que, durante el primer año, el flujo neto es negativo debido a la alta inversión inicial requerida para la implementación de la planta, la adquisición de equipos y la adecuación de la infraestructura. Sin embargo, a partir del segundo año,

los flujos comienzan a ser positivos, reflejando la recuperación progresiva de la inversión inicial y la generación de ingresos sostenidos por la venta de los extractos antioxidantes.

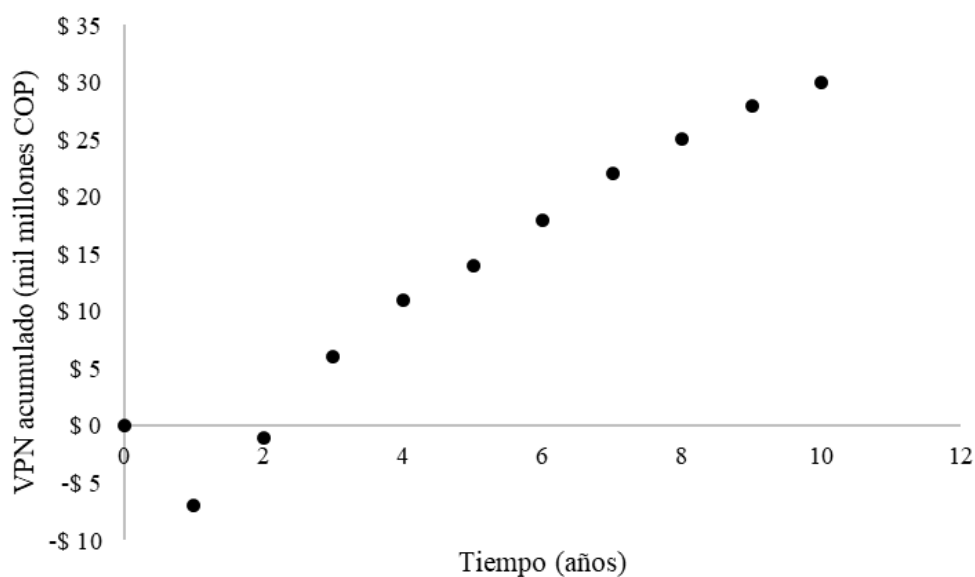


Figura F1. Diagrama de flujo de caja

F2. Balances de materia

A continuación, se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) correspondiente al proceso de extracción de compuestos bioactivos a partir de cáscara de café, el cual se compone de dos unidades fundamentales para la operación de la planta. La primera unidad corresponde al pretratamiento de la materia prima mediante extracción con CO_2 supercrítico (SC-CO_2), de la cual también se obtiene un extracto. La segunda unidad está destinada a la extracción con líquidos presurizados (PLE) para la obtención del extracto final.

Con el fin de facilitar la comprensión de los balances de materia y energía, se realizó la numeración de las líneas de proceso para cada una de las unidades. En las siguientes secciones se presentan tanto el diagrama P&ID como las tablas de balances correspondientes, en las cuales se detallan la composición, temperatura y presión de cada corriente involucrada.

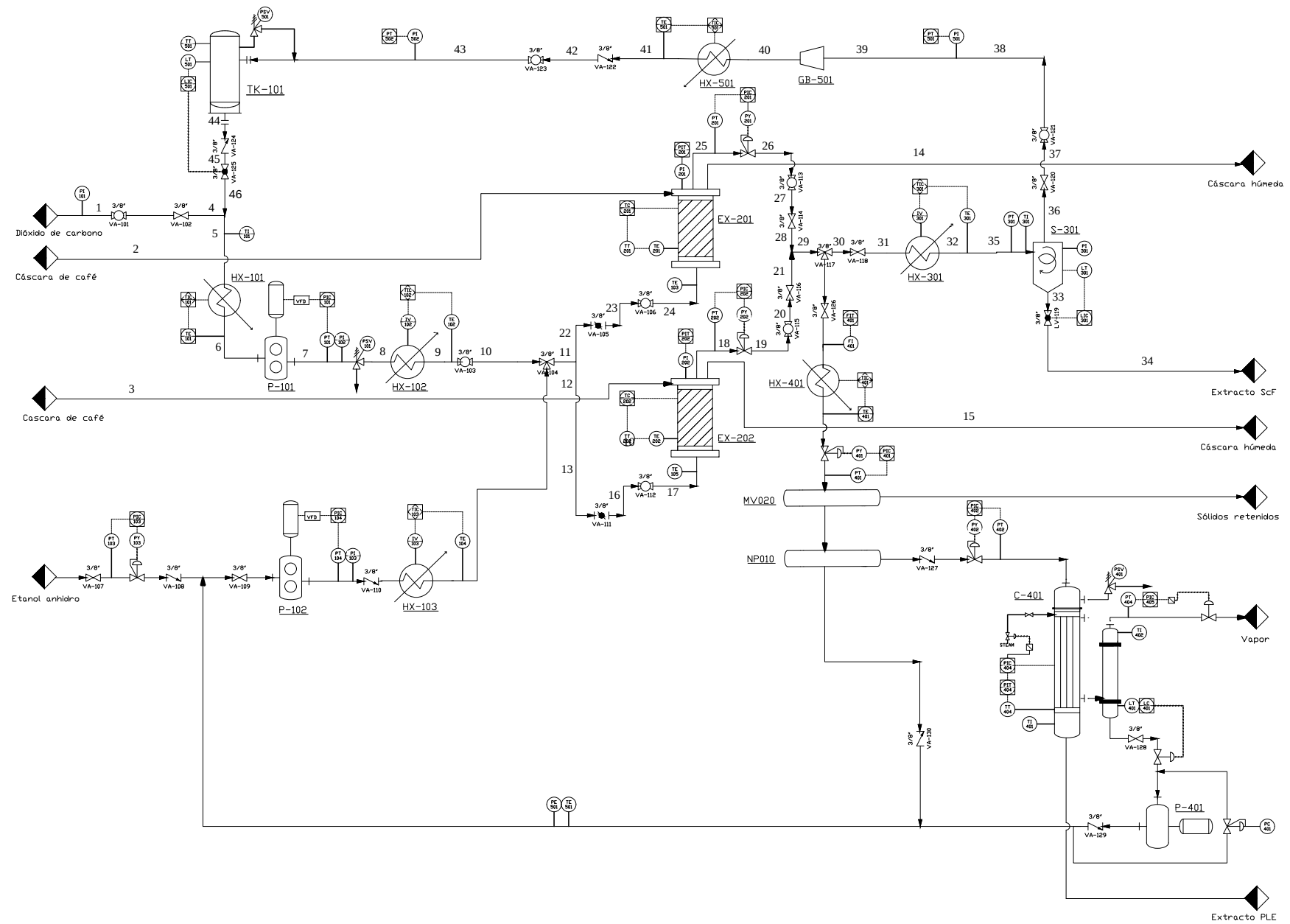


Figura F2. Numeración balances de materia proceso SC-CO₂

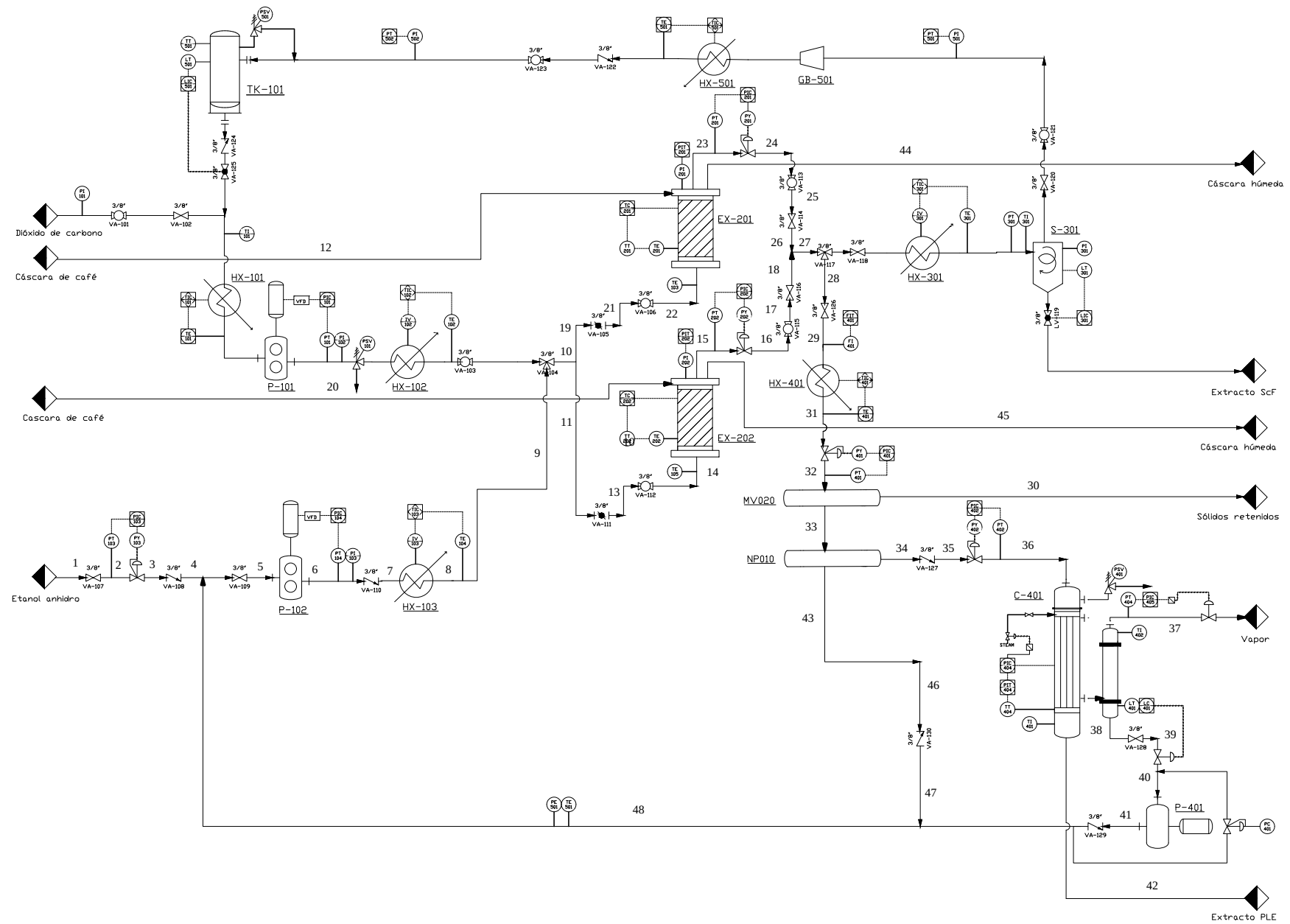


Figura F3. Numeración balances de materia proceso PLE

Tabla F3. Tabla de balances para el proceso PLE

Corriente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Mcáscara(kg/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.69	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.69	0.0	0.0	0.0	0.0
MEtOH(kg/h)	493.1	493.1	493.1	493.1	493.1	422.6	422.6	422.6	422.6	422.6	211.3	0.0	211.3	211.3	211.3	211.3	211.3	211.3	211.3	0.0	211.3	211.3	211.3	211.3
Mextracto PLE (kg/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	0.0	3.3	3.3	3.3	3.3
Xetanol(kg/h)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Xextracto PLE (kg/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mtotal (kg/h)	493.1	493.1	493.1	493.1	493.1	422.6	422.6	422.6	422.6	422.6	211.3	8.69	211.3	214.6	214.6	214.6	214.6	214.6	214.6	8.69	214.6	214.6	214.6	214.6
T (°C)	25.0	25.0	25.0	27.0	27.0	27.0	27.0	60.0	60.0	60.0	60.0	25.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	25.0	60.0	60.0	60.0	60.0
P(bar)	1.1	0.9	0.8	0.7	0.6	123.5	123.0	122.7	122.5	121.3	120.9	0.9	120.8	120.6	120.4	120.1	122.5	121.3	120.8	0.9	120.6	120.4	120.0	119.8
Corriente	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Mcáscara(kg/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	5.3	0.0	0.0	0.0
MEtOH(kg/h)	211.3	211.3	422.6	422.6	422.6	21.1	422.6	422.6	160.6	160.6	160.6	160.6	50.1	110.5	110.5	110.5	110.5	0.0	240.8	4.8	4.8	240.8	240.8	351.3
Mextracto PLE (kg/h)	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	0,0	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Xetanol(kg/h)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0
Xextracto PLE (kg/h)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mtotal (kg/h)	214.6	214.6	426.0	426.0	426.0	21,1	426.0	426.0	163.9	163.9	163.9	163.9	50.1	110.5	110.5	110.5	110.5	3.3	240.8	10.2	10.2	240.8	240.8	351.3
T (°C)	60.0	60.0	60.0	60.0	40.0	30.0	40.00	40.00	30.0	30.0	30.0	30.0	40.0	40.0	40.0	35.0	35.0	50.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
P(bar)	119.8	119.6	84.9	60.3	42.8	0.9	42.5	0.6	41.9	1,0	0.9	0.8	0.8	1.0	1.2	1.2	1.8	0.9	1.8	0.9	0.9	1.7	1.6	1.5

Referencias

- [1] C. Pardo-Castaño, M. Velásquez, and G. Bolaños, “Simple models for supercritical extraction of natural matter,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 97, pp. 165–173, 2015.
- [2] A. M. B. Oliveira *et al.*, “Rapid extraction of xanthohumol, α - and β -acids from spent hops using pressurized liquids and supercritical fluids”, *J. Supercrit. Fluids*, vol. 223, n° 106609, p. 106609, 2025.
- [3] M. Plaza y M. L. Marina, “Pressurized hot water extraction of bioactives”, *Trends Analyt. Chem.*, vol. 116, pp. 236–247, 2019.
- [4] J. Thuvander y A.-S. Jönsson, “Techno-economic impact of air sparging prior to purification of alkaline extracted wheat bran hemicelluloses by membrane filtration”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 253, n° 117498, p. 117498, 2020.