

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Comparación del uso de mezclas hidroalcohólicas para la extracción de ácido clorogénico
de posos de café a nivel de laboratorio

Tesis presentada por

Astrid Gabriela Cermeño Díaz para optar al grado académico de

Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Comparación del uso de mezclas hidroalcohólicas para la extracción de ácido clorogénico
de posos de café a nivel de laboratorio

Tesis presentada por

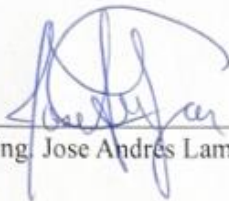
Astrid Gabriela Cermeño Díaz para optar al grado académico de

Licenciada en Ingeniería Química Industrial

Guatemala

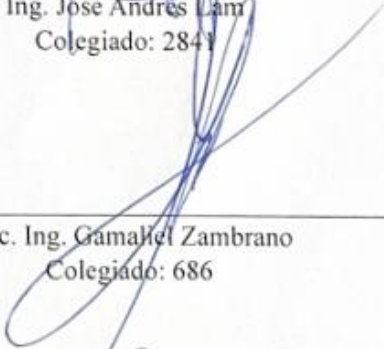
2025


Vo. Bo.:

(f) 
Ing. Jose Andres Lam

Tribunal examinador:

(f) 
Ing. Jose Andres Lam
Colegiado: 2841

(f) 
MSc. Ing. Gamaliel Zambrano
Colegiado: 686

(f) 
M.A. Ing. Carmen Ortiz
Colegiado: 693

Fecha de probación: Guatemala 10 de diciembre de 2025

PREFACIO

Este trabajo de graduación tuvo la finalidad de comparar mezclas hidroalcohólicas para la obtención de ácido clorogénico (AC) de posos de café y evaluar la valorización del residuo. En primera instancia, agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar mis estudios universitarios, y por la brindarme la ciencia, inteligencia y fuerzas necesarias para realizar un trabajo de este tipo.

Asimismo, agradezco a mi familia por todo el apoyo brindado durante el proceso de elaboración de este trabajo. A mi madre, por apoyar mis decisiones académicas y motivarme desde el primer hasta el último día de universidad, a quien agradezco por los valores y la educación que me ha dado. De igual forma, agradezco a mis amigos: Natalia, Andrés, Mary, Ale, Gaby, Diego y Santiago, por cada uno de los momentos compartidos a lo largo de los 6 años, risas, estrés, y anécdotas; sin ellos la carrera no hubiera sido lo misma.

Quiero agradecer a la Universidad del Valle de Guatemala, mi casa de estudios, que me ha brindado oportunidades de crecimiento personal y profesional. También agradezco al Departamento de Ingeniería Química de la Universidad del Valle de Guatemala, a todos los catedráticos que me ayudaron en mi formación académica y atribuyó el conocimiento que he adquirido; y especialmente al Ing. Gamaliel Zambrano, por todo su apoyo, motivación y consejos que me permitieron trabajar con excelencia a los largos de los años. A mi asesor, el Ing. Andrés Lam, por todo su apoyo y motivación en el desarrollo del trabajo. Al Ing. Luis Nuñez, por su acompañamiento y consejos, así como la motivación a lo largo de los últimos semestres. Y a la Ing. Carmen Ortiz, quien ha sido una inspiración como mujer en ingeniería.

Finalmente quiero agradecer a la Lic. Ana Luisa Mendizábal, por todo su apoyo durante los análisis de laboratorio; y a ANACAFÉ por proporcionar la materia prima utilizada en este proyecto.

ÍNDICE

| | |
|--------------------------------|-------|
| LISTADO DE FIGURAS | ix |
| LISTADO DE GRÁFICOS | xvi |
| LISTADO DE CUADROS | xvii |
| LISTADO DE ECUACIONES..... | xxi |
| LISTADO DE CÁLCULOS | xxiii |
| LISTADO DE ILUSTRACIONES..... | xxiv |
| RESUMEN | xxv |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS | 2 |
| 2.1. General | 2 |
| 2.2. Específicos..... | 2 |
| III. JUSTIFICACIÓN | 3 |
| IV. MARCO TEÓRICO..... | 5 |
| 4.1. Café | 5 |
| 4.1.1. Historia y origen | 5 |
| 4.1.2. Especies | 6 |

| | |
|--|----|
| 4.1.3. Cultivo a nivel mundial | 8 |
| 4.2. Café de Guatemala | 9 |
| 4.2.1. Producción de café en Guatemala | 9 |
| 4.2.2. Importancia económica..... | 10 |
| 4.2.3. Regiones productoras | 12 |
| 4.2.4. Variedades de especies de café en Guatemala | 14 |
| 4.3. Técnicas de barismo | 16 |
| 4.3.1. Métodos por presión | 16 |
| 4.3.2. Métodos por inmersión total..... | 17 |
| 4.3.3. Métodos por filtración o vertido..... | 17 |
| 4.4. Composición del grano de café | 17 |
| 4.4.1. Estructura anatómica del grano | 17 |
| 4.4.2. Composición química del endospermo | 19 |
| 4.5. Proceso de beneficio del café | 19 |
| 4.6. Ácidos clorogénicos en el café..... | 24 |
| 4.6.1. Definición y estructura química del ácido clorogénico | 24 |
| 4.6.2. Propiedades biológicas | 27 |
| 4.6.3. Importancia a nivel industrial..... | 28 |
| 4.6.4. Producción y mercado global | 29 |
| 4.7. Subproductos del café | 30 |

| | |
|--|----|
| 4.7.1. Posos de café | 30 |
| 4.8. Técnicas de extracción | 34 |
| 4.8.1. Clasificación por fases..... | 34 |
| 4.8.2. Clasificación de tipos de técnicas..... | 35 |
| 4.8.3. Factores que inciden en la extracción..... | 39 |
| 4.9. Extracción asistida por ultrasonido | 41 |
| 4.10. Economía circular..... | 42 |
| V. ANTECEDENTES | 44 |
| VI. METODOLOGÍA | 49 |
| 6.1. Diseño experimental..... | 49 |
| 6.2. Preparación y recolección de la muestra | 50 |
| 6.3. Extracción de ácido clorogénico por procesador ultrasónico..... | 54 |
| 6.4. Cuantificación de ácido clorogénico por HPLC..... | 57 |
| VIII. RESULTADOS | 59 |
| IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 66 |
| X. CONCLUSIONES | 75 |
| XI. RECOMENDACIONES..... | 77 |
| XII. BIBLIOGRAFÍA | 78 |
| XIII. ANEXOS..... | 86 |
| 13.1. Datos originales | 86 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 13.2. | Balance de masa y energía | 100 |
| 13.3. | Datos calculados | 101 |
| 13.4. | Ecuaciones | 112 |
| 13.5. | Cálculos de muestra | 119 |
| 13.6. | Código utilizado para análisis de datos..... | 121 |
| 13.7. | Análisis de error | 124 |
| XIV. | ILUSTRACIONES | 126 |
| XV. | GLOSARIO | 161 |

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Historial de millones de sacos de café oro exportados de Guatemala y divisas durante el período 2000 a 2024..... | 11 |
| Figura 2. Cultivos de variedades de café en Guatemala 2024-2025..... | 16 |
| Figura 3. Anatomía del grano de café..... | 18 |
| Figura 4. Estructura del ácido 5-O-cafeoil-ácido quínico (ácido clorogénico) | 25 |
| Figura 5. Estructuras básicas de los ácidos clorogénicos. (A) Ácido quínico y ácidos hidroxicinámicos. (B) Monoésteres de ácido quínico con ácidos cafeico, ferúlico y p-cumárico. (C) Diésteres y ésteres mixtos de ácido quínico | 26 |
| Figura 6. Participación global del ácido clorogénico (CGA) por aplicación..... | 29 |
| Figura 7. Balance de masa y energía del proceso de extracción de ácido clorogénico parte 1..... | 100 |
| Figura 8. Balance de masa y energía del proceso de extracción de ácido clorogénico .. | 100 |
| Figura 9. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 1ra corrida..... | 133 |
| Figura 10. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 2da corrida..... | 133 |
| Figura 11. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1da corrida..... | 134 |
| Figura 12. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida..... | 134 |
| Figura 13. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida..... | 135 |

| | |
|---|-----|
| Figura 14. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida..... | 135 |
| Figura 15. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida..... | 136 |
| Figura 16. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 3ra corrida..... | 136 |
| Figura 17. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida..... | 137 |
| Figura 18. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida..... | 137 |
| Figura 19. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 3ra corrida..... | 138 |
| Figura 20. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida..... | 138 |
| Figura 21. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida..... | 139 |
| Figura 22. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos 1ra corrida | 140 |
| Figura 23. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 2da corrida | 140 |
| Figura 24. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 3ra corrida | 141 |

| | |
|--|-----|
| Figura 25. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1ra corrida | 141 |
| Figura 26. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida | 142 |
| Figura 27. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida | 142 |
| Figura 28. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida | 143 |
| Figura 29. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida..... | 143 |
| Figura 30. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 3ra corrida | 144 |
| Figura 31. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida | 145 |
| Figura 32. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida..... | 145 |
| Figura 33. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 3ra corrida | 146 |

| | |
|--|-----|
| Figura 34. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida | 146 |
| Figura 35. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida..... | 147 |
| Figura 36. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 3ra corrida | 147 |
| Figura 37. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 1ra corrida | 148 |
| Figura 38. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1ra corrida | 149 |
| Figura 39. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida | 149 |
| Figura 40. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida | 150 |
| Figura 41. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida | 150 |
| Figura 42. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida..... | 151 |

| | |
|--|-----|
| Figura 43. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 3ra corrida | 151 |
| Figura 44. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida | 152 |
| Figura 45. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida..... | 152 |
| Figura 46. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 3ra corrida | 153 |
| Figura 47. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida | 153 |
| Figura 48. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida..... | 154 |
| Figura 49. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 1ra corrida | 154 |
| Figura 50. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 2da corrida | 155 |
| Figura 51. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 3ra corrida | 155 |

| | |
|--|-----|
| Figura 52. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1ra corrida | 156 |
| Figura 53. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida | 156 |
| Figura 54. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida | 157 |
| Figura 55. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida | 157 |
| Figura 56. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida..... | 158 |
| Figura 57. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida | 158 |
| Figura 58. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida..... | 159 |
| Figura 59. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida..... | 159 |
| Figura 60. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida | 160 |

Figura 61. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida.....160

LISTADO DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 1. Porcentaje de posos de café que atraviesa cada tamiz para el promedio de corridas del método V60 y Chemex..... | 60 |
| Gráfico 2. Distribución de tamaño de partícula para el promedio de corridas de los posos de café del método V60 y Chemex | 61 |
| Gráfico 3. Concentración de ácido clorogénico en extractos de posos de café (agua y mezclas hidroalcohólicas) a lo largo del tiempo..... | 62 |
| Gráfico 4. Rendimiento de ácido clorogénico de la extracción de poso de café utilizando distintas mezclas hidroalcohólicas | 63 |

LISTADO DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Distribución de productores de café en Guatemala, indicado por departamento y región | 10 |
| Cuadro 2. Composición química del café en ambas especies | 19 |
| Cuadro 3. Composición química de los posos de café | 31 |
| Cuadro 4. Composición mineral del poso de café | 32 |
| Cuadro 5. Composición fenólica de los posos de café según especie | 33 |
| Cuadro 6. Promedio de las características fisicoquímicas (pH y contenido de humedad) de los posos de café obtenidos mediante los métodos V60 y Chemex..... | 59 |
| Cuadro 7. Análisis de varianza de dos factores (ANOVA) para la distribución granulométrica de los posos de café V60 y Chemex | 61 |
| Cuadro 8. Análisis de varianza de dos factores (ANOVA) para la extracción de ácido clorogénico (AC) | 63 |
| Cuadro 9. Costo directo de la preparación de una taza de café por método V60 y Chemex | 64 |
| Cuadro 10. Costo directo y rendimiento de extracción de ácido clorogénico en agua y e ventana de 10 min de extracción..... | 64 |
| Cuadro 11. Relación económica entre preparación y valorización..... | 65 |
| Cuadro 12. Valorización económica bajo escenario inferior y de equilibrio total..... | 65 |
| Cuadro 13. Datos de placa de balanza analítica digital | 86 |
| Cuadro 14. Datos de placa de balanza de humedad..... | 86 |
| Cuadro 15. Datos de placa de estufa eléctrica | 86 |
| Cuadro 16. Datos de placa de procesador ultrasónico | 86 |
| Cuadro 17. Datos de cromatógrafo líquido de alta resolución utilizado | 87 |

| | |
|--|----|
| Cuadro 18. Datos del cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC) | 87 |
| Cuadro 19. Reactivos utilizados durante la experimentación..... | 87 |
| Cuadro 20. Caracterización inicial de los posos de café por el método de preparación V60: masa de muestra, porcentaje de humedad y pH por corrida | 88 |
| Cuadro 21. Caracterización inicial de los posos de café por el método de preparación Chemex: masa de muestra, porcentaje de humedad y pH por corrida..... | 88 |
| Cuadro 22. Humedad final de los posos de café V60 posterior al secado | 89 |
| Cuadro 23. Humedad final de los posos de café Chemex posterior al secado | 89 |
| Cuadro 24. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación V60, 1ra corrida | 90 |
| Cuadro 25. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación V60, 2da corrida | 90 |
| Cuadro 26. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación V60, 3ra corrida | 91 |
| Cuadro 27. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación Chemex, 1ra corrida..... | 92 |
| Cuadro 28. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación Chemex, 2da corrida | 92 |
| Cuadro 29. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación Chemex, 3ra corrida..... | 93 |
| Cuadro 30. Masas de posos de café empleadas por condición experimental para la extracción sólido-líquido..... | 94 |
| Cuadro 31. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando agua como solvente, tiempo de retención y concentración (ppm)..... | 95 |
| Cuadro 32. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando una mezcla de proporción 60:40 (etanol-agua) como solvente, tiempo de retención y concentración (ppm) | 96 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 33. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando una mezcla de proporción 70:30 (etanol-agua) como solvente, tiempo de retención..... | 97 |
| Cuadro 34. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando una mezcla de proporción 80:20 (etanol-agua) como solvente, tiempo de retención y concentración (ppm) | 98 |
| Cuadro 35. Parámetros de operación para el costo directo por taza | 98 |
| Cuadro 36. Tarifas y precios de materiales e insumos necesarios para la preparación de café y método de extracción..... | 99 |
| Cuadro 37. Análisis estadístico de la caracterización del poso de café del método de preparación V60 | 101 |
| Cuadro 38. Análisis estadístico de la caracterización del poso de café del método de preparación Chemex | 101 |
| Cuadro 39. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la primera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación V60. | 102 |
| Cuadro 40. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la segunda corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación V60. | 102 |
| Cuadro 41. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la tercera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación V60. | 103 |
| Cuadro 42. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la primera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación Chemex | 103 |
| Cuadro 43. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la segunda corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación Chemex | 104 |
| Cuadro 44. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la tercera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación Chemex | 104 |
| Cuadro 45. Resultado de cuantificación de ácido clorogénico promedio para cada uno de los solventes y tiempos de extracción con su desviación estándar | 105 |

| | |
|---|-----|
| Cuadro 46. Rendimiento promedio (mg/g) de ácido clorogénico extraído mediante ultrasonido de poso de café..... | 106 |
| Cuadro 47. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=0 min..... | 107 |
| Cuadro 48. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=5 min..... | 107 |
| Cuadro 49. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=10 min..... | 107 |
| Cuadro 50. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=15 min..... | 108 |
| Cuadro 51. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=20 min..... | 108 |
| Cuadro 52. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=agua..... | 108 |
| Cuadro 53. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=60:40 | 109 |
| Cuadro 54. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=70:30 | 109 |
| Cuadro 55. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=80:20 | 109 |
| Cuadro 56. Costeo directo de la extracción de ácido clorogénica empleando agua y mezcla hidroalcohólica..... | 110 |
| Cuadro 57. Cálculos intermedios comunes entre métodos de preparación del café..... | 110 |
| Cuadro 58. Parámetros de operación para el costo directo por extracción de ácido clorogénico de todas las etapas | 111 |
| Cuadro 59. Desglose por etapa de energía y costos directos por corrida en la extracción de ácido clorogénico | 112 |

LISTADO DE ECUACIONES

| | |
|---|-----|
| Ecuación 1. Porcentaje de humedad luego de x minutos de secado | 112 |
| Ecuación 2. Masa de la materia prima seca utilizada para la extracción | 113 |
| Ecuación 3. Porcentaje de material en una malla determinada | 113 |
| Ecuación 4. Porcentaje de material que atraviesa la malla inicial | 113 |
| Ecuación 5. Curva de calibración..... | 113 |
| Ecuación 6. Rendimiento de ácido clorogénico (mg/g)..... | 114 |
| Ecuación 7. Balance de masa para sistemas sin acumulación | 114 |
| Ecuación 8. Balance de energía de un sistema..... | 114 |
| Ecuación 9. Modelo ANOVA de dos vías con interacción..... | 114 |
| Ecuación 10. Número de réplicas por celda..... | 114 |
| Ecuación 11. Media marginal del factor A (nivel i) | 115 |
| Ecuación 12. Media marginal del factor B (nivel j)..... | 115 |
| Ecuación 13. Media global del experimento..... | 115 |
| Ecuación 14. Suma de cuadrados del factor A (SSA) | 115 |
| Ecuación 15. Suma de cuadrados del factor B (SSB)..... | 116 |
| Ecuación 16. Suma de cuadrados de la interacción A×B (SSAB)..... | 116 |
| Ecuación 17. Suma de cuadrados del error (SSE)..... | 116 |
| Ecuación 18. Suma total de cuadrados (SST) y su descomposición..... | 116 |
| Ecuación 19. Grados de libertad por fuente de variación | 117 |
| Ecuación 20. Medias cuadráticas y estadísticos F para A, B y A×B..... | 117 |
| Ecuación 21. Estadístico de Tukey | 117 |
| Ecuación 22. Media aritmética..... | 117 |
| Ecuación 23. Desviación estándar muestral..... | 118 |
| Ecuación 24. Coeficiente de variación..... | 118 |

| | |
|---|-----|
| Ecuación 25. Intervalo de confianza | 118 |
| Ecuación 26. Programación de error (incertidumbre) en sumas y restas | 118 |
| Ecuación 27. Propagación de error (incertidumbre) para multiplicaciones y divisiones | 119 |

LISTADO DE CÁLCULOS

| | |
|--|-----|
| Cálculo 1. Porcentaje de humedad en el proceso de secado de los posos de café | 119 |
| Cálculo 2. Análisis granulométrico de poso de café | 119 |
| Cálculo 3. Rendimiento de AC en poso de café para agua en 10 minutos de extracción | 120 |
| Cálculo 4. Balance de masa del secador..... | 120 |
| Cálculo 5. Balance de energía del secador | 120 |
| Cálculo 6. Media aritmética | 124 |
| Cálculo 7. Desviación estándar | 125 |

LISTADO DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|-----|
| Ilustración 1. Sistema de extracción con procesador ultrasónico..... | 126 |
| Ilustración 2. Sonotrodo utilizado de MS7 Micro tip 7..... | 127 |
| Ilustración 3. Mezclas hidroalcohólicas: 60:40, 70:30 y 80:20..... | 128 |
| Ilustración 4. Muestra del poso de café V60 | 129 |
| Ilustración 5. Pesajes de muestras tamizadas del poso de café del método de filtrado V60 | 129 |
| Ilustración 6. Solución madre y soluciones patrón de ácido clorogénico para la curva de calibración..... | 130 |
| Ilustración 7. Muestras de posos de café antes de ser sometidos al proceso de extracción | 130 |
| Ilustración 8. Muestras posterior a la extracción por ultrasonido para la mezcla hidroalcohólica 60:40, en los tiempos 0,5,10 y 15 minutos..... | 131 |
| Ilustración 9. Extractos posteriores a la operación de centrifugado..... | 131 |
| Ilustración 10. Extracto centrifugado | 132 |

RESUMEN

El café es un sector estratégico para Guatemala, pero su cadena genera residuos, los cuales no tiene un tratamiento adecuado; entre ellos, los posos de café originados en la preparación doméstica y comercial de la bebida. Este trabajo estudió la recuperación de ácidos clorogénicos (AC) a partir de posos de café como vía de economía circular. Se trabajó a escala de laboratorio con residuos de los métodos de preparación por filtración, V60 y Chemex, aplicando extracción sólido-líquido asistida por ultrasonido con agua y mezclas hidroalcohólicas (60:40, 70:30, 80:20). Los AC se cuantificaron mediante HPLC y se estimó el costo por taza (preparación de bebida + extracción). Los posos presentaron pH levemente ácido y estable (V60: 6.16 ± 0.20 ; Chemex: 6.21 ± 0.06), humedad alta (V60: 67.13 ± 1.24 %; Chemex: 67.97 ± 2.09 %) y granulometría unimodal 0.45–0.65 mm. Además, se observó el método de preparación no afectó las fracciones granulométricas ($F = 0.028$; $p = 0.867$).

Los rendimientos de extracción en orden descendente fueron $H_2O > 60:40 > 70:30 > 80:20$; con rendimientos de (5.18 ± 0.18 mg/g), superando a 60:40 (4.30 ± 0.22 mg/g), 70:30 (2.47 ± 0.16 mg/g) y 80:20 (1.69 ± 0.31 mg/g), respectivamente. El costo de extracción por taza fue Q3.70 con agua y Q4.42 con mezcla 60:40; radicando en costos totales de Q34.19 y Q42.18, respectivamente. Se concluye que la recuperación de AC desde posos es factible y que el uso de agua a 10 min optimiza rendimiento y costo. Se recomienda, evaluar alternativas de residuos ricos en compuestos bioactivos y explorar usos del sólido post-extracción (compostaje, adsorbentes o materiales compuestos).

I. INTRODUCCIÓN

El café es uno de los productos agrícolas más relevantes para la economía guatemalteca. Guatemala se caracteriza como productor especializado de la especie arábica, con una producción estable de entre 3.47 a 3.54 millones de sacos de 60 kg. Además, posee un amplio parque cafetalero, que permite posicionar al país dentro de los principales exportadores, representando \$693 millones de ingresos en la cosecha de 2024-2025 (Tay, 2025). Sin embargo, esta actividad genera subproductos a lo largo de la cadena, siendo uno de ellos los posos de café en la etapa de consumo de la bebida. Dichos residuos contienen compuestos bioactivos de alto interés, entre ellos los ácidos clorogénicos (AC), identificados como los fenoles mayoritarios y asociados a actividades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas (Naveed et al., 2018), lo que permite la evaluación de oportunidades de valorización y aprovechamiento bajo esquemas de economía circular. Por lo que la recuperación de moléculas de valor desde subproductos agroalimentarios contribuiría a la reducción de residuos y a la creación nuevas corrientes de ingreso para el sector caficultor. El presente trabajo propone la extracción y cuantificación de ácidos clorogénicos a partir de posos de café generados por métodos de preparación por filtración (V60 y Chemex) a escala de laboratorio, como alternativa de aprovechamiento del residuo. Para ello, se desarrolló la caracterización del material, se compararon métodos de extracción verdes (agua y mezclas hidroalcohólicas etanol-agua) asistidos por ultrasonido, y se estableció un procedimiento analítico por HPLC para la determinación de AC. Adicionalmente, se identificaron los requerimientos de operación y se estimaron costos por taza para valorar el potencial económico de la recuperación de AC en condiciones realistas de preparación de café. De esta manera, la investigación aporta evidencia técnica sobre la recuperación de compuestos fenólicos desde un residuo abundante y de bajo costo, para posible valorización y contribución a la sostenibilidad del proceso.

II. OBJETIVOS

2.1. General

Comparar mezclas hidroalcohólicas usadas en extracción para la obtención de ácido clorogénico (AC) de posos de café provenientes de los métodos de preparación V60 y Chemex, con el fin de maximizar el rendimiento.

2.2. Específicos

1. Caracterizar los posos de café residuales obtenidos de los métodos de preparación V60 y Chemex, evaluando su pH, humedad y distribución granulométrica, para la extracción líquido-sólido.
2. Extraer ácido clorogénico de los posos de café utilizando distintas mezclas hidroalcohólicas y cuantificarlo por medio cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC) para comparar rendimiento del compuesto entre las mezclas y los valores teóricos.
3. Relacionar el costo de extracción del ácido clorogénico, con el costo de preparación de una taza de café por el método V60 y Chemex, con el fin de analizar el valor económico adicional, que aporta la valorización del residuo.

III. JUSTIFICACIÓN

La producción y consumo de café en Guatemala son actividades económicas en crecimiento constante dentro de la población. El país se encuentra dentro de los 10 mayores productores de café a nivel mundial (Rodríguez & de León, 2021). Según la OIC (Organización Internacional del Café) el consumo interno del café tiene un crecimiento anual del 2.4%, con un consumo per cápita de 138 tazas, equivalente a un promedio de entre una o dos tazas diaria para los consumidores de café. Sin embargo, se estima que sólo el 9.5% del grano de café es empleado en la preparación de la bebida (Calle, 1977), quedando el resto como desecho sólido conocido como “poso de café” o “shinga”. Esta subutilización plantea un desafío en la gestión de residuos, ya que se generan volúmenes de desechos orgánicos que, en la mayoría de los casos, no reciben un tratamiento adecuado.

El café es reconocido por su alto contenido de compuestos fenólicos, responsables de su capacidad antioxidante, destacando con altas concentraciones el ácido clorogénico (AC) y la cafeína (Garcés, 2022). El aprovechamiento de los posos de café para la obtención de ácido clorogénico, el cual es altamente utilizado como aditivo en industrias alimenticias, cosméticas y farmacéuticas, ofrece una alternativa que permite valorizar este desecho y transformar un residuo en una fuente de bioactivos de alto valor.

Además, la valorización de los posos de café contribuye a disminuir la acumulación de residuos orgánicos, favoreciendo prácticas de economía circular en donde un desecho se convierte en materia prima para nuevos productos. De manera complementaria, el uso de mezclas hidroalcohólicas como disolventes abre la posibilidad de emplear etanol de origen fermentativo, obtenido a partir de biomasa renovable, lo que refuerza el carácter sostenible del proceso al reducir la dependencia de solventes derivados del petróleo e integrar recursos naturales en procesos de bajo impacto ambiental.

Debido al creciente interés de dicho compuesto natural, es de importancia investigar diferentes técnicas de extracción para identificar metodologías que permitan la obtención de dicho compuesto. Esto permitirá fundamentar el uso de los posos de café como una materia prima viable y sostenible, al mismo tiempo que impulsa el desarrollo de ingredientes funcionales con aplicaciones industriales de valor agregado.

De esta manera, la investigación no solo aporta evidencia científica sobre métodos de extracción eficientes de ácido clorogénico, sino que también responde a necesidades ambientales y productivas actuales. Al aprovechar un residuo ampliamente disponible como los posos de café, se promueve la economía circular y se generan insumos de alto valor para industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas. Este enfoque se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y representa una oportunidad para que Guatemala, como país productor de café, fortalezca la innovación en el manejo de subproductos agrícolas y amplíe el potencial de su cadena de valor.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1. Café

4.1.1. Historia y origen

Según Morris (2019), la historia del café se divide en cinco grandes eras que abarcan desde el siglo IX hasta la actualidad, marcadas por cambios en su producción, consumo y significado cultural. El fruto fue descubierto en Etiopía, en la región de Kaffa, por un pastor de cabras llamado Kaldi, quien observó que sus animales mostraban una inusual energía después de consumir las cerezas del cafeto. Posteriormente, el fruto se llevó a un monasterio local, donde los monjes experimentaron el mismo efecto, tomando una infusión para mantenerse despiertos durante las plegarias nocturnas.

En la segunda era, entre los siglos XV y XVI, el café se consolidó como cultivo y producto comercial en Yemen, particularmente en la ciudad portuaria de Moca, y se expandió hacia Irán, Egipto, Siria y Turquía. Las cafeterías (*qahveh khaneh*) se convirtieron en centros de encuentro y debate, desempeñando un papel social similar al de las tabernas europeas, pero asociadas a un consumo sobrio. La ubicación estratégica de la Península Arábiga, como punto de tránsito para comerciantes y peregrinos, facilitó la difusión de la bebida hacia los demás continentes.

La tercera era, durante el siglo XVII, se caracterizó por la llegada del café a Europa a través de los puertos de Venecia y Marsella. Rápidamente se popularizó en países como Inglaterra, Francia y Países Bajos, donde surgieron las *penny universities* y cafés literarios que fomentaron el intercambio intelectual. El café pasó de ser una bebida exótica a un símbolo de modernidad y sociabilidad urbana.

En la cuarta era, en el siglo XVIII, la expansión colonial y las expediciones científicas llevaron el cultivo a América, el Caribe y Asia. Las condiciones climáticas tropicales y subtropicales favorecieron su adaptación, y las plantaciones, sostenidas principalmente por trabajo esclavo, lo convirtieron en uno de los cultivos de exportación más rentables del mundo. El control de la producción pasó de las regiones originarias a las colonias, transformando el comercio global del café.

La quinta era, comprendida desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, se distingue por la industrialización del tostado y envasado, el auge de las marcas globales y, más recientemente, el desarrollo de la “tercera ola” del café. Este movimiento valora la trazabilidad, la calidad sensorial y la sostenibilidad, vinculando al consumidor con el origen y el productor. En la actualidad, el café sigue siendo un motor económico para numerosos países en desarrollo, al tiempo que su cultura se diversifica y expande a nivel global (National Coffee Association, 2017; Morris, 2019).

4.1.2. Especies

Coffea arabica, es la primera especie de café, ocupando actualmente un 60 a 70% de la producción mundial. Es un arbusto leñoso de hojas verdes de alturas entre 9 a 12 metros en un ecosistema silvestre, sin embargo, en áreas de cultivo pueden podarse a menor tamaño para facilitar la cosecha. Tiene hojas verdes brillantes, flores blancas y frutos, conocidos como drupas (cerezas de café), las cuales maduran entre 30 y 35 semanas posterior a la floración, pasando de un color verde a rojo intenso o amarillo, según la variedad. Su característica principal es la autopolinización, lo que favorece cierta estabilidad genética en las poblaciones cultivadas. De acuerdo con Morris (2019), el café arábica se desarrolla mejor en zonas altas, con climas frescos y estaciones secas bien definidas, factores que inciden directamente en su perfil sensorial. Se distingue por notas florales y frutales, con matices dulces de frutos rojos, lo que lo convierte en la base de los cafés de especialidad.

Coffea canephora, conocida como Robusta, comenzó a cultivarse ampliamente tras una epidemia de roya en Asia a finales del siglo XIX. Originaria de la cuenca

del Congo, esta especie fue adoptada por su notable resistencia a plagas y enfermedades, además de su capacidad de adaptarse a bajas altitudes, altas temperaturas y ambientes húmedos se caracteriza por un porte mayor y ramas que se disponen en forma de sombrilla. Produce cerezas más pequeñas y agrupadas en racimos, lo que facilita la cosecha. Actualmente representa cerca del 35–40% de la producción global. Su contenido de cafeína es casi el doble que, en el Arábica, actuando como un mecanismo de defensa natural contra insectos. Sin embargo, Morris (2019) resalta que, en términos organolépticos, su calidad se considera inferior, con perfiles sensoriales más amargos, terrosos y astringentes, razón por la cual suele emplearse en cafés solubles, mezclas industriales y como componente en *espressos* para aportar cuerpo y crema.

Además, se las dos especies principales, se encuentra *Coffea liberica*, especie originaria de África Occidental, particularmente de Liberia, de donde toma su nombre. Su introducción al cultivo comercial se dio en el siglo XIX como alternativa frente a la devastadora epidemia de roya que afectó a *Coffea arabica* en Asia. De acuerdo con Morris (2019), aunque inicialmente fue vista como una solución prometedora, su expansión fue limitada debido a su perfil sensorial inconsistente, descrito como áspero, con matices ahumados, leñosos y poco refinados, lo que dificultó su aceptación en los mercados europeos.

Morfológicamente, se caracteriza por su porte arbóreo, alcanzando hasta 20 metros de altura, y por presentar granos de gran tamaño y forma alargada, significativamente más voluminosos que los de Arábica o Robusta. Según Solano (2020), posee ventajas agronómicas relevantes, como la tolerancia a altas temperaturas, suelos pobres y secas, además de una resistencia mayor frente a plagas y enfermedades, lo que la convierte en una especie resiliente bajo condiciones adversas. A nivel productivo, su rendimiento es inferior al de otras especies y su ciclo de maduración es más largo (35–40 semanas), lo que reduce su competitividad en sistemas de gran escala. Sin embargo, mantiene importancia cultural y económica en países del Sudeste Asiático, como Filipinas, Malasia e Indonesia

En la actualidad, la investigación genética y agronómica se orienta hacia la hibridación de estas especies, buscando combinar la resistencia de *Coffea canephora* con la calidad sensorial de *Coffea arabica*. Estos desarrollos responden a los desafíos impuestos por el cambio climático, la propagación de plagas y la necesidad de garantizar sostenibilidad en la caficultura global (Morris, 2019).

4.1.3. Cultivo a nivel mundial

La producción global de café supera los once millones de toneladas de grano verde al año, concentrada en cerca de 80 países productores. Brasil lidera con alrededor del 30–38 % de la producción total, seguido por Vietnam (aproximadamente 17 %) e Indonesia (cerca del 7 %) en 2023–2024. Asimismo, Colombia y Etiopía son productores destacados, con una participación del entorno del 6 % y 5 %, respectivamente. Con respecto al comercio de especies, el café Arábica representa entre el 60 y 70 % del volumen mundial y es favorecido por mercados de alta calidad, mientras que el Robusta aporta el restante 30–40 %, utilizándose principalmente en la industria alimenticia para la creación de bebidas instantáneas y mezclas de bajo costo (Amrouk et al., 2024).

Vietnam se destaca como el principal productor de café Robusta, representando cerca del 95 % de su producción total, lo que lo convierte en el mayor exportador mundial de esta variedad; seguido de Brasil, Indonesia y Uganda. Por otra parte, Brasil, se encuentra dentro de los países dominantes en el cultivo de Arábica (entre 40 y 44 millones de sacos), seguido por Colombia (12–13 millones de sacos), Indonesia, Etiopía y países centroamericanos los cuales aportan varios millones de sacos anuales (USDA, 2025; FAO, 2025)

Por el lado de los principales mercados importadores se encuentra la Unión Europea y Estados Unidos, representando más del 50% del comercio mundial de café verde (Amrouk et al., 2025). Estados Unidos importa mayormente Arábica desde Brasil y Colombia, siendo un mercado con tendencia creciente (USDA, 2025).

4.2. Café de Guatemala

4.2.1. Producción de café en Guatemala

El café es el cultivo permanente de mayor extensión en Guatemala, con 376,000 hectáreas cultivadas y 338,000 hectáreas en cosecha; en donde el 98 % corresponde a la especie *Coffea arabica* y *el resto Coffea canephora* (USDA, 2025). La actividad cafetalera involucra aproximadamente 125,000 productores distribuidos en 204 municipios de los 334 del país (MAGA, 2013). El 97 % de los productores son pequeños caficultores, en donde el 44 % son responsables de la producción nacional. Los productores medianos representan alrededor del 3 % de total y aportan el 31 % de la producción. Mientras que los grandes productores no superan el 1 %, y concentran el 25 % restante (USDA, 2025).

En el ciclo 2024/2025 se produjeron 3.47 millones de sacos de 60 kg, y para el siguiente ciclo la producción nacional de café se estima un incremento a la producción de 3.54 millones de saco según USDA (2025). Esta tendencia de crecimiento responde a la renovación gradual de cafetales y a la adopción de híbridos resistentes a la roya (ANACAFÉM, 2023).

La diversidad geográfica y climática del país es un factor clave en la producción de café. Las altitudes elevadas, la influencia de suelos volcánicos y la variedad de microclimas permiten obtener granos diferenciados que se distinguen en el mercado internacional por su alta calidad. El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAGA) clasifica 7 regiones según la distribución de productos y extensión territorial.

Cuadro 1. Distribución de productores de café en Guatemala, indicado por departamento y región

| Región | Departamento | Número de productores |
|---------------|---|------------------------------|
| I | San Marcos y Quetzaltenango | 11,843 |
| II | Retalhuleu, Suchitepéquez y Sololá | 10,208 |
| III | Escuintla, Sacatepéquez, Chimaltenango, Guatemala y El Progreso | 12,072 |
| IV | Santa Rosa, Jalapa y Jutiapa | 19,299 |
| V | Huehuetenango y Quiché | 14,075 |
| VI | Alta Verapaz, Baja Verapaz y parte de Izabal | 16,707 |
| VII | Zacapa, Chiquimula y parte de Izabal | 5,796 |
| | Total | 90,000 |

Fuente: (MAGA, 2013)

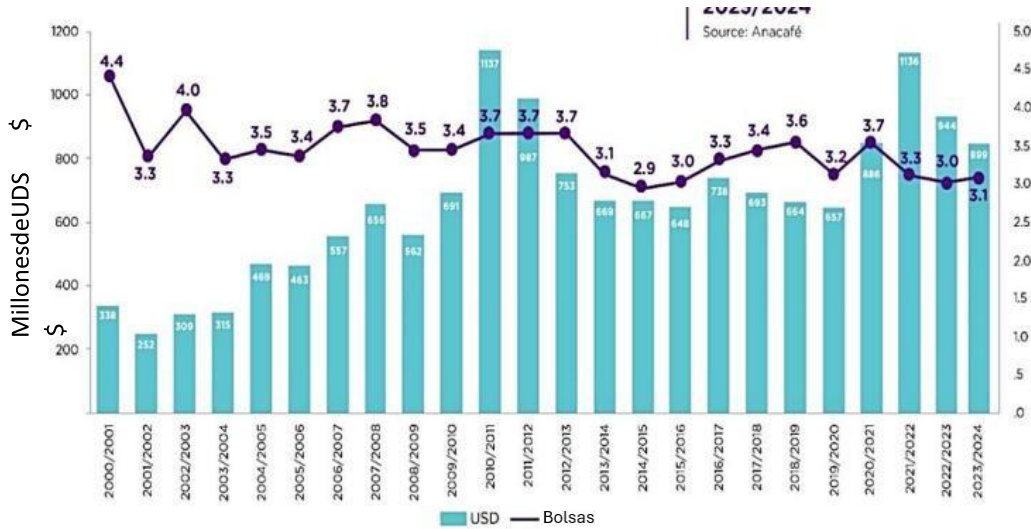
El sistema productivo guatemalteco combina prácticas tradicionales con procesos técnicos de conservación de suelos, manejo de sombra y cosecha manual, lo que contribuye a mantener estándares de calidad consistentes (ANACAFÉ, 2021).

Guatemala se caracteriza por llevar a cabo la cosecha de forma manual, con un beneficiado húmedo, el método más difundido en el país, el cual produce tazas más limpias y consistentes. Sin embargo, también se utiliza el beneficio seco, pero en menor medida y asociada a perfiles más frutales y complejos (ANACAFÉ, 2023).

4.2.2. Importancia económica

El café es uno de los principales productos de exportación del país, aportando aproximadamente 6.3 % del PIB agrícola nacional (USDA, 2025). Durante el ciclo 2023/2024, las exportaciones generaron alrededor de \$584 millones; a comparación en el ciclo 2025, que el valor exportado es \$1,013 millones, existiendo un crecimiento del 73 %; posicionando al café como el tercer producto agroexportador, después del banano y el azúcar (AGEXPORT, 2025). Con respecto al destino comercial, los principales destinos son Norteamérica (52.7 %), con predominio de Estados Unidos (41.4 %) y Canadá (11.2 %); Europa (25.1 %), donde destacan Bélgica (8.4 %), Italia (5.2 %) y Alemania (4.1 %); y Asia (19.8 %), con Japón (9.8 %), Corea del Sur (4.7 %) y Taiwán (1.8 %) como los mayores compradores (ANACAFÉ, 2023)

Figura 1. Historial de millones de sacos de café oro exportados de Guatemala y divisas durante el período 2000 a 2024



Fuente: ANACAFÉ (2025). Traducción Propia.

El café guatemalteco representa aproximadamente el 3 % del comercio mundial, sin embargo, su reconocimiento se debe principalmente en la calidad del *Arabica* de altura. Las regiones han sido reconocidas y premiadas, posicionando al valorado al país en mercados nicho alrededor del mundo (ANACAFÉ, 2023).

En el contexto rural, la caficultura no solo representa una fuente directa de ingresos para las familias productoras, sino también un motor de empleo temporal y permanente en labores como siembra, manejo del cultivo, cosecha y beneficiado. Se estima que la cadena productiva del café genera más de medio millón de empleos anualmente, especialmente en temporadas de corte, cuando la demanda de mano de obra aumenta de forma considerable en las fincas (ANACAFÉ, 2023), siendo una de las fuentes de trabajo más importante.

Aunque Guatemala es principalmente un país exportador, el consumo interno de café ha mostrado un crecimiento constante en los últimos años. Para el ciclo 2025/2026 se proyecta en 720,000 sacos de 60 kg. Dicho incremento es debido al

surgimiento de cafeterías, cadenas de restaurantes y supermercados, así como por la creciente cultura de cafés de especialidad en centros urbanos (USDA, 2025).

4.2.3. Regiones productoras

Los microclimas, la diversidad geográfica y climática del país ha permitido desarrollar variedades de café en diferentes departamentos, permitiendo identificar ocho regiones cafetaleras, las cuales son reconocidas oficialmente por la Asociación Nacional del Café (ANACAFE). Estas regiones comprenden distintos departamentos, siendo los límites establecidos por las características agroecológicas específicas, como altitud, microclima, tipo de suelo y régimen de lluvias (ANACAFÉ, 2013). De igual forma, estas regiones sirven para identificar las características organolépticas de las diferentes variedades de café.

Antigua Guatemala: región caracterizada por el suelo volcánico rico en minerales, debido a que está rodeada por el Volcán de Agua, Volcán de Fuego y Volcán Acatenango. Cuenta con un clima bajo en humedad, días calientes y noches frías, permitiendo cafés ricos en aroma y equilibrados. El cultivo se encuentra a una altura de 1,400 a 1,700 metros sobre nivel de mar (msnm), comprendiendo una cosecha de noviembre a marzo, con notas características dulces e intensas, cuerpo cremoso. Es uno de los cafés más ácidos, en comparación de las demás regiones (ANACAFÉ, 2013).

Acatenango: zona con bajas temperaturas y brisas que provienen del océano Atlántico, con cultivos bajo sombra a alturas desde 1,300 a 2,000 msnm. Posee suelos con alto contenido de minerales, desarrollando notas de acidez profunda, con un cuerpo balanceado y aroma intenso. Se suele cosechar entre diciembre a marzo (ANACAFÉ, 2013).

Atitlán: cafetales rodeados del Volcán Tolimán, Atitlán y San Pedro, siendo suelos ricos en minerales y en materia orgánica. Además, la geografía del área permite el origen de microclimas beneficios para el cultivo, desarrollando cafés de cuerpo completo, aroma intenso y notas afrutadas. Siendo uno de los cafés más dulces

de las regiones. Se cultiva a alturas entre 1,500 a 1,800 msnm, cosechándose entre diciembre a marzo (ANACAFÉ, 2013).

Huehuetenango: se caracteriza por ser una de las regiones más altas con alturas entre 1,600 a 2,400 msnm, y más secas del país. Esta zona cruza la sierra de los Cuchumatanes, y no posee suelos volcánicos. El café destaca por su acidez profunda y notas avinadas, florales y frutales (mango, cítricos y jazmín). La cosecha comprende de enero a abril (ANACAFÉ, 2013).

Cobán: región ubicada al norte del país, caracterizado por su clima lluvioso, húmedo y nublado durante todo el año. Los suelos de cultivo suelen ser calizos y arcillosos, posicionados a una altura entre 1,300 a 1,500 msnm. El café se diferencia por su aroma fragante, poca acidez y notas frutales (ANACAFÉ, 2013).

Fraijanes Plateau: cerca del volcán de Pacaya, sus suelos se caracterizan por su alto contenido de cenizas y potasio. Se cultiva a altitudes máximas de 1,900 msnm, con climas húmedos y lluviosos. La cosecha sucede entre diciembre y marzo, con acidez pronunciada, aroma balanceado y notas de chocolate oscura y frutas (ANACAFÉ, 2013).

San Marcos: de las regiones más caliente, con altas precipitaciones. El café se cultiva a alturas entre 1,400 a 1,800 msnm, y debido a la presencia de microclimas, la cosecha es temprana (diciembre a marzo) con notas delicadas y florales (ANACAFÉ, 2013).

Nuevo Oriente: todas las fincas se encuentran ubicadas en las montañas, con climas lluviosos y nublados. Es la última área identificada como región cafetalera, pero es una de la de mayor producción. Se caracteriza por sus notas con acidez baja, con sabores especiados y achocolatados (ANACAFÉ, 2013).

4.2.4. Variedades de especies de café en Guatemala

En Guatemala, predominan las dos principales especies de café: *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (menor proporción). El reconocimiento internacional del producto se debe a la diversidad de variedades de café guatemalteco, las cuales se clasifican en dos categorías: la variedad tradicional y la híbrida. Cada una de ellas con características distintas, contribuyendo a la calidad del grano y taza.

Las variedades tradicionales son aquellas que son introducidas tempranamente en una locación, es decir a inicios de la caficultura en el país estudiado. En Guatemala, estas especies se introdujeron en el siglo XIX. Son asociadas a cafés de alta calidad organoléptica, sin embargo, son más susceptibles a enfermedades como la roya (Hoffmann, 2018; Moreno-Ruiz, 2002).

Typica: la primera variedad cultivada en el país, (inicio de la caficultura) originaria de Etiopía, también conocida como café arábigo. Mantuvo un papel predominante en los cultivos hasta la década de 1950 debido a su baja productividad. Se caracteriza por sus notas limpias y elegantes.

Bourbon: reconocida por su excelente calidad de taza, con perfiles balanceados y notas dulces. Posee un rendimiento mayor en comparación con la típica (20 – 30 %), lo que favoreció su adopción masiva en el país. Es una de las variedades más representativas.

Caturra: surge de una mutación natural del bourbon identificada en Brasil en 1930, distribuía a lo largo de Centroamérica. Tiene una gran adaptación en zonas de media y alta altitud, proporcionando notas dulces, acidez balanceada y cuerpo medio. Es una planta de porte bajo, lo que facilita el manejo del cultivo.

Catuía: proviene de cruzamientos naturales entre especies de café Icatú y Catuía. Se caracteriza por su resistencia moderada a enfermedades. Tuvo una adaptación ventajosa en San Rosa en alturas de 1,250 msnm, permitiendo su desarrollo creciente.

Maragogype: surge de una mutación natural de Typica identificada en Brasil, y cultivada en 1960 en Guatemala. La producción es baja, sin embargo, predomina por su calidad. Se adapta mejor en zonas medias y altas.

Por otra parte, se encuentran las variedades híbridas las cuales son resultados de programas de mejoramiento genético desarrollados para enfrentar los retos de la caficultura moderna, como enfermedades y productividad. En Guatemala, estas especies se introdujeron a partir de la segunda mitad del siglo XX lideradas principalmente por la Asociación Nacional del Café (ANACAFÉ)

Pacamara: surge del cruzamiento entre la variedad Paca y Maragogype. Presenta buena adaptabilidad en altitudes medias y altas y tolerancias a sequías o cambios climáticos repentinos. Sin embargo, es una de las variedades susceptibles a la roya. Además, por sus características, es de alta demanda en el mercado por su calidad de taza y rentabilidad.

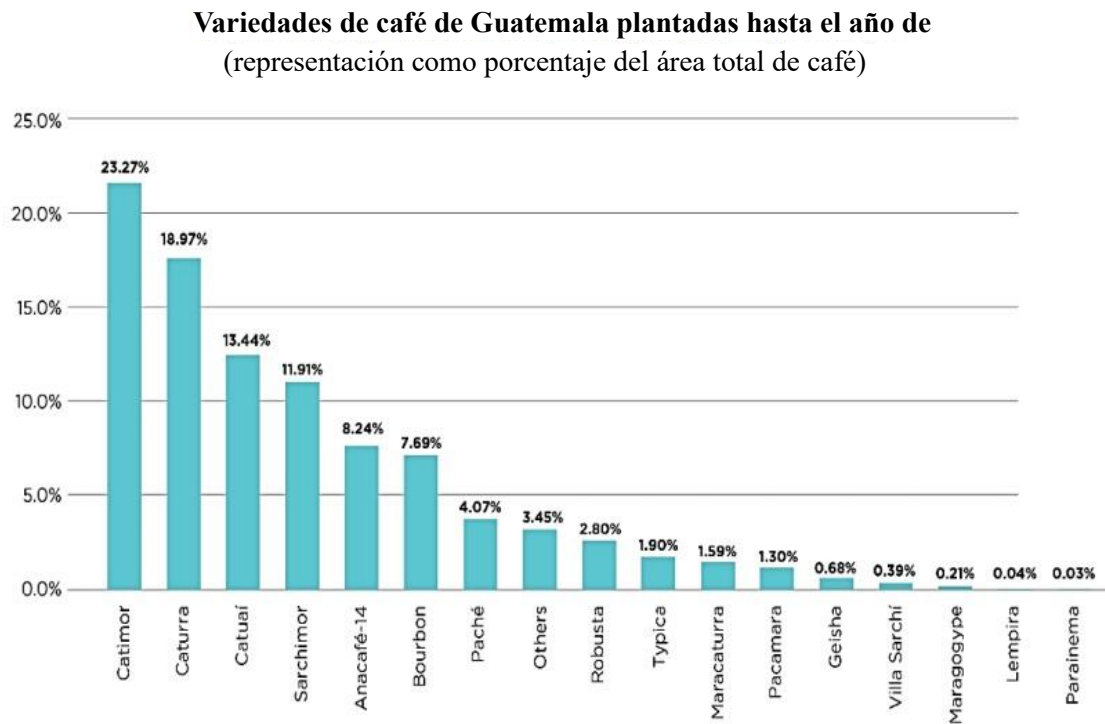
Anacafe-14: se originó en la región oriental de Guatemala a través del cruce natural de la variedad Pacamara y Catimor. Se caracteriza por su alta productividad, grano de tamaño grande, resistente a enfermedades y tolerante a la sequía. En corte bien maduro, se obtienen notas avinadas. Es una de las principales variedades producidas en el país.

Catimor: cruzamiento entre la variedad caturra y el híbrido de Timor (cruce natural entre *Coffea arabica* y *Coffea canephora*). La combinación genética le permite ser un cultivo de alta productividad, resistente a enfermedades y de adaptaciones en zonas de mediana altitud. Es una de las competitivas en el mercado guatemalteco.

Sarchimor: cruzamiento entre el bourbon y el híbrido de timor, surge por la necesidad de resistencia a enfermedades. Actualmente, es una de las más adoptadas en la caficultura guatemalteca, debido a que ofrece buenos rendimientos y productividades. Sin embargo, se debe cultivar a altitudes superiores a 1,200 msnm para obtener características organolépticas competitivas.

(Velásquez, 2019)

Figura 2. Cultivos de variedades de café en Guatemala 2024-2025



Fuente: ANACAFÉ (2013). Traducción Propia.

4.3. Técnicas de barismo

El auge de las cafeterías de especialidad en Guatemala ha promovido la adopción de métodos de preparación manual que buscan resaltar la calidad del grano nacional. Estos sistemas de filtrado, reconocidos dentro del barismo, determinan el perfil sensorial de la bebida. Sin embargo, la técnica de preparación influye en la cantidad de sólidos solubles y compuestos fenólicos que permanecen en los residuos sólidos (Murthy y Naidu, 2012)

4.3.1. Métodos por presión

En este método el agua atraviesa las partículas de café molido por presión, la cual puede ser inducida de manera manual o mecánica. Dentro de los métodos de preparación se encuentran el *espresso*, en donde se utiliza una presión de bomba; el *aeropress*, el cual se utiliza presión manual y finalmente el *moka pot*, en donde se genera por vapor (Hoffmann, 2018).

4.3.2. Métodos por inmersión total

Consiste en la mezcla completa del café con el agua a la temperatura adecuada por un periodo de tiempo de establecido, antes de separar sólidos del líquido. Dentro de estos métodos se encuentra la prensa francesa, el *cold brew* y el *aeropress* (Hoffmann, 2018).

4.3.3. Métodos por filtración o vertido

Se emplea un filtro del material deseado, el cual puede ser de papel, plástico o tela, en donde el agua caliente pasa por el café y dicho filtro con la ayuda de la gravedad. Se pueden clasificar en el diseño de cono de vertido o combinado con decantador. Estos se caracterizan por destacar notas ácidas, florales o frutales, permitiendo un cuerpo más limpio y ligero, o robusto. Dentro de estos se encuentra el V60 y Chemex (Hoffmann, 2018).

4.4. Composición del grano de café

4.4.1. Estructura anatómica del grano

El grano o pepita de café, es la semilla que está contenida en el fruto que provee el cafeto, la cual presenta una anatomía de capas sucesivas, las cuales cumplen con funciones protectoras, de almacenamiento y germinación (Morris, 2019).

Pericarpio: capa externa del grano (cáscara), caracterizada por proporcionarle carnosidad a la cereza madura, y coloración del grano. Compuesta principalmente por pigmentos, celulosa y agua (Morris, 2019).

Mesocarpio o pulpa: tejido parenquimático (parte esencial y funcional del grano) compuesto de azúcares simples, pectinas y hemicelulosas (Moseley et al., 2024).

Mucilago: capa viscosa que recubre el pergamino, compuesta principalmente por polisacáridos como pectinas y arabinogalactanos, altamente higroscópica y determinante en la fermentación y el secado (Illy & Viani, 2005; Moseley et al., 2024).

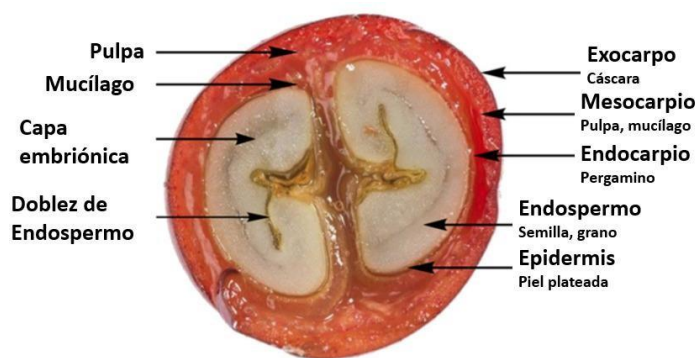
Endocarpio o pergamino: cubierta fibrosa que protege la semilla, constituida principalmente por celulosa y lignina. Sin embargo, este es removido durante el proceso de trillado (ANACAFÉ, 2014; Moseley et al., 2024)

Tegumento: también conocida como película plateada, es una membrana fina compuesta de celulosa, minerales y fibra. Este permanece adherido al grano tras el beneficiado. Puede encontrarse trazas en el café tras su tueste (Farah, 2012; (Moseley et al., 2024).

Endospermo: comúnmente conocido como grano o almendra, el cual representa entre 70 – 80 % del peso seco, y el principal interés industrial. Las células parenquimáticas son las encargadas de almacenar los compuestos principales estructurales, como proteínas, lípidos, sacarosas y compuestos fenólicos (Farah, 2012; Moseley et al., 2024)

Embrión: es una cavidad lateral del endospermo, el cual representa menos del 2 % de la semilla, sin embargo, es importante por su función de germinación y reproducibilidad (ANACAFÉ, 2014; Moseley et al., 2024)

Figura 3. Anatomía del grano de café



Fuente: Moseley et al. (2024)

4.4.2. Composición química del endospermo

El endospermo constituye la principal fracción de acumulación de compuestos, los cuales determinan las propiedades organolépticas como el potencial nutracéutico (aporte nutricional adicional). Su composición mayoritaria consiste en carbohidratos estructurales, seguidos de lípidos, alcaloides y ácidos fenólicos. Es importante mencionar que la cantidad de estos varía según la especie, las condiciones climáticas y de cultivo. La especie *Coffea arabica* se caracteriza por su alto contenido de sacarosa y lípidos, a diferencia del *Coffea canephora*, el cual tiene concentraciones elevadas de polisacáridos, proteínas y cafeína.

Cuadro 2. Composición química del café en ambas especies

| Componente | Concentración (g/100 g) | |
|---|-------------------------|-------------------------|
| | <i>Coffea arabica</i> | <i>Coffea canephora</i> |
| Carbohidratos/fibra | | |
| Sacarosa | 6.0-9.0 | 0.9-4.0 |
| Azúcares reductores | 0.1 | 0.4 |
| Polisacáridos | 34-44 | 48-55 |
| Lignina | 3.0 | 3.0 |
| Pectina | 2.0 | 2.0 |
| Compuestos nitrogenados | | |
| Proteínas/péptidos | 10.0-11 | 11.0-15.0 |
| Aminoácidos libres | 0.5 | 0.8-1.0 |
| Cafeína | 0.9-1.3 | 1.5-2.5 |
| Trigonelina | 0.6-2.0 | 0.6-0.7 |
| Lípidos | | |
| Aceite de café (triglicéricos con insaponificables, esteroides/tocoferoles) | 15-17.0 | 7.0-10.0 |
| Diterpenos | 0.5-1.2 | 0.2-0.8 |
| Minerales | 3.0-4.2 | 4.4-4.5 |
| Ácidos y ésteres | | |
| Ácidos clorogénicos | 4.1-7.9 | 6.1-11.3 |
| Ácidos alifáticos | 1.0 | 1.0 |
| Ácido quínico | 0.4 | 0.4 |

Fuente: Chu (2012). Traducción propia.

4.5. Proceso de beneficio del café

El beneficio del café se define como el conjunto de operaciones que se realizan tras la cosecha. A través de estas, la cereza recolectada se transforma en un grano seco y estable,

apto para su almacenamiento, comercialización y tostado. Este proceso es determinante para la caracterización final del café y por ende su calidad, pues influye directamente en las propiedades físicas, sensoriales y en la conservación de sus compuestos bioactivos. La adecuada ejecución permite proteger las características propias de la bebida como aroma, acidez, cuerpo y dulzor, los cuales son aspectos valorados y competitivos en los mercados internacionales (Orozco, 2017; ANACAFÉ, 2025).

Recepción, selección y despulpado

La primera etapa consiste en la selección meticulosa del fruto maduro, ya que la madurez influye directamente en la concentración de precursores del aroma y del sabor. Los frutos deficientes o inmaduros pueden generar introducir compuestos indeseados que afectan el perfil organoléptico, así como el desempeño del procesamiento, generando tazas con notas astringentes o amargas, y por ende disminuyendo la calidad sensorial de la taza (Bastian et al., 2021). La correcta práctica inicial asegura que los granos destinados al proceso cuenten con un balance adecuado de azúcares, ácidos y compuestos fenólicos, que posteriormente se transformarán en metabolitos responsables de las notas y características del café. La recolección se puede realizar a través de dos vías principales, el *strip pickin*, el cual es manual o mecanizada y consiste en el desprendimiento de todas las cerezas simultáneamente. La ventaja principal es que disminuye costos, sin embargo, mezcla diferentes frutos en distintos estados de maduración. Por otra parte, se encuentra el *selective picking*, el cual es únicamente manual, y en este se eligen únicamente los frutos que están listos para su procesamiento, aunque suele ser más costoso (Haile & Kang, 2019; ANACAFÉ, 2020).

En la etapa del despulpado se separa el epicarpio y el mesocarpio de la cereza mediante un proceso mecánico de remoción, dejando el grano cubierto únicamente por el mucílago. En esta fase no se presentan cambios significativos en los compuestos bioactivos del grano (Bastian et al., 2021). Sin embargo, dependiendo del tipo de beneficio que se utilice, el procedimiento varía. En el beneficio húmedo, el proceso se realiza con despulpadoras que funcionan por fricción y presión, usualmente acompañadas de un flujo de agua que facilita la remoción de la pulpa y ayuda a separar

los granos inmaduros, los cuales se retiran por flotación (Figueroa Campos et al., 2020). En el beneficio mixto o proceso de semi-lavado, se combina el uso de despulpadoras mecánicas con cantidades controladas de agua, lo cual permite reducir el consumo hídrico frente al método húmedo tradicional, manteniendo la uniformidad del proceso y la calidad del producto final de esta etapa (Ferreira et al., 2023). En contraste, el beneficio seco es empleado en regiones con limitaciones de agua, por lo que se caracteriza por no despulpar las cerezas, sino que se secan al sol o en secadoras mecánicas, de manera que la pulpa y el mucílago se deshidratan junto al grano. Este método confiere perfiles sensoriales más intensos y afrutados, aunque incrementa la heterogeneidad del lote y requiere un control estricto del secado para prevenir defectos y degradación de compuestos bioactivos (Bastian et al., 2021).

Fermentación

La finalidad de esta etapa es la degradación de las sustancias pécticas que recubren el pergamino. Dependiendo del tipo de beneficio que se desarrolla esta fase se lleva a cabo de manera diferente. Esta etapa predomina en el beneficio húmedo, en donde la fermentación suele realizarse en tanques con o sin agua, aprovechando la acción de enzimas endógenas y microorganismos presentes en el mucílago. El tiempo de fermentación oscila entre 12 y 36 horas, y es dependiente por factores propios del grano y del entorno, tales como la altitud del cultivo, la temperatura ambiente y el grosor del mucílago. Este método promueve una taza limpia y balanceada, con perfiles sensoriales de alta calidad cuando se logra un buen control del proceso (Haile & Kang, 2019).

Por otra parte, en el beneficio mixto, el mucilago se retira parcialmente tras el despulpado, por lo que lo restante se degrada durante el proceso de secado. Produciendo cafés con un perfil intermedio con mayor dulzor y cuerpo, y menor acidez que en el beneficio húmedo (Ferreira et al., 2023). Por el contrario, en el beneficio seco no se realiza despulpado ni fermentación en tanques; si no que se caracteriza por que la cereza entera se seca al sol o en secadoras mecánicas, originando una fermentación espontánea dentro de la fruta. Este tipo de fermentación es más difícil de controlar y conlleva mayor riesgo de sabores avinagrados o defectos si no se maneja adecuadamente, pero puede

generar cafés intensos, con notas frutales y complejas muy apreciadas en mercados de especialidad (Bastian et al., 2021).

Durante esta etapa, en la fermentación húmeda y mixta, participan principalmente levaduras y bacterias lácticas y acéticas, responsables de la degradación de los polisacáridos presentes en el mucilago, generando metabolitos secundarios como ácidos orgánicos, alcoholes y ésteres que modifican la composición de los bioactivos y contribuyen a la formación de aromas característicos. Siendo, el manejo de la fermentación ya sea en húmedo, mixto o seco, un punto crítico de control en la calidad final del café (Bastian et al., 2021).

Lavado

El lavado tiene como objetivo eliminar los restos de mucilago permanentes adheridos al pergamino tras la fermentación. En el beneficio húmedo, se realiza con abundante agua en canales o tinas, donde los granos se agitan constantemente, separando los más densos de los defectuosos mediante flotación. Esto permite la obtención de granos limpios, uniformes y libres de residuos, los cuales contribuyen a un perfil sensorial balanceado y con acidez brillante (Haile & Kang, 2019). Con respecto al beneficio mixto, el lavado es parcial, empleando menor cantidad de agua y retirando únicamente una fracción del mucilago, dejando el resto adherido para finalizar su degradación en el secado. En este se obtienen cafés con mayor cuerpo, dulzor y complejidad en notas. Contrariamente, se encuentran el beneficio seco en donde no se realiza lavado, ya que la cereza se seca completa, por lo que mucilago permanece hasta su deshidratación. Este proceso desarrolla perfiles intensos y afrutados (Ferreira et al., 2023).

Secado

Etapa crítica del procesamiento de grano de café, el cual tiene como objetivo reducir la humedad de grano hasta valores estables de entre 10% y 12%, asegurando su conservación y evitando el desarrollo de microorganismos durante el almacenamiento. En el beneficio húmedo, tras el lavado, el café pergamino se extiende en patios de cemento o en camas elevadas, donde se mantiene en constante volteo para garantizar un

secado uniforme. En condiciones de alta humedad o época de lluvias, se recurre a secadoras mecánicas, las cuales permiten un control más preciso de la temperatura y minimizan el riesgo de defectos como el olor a moho. Mismo procedimiento se lleva a cabo para el beneficio mixto, con el cuidado necesario para evitar fermentaciones secundarias causadas por el mucilago restante al pergamino. Finalmente, en el beneficio seco, el grano se extiende en campos para el secado al sol o se emplean secadores, por tiempo de entre 10 a 25 días, ajustándose según el clima. En este tipo de beneficio el riesgo por fermentación indeseada es mayor (Haile & Kang, 2019).

Considerando el comportamiento bioquímico, el secado controla la actividad metabólica residual en el grano, por lo que una deshidratación lenta y uniforme permite la conservación de los ácidos clorogénicos, cafeína y trigonelina. A diferencia de la deshidratación rápida o excesiva, la cual puede llegar a causar estrés oxidativo, reduciendo la estabilidad de compuestos fenólicos y alterando el perfil sensorial. Además, el tipo de secado influye en la generación de precursores que definirán el aroma final durante el tostado (Haile & Kang, 2020; Bastian et al., 2021).

Trillado y clasificación

El trillado, también denominado pilado del café, tiene como objetivo separar el pergamino y la película plateada que recubre el grano, para exponer la almendra o café oro. Este proceso se realiza con maquinaria, las cuales se conocen como trilladoras o descascaradoras. Es importante mencionar que, en ciertas regiones cafetaleras, aún se emplean sistemas manuales como la tahona y el pilón, no obstante, su utilización es cada vez más limitada debido al daño que ocasiona al grano (CENICAFÉ, 1932) Antes de introducir el grano a la maquinaria, se somete un proceso de limpieza, que elimina las impurezas u objetos extraños con aventadores, zarandas o dispositivos magnéticos, con el fin de proteger la maquinaria y evitar alteraciones del producto final (Haile & Kang, 2020). Las máquinas trilladoras modernas constan de un chasis, tolva, cilindros descascaradoras y sistemas de ventilación que permiten la separación eficiente la cascarilla. Tras la trilla, se procede a la retrilla, procedimiento de seguridad, que tiene el propósito de remover todo el pergamino restante (CENICAFÉ, 1932).

La clasificación del café trillado es la etapa con la cual finaliza el beneficio del café, y tiene la finalidad de separar los granos de acuerdo con su tamaño, forma, densidad, color y defectos. La clasificación se realiza mediante zarandas, cribas perforadas o separadores ópticos, complementados en ocasiones con selección manual. Se distinguen categorías como pasilla o vano, segunda, tercera y primera clase, caracolillo y granos excelsos, entre otras. Una clasificación rigurosa y constante permite garantizar la regularidad de los lotes y acceder a mercados diferenciados, especialmente aquellos que demandan cafés de especialidad (USDA, 2020; Haile & Kang, 2020).

4.6. Ácidos clorogénicos en el café

Los compuestos fenólicos constituyen un amplio grupo de metabolitos secundarios de origen vegetal que se caracterizan por poseer en su estructura al menos un anillo aromático unido a uno o más grupos hidroxilo. Estos compuestos desempeñan un papel fundamental en la fisiología de las plantas, ya que participan en la defensa frente a patógenos, radiación ultravioleta y estrés oxidativo, además de contribuir a características sensoriales como el color, la astringencia y el aroma de frutas y bebidas (Stalikas, 2007). Se estima que existen más de 8000 estructuras fenólicas diferentes, clasificadas en subgrupos como flavonoides, taninos, lignanos y ácidos fenólicos, entre otros (Crozier et al., 2006). Dentro de estos últimos se encuentran los ácidos hidroxicinámicos, cuya esterificación con el ácido quínico da lugar a los ácidos clorogénicos, los principales responsables de la actividad antioxidante y de varias propiedades organolépticas en el café (Chaves-Ulate & Esquivel-Rodríguez, 2019).

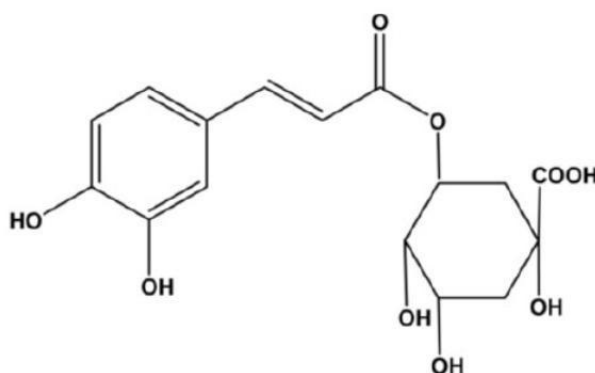
4.6.1. Definición y estructura química del ácido clorogénico

Los ácidos clorogénicos (ACs) constituyen una de las fracciones más abundantes de compuestos fenólicos presentes en el café. Químicamente, se definen como ésteres del ácido quínico con uno o más ácidos hidroxicinámicos, principalmente ácido cafeico, ferúlico y p-cumárico (Farah, 2006). La forma más representativa es el ácido 5-O-cafeoilquínico, denominado comúnmente ácido clorogénico. Se han identificado más de 70 isómeros estructurales dentro de esta familia, los cuales están presentes en el café, clasificándose en ácidos cafeoilquínicos

(CQA), feruloilquínicos (FQA), p-cumaroilquínicos (p-CoQA) y dicafeoilquínicos (diCQA) (Panusa et al., 2013).

Los ácidos clorogénicos, presentan un núcleo aromático con grupos hidroxilo que les atribuye su elevada capacidad reductora y actividad antioxidante. Son compuestos hidrosolubles y termosensibles, lo que condiciona su estabilidad en los procesos de tostado y extracción (Farah, 2006). En los granos verdes de café, los ACs representan entre el 4 % y el 12 % del peso seco, superando en abundancia a la cafeína (Crozier et al., 2014). La concentración de estos depende directamente de la especie, por lo que *Coffea arabica* presentan menor contenido de ACs en comparación con *Coffea canephora* (robusta), lo que influye en sus diferencias de sabor y astringencia (Farah, 2006).

Figura 4. Estructura del ácido 5-O-cafeoil-ácido quínico (ácido clorogénico)



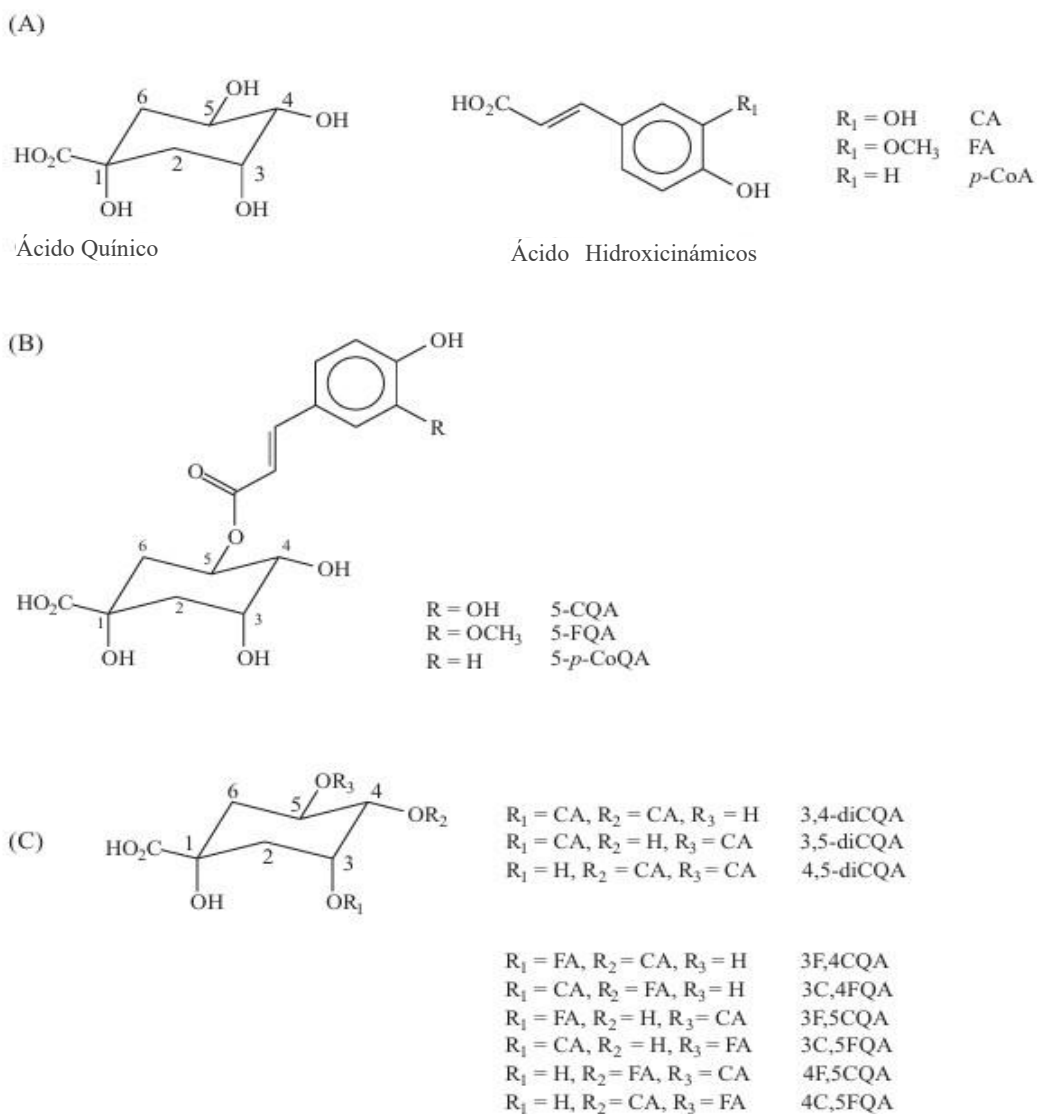
Fuente: Chaves-Ulate & Esquivel-Rodríguez (2019)

Durante el beneficiado, especialmente en el proceso de tostado, los ACs sufren isomerización, hidrólisis y degradación térmica, generando lactonas, quinolactonas y melanoidinas. Dichos compuestos determinan el grado de acidez, amargor, color y aroma característico del café tostado. Por lo que conforme aumenta el grano de tostado, se evidencia la disminución de los ácidos clorogénicos (Panusa et al., 2013).

La Figura 4 presenta de manera esquemática la estructura de los ácidos clorogénicos y sus principales derivados. En (A) se observa el ácido quínico y los ácidos hidroxycinámicos que participan en la esterificación (cafeico, ferúlico y

p-cumárico). En (B) se presentan los monómeros, entre ellos el 5-CQA, 5-FQA y 5-pCoQA. Finalmente, en (C) se ilustran los diésteres y ésteres mixtos, como los 3,4diCQA, 3,5-diCQA y 4,5-diCQA (Farah, 2006).

Figura 5. Estructuras básicas de los ácidos clorogénicos. (A) Ácido quínico y ácidos hidroxicinámicos. (B) Monoésteres de ácido quínico con ácidos cafeico, ferúlico y p-cumárico. (C) Diésteres y ésteres mixtos de ácido quínico



Fuente: Farah (2006). Traducción propia.

4.6.2. Propiedades biológicas

Los ácidos clorogénicos (ACs) se caracterizan por poseer un amplio perfil bioactivo. Tienen capacidad antioxidante (interceptan radicales y contribuyen a la estabilidad de matrices alimentarias), actividad antimicrobiana y efectos metabólicos asociados a una menor respuesta. Al ser uno de los componentes con mayor predominancia en el grano de café, es de interés a nivel industrial.

Actividad antioxidante

Los ácidos clorogénicos (ACs), especialmente el 5-O-cafeoilquinico (5-CQA), tienen una alta capacidad para donar hidrógeno y electrones, quelar metales de transición y atenuar la peroxidación lipídica. Asimismo, pueden modular vías celulares, lo cual incrementa enzimas antioxidantes endógenas. Debido a esto la actividad antioxidante de los AC actúa temprano frente a los radicales libres y evita que el daño, protegiendo lípidos, proteínas y pigmentos. Así como, mantiene estables los aromas/sabores en matrices alimentarias (Lu et al., 2020).

Actividad antimicrobiana

Los ácidos clorogénicos han sido evaluados como agentes antimicrobianos naturales de interés para extender vida útil y apoyar la preservación de alimentos. Estudios demuestran una actividad marcada frente a bacterias Gram positivas *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Listeria monocytogenes*, así como también, pero en menor medida, frente a Gram negativas como *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Salmonella* spp. La diferencia se atribuye a la barrera de la membrana externa en bacterias Gram negativas que dificulta el paso de fenoles hidrofóbicos (Castro-Díaz et al., 2025).

Actividad metabólica

Poseen características metabólicas que permiten suavizar los picos de glucosa después de comer y a reducir ligeramente la presión arterial. Asimismo, apoyan al sistema digestivo, enlenteciendo la liberación y el paso de azúcares hacia la sangre.

A nivel hepático y muscular, favorecen un uso más eficiente de la glucosa, mejorando la sensibilidad a la insulina (Naveed et al., 2018).

Actividad antiinflamatoria

Los ácidos clorogénicos presentan actividad antiinflamatoria, pues pueden moderar las respuestas inflamatorias excesivas. Es decir, ayuda al sistema nervioso para liberar mediadores relacionados con el enrojecimiento, dolor e hinchazón. Asimismo, contribuyen a las defensas antioxidantes naturales de las células. Por otra parte, originan un efecto barrera e inmunometabólico en el tracto digestivo, manteniendo la mucosa digestiva íntegra, limitando el paso de endotoxinas bacterianas a la sangre, por lo que contribuye a la disminución del estrés oxidativo (Huang et al., 2023).

4.6.3. Importancia a nivel industrial

En la industria, el ácido clorogénico se ha consolidado como ingrediente funcional transversal en tres industrias principales, siendo las de: alimentos y bebidas, nutracéutica y dermocosmética. En alimentos y bebidas, es utilizado frecuentemente como extracto, con el fin de retardar la oxidación y estabilizar color y sabor. Además, es reconocido por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) bajo cartas de no objeción, las cuales contemplan categorías como aguas saborizadas, café y té listos para beber, mezclas instantáneas, lácteos, barras y confitería. Por lo que, la aprobación reconoce al CGA como un antioxidante de etiqueta limpia para uso industrial (U.S. Food and Drug Administration, 2020).

En nutracéutica, los extractos de café verde estandarizados en CGA se formulan como cápsulas o polvos, con la finalidad de soporte antioxidante y metabólico. Ensayos clínicos muestran descensos modestos de la presión arterial y de la glucosa posprandial, con efecto dependiente de dosis, duración y población (Han et al., 2019). En dermocosmética, el CGA es utilizado como activo antioxidante y antiinflamatorio con potencial fotoprotector y de soporte de matriz extracelular. Este ha demostrado protección frente a fotoenvejecimiento UVA en fibroblastos humanos y se han

revisado aplicaciones cosméticas que valorizan subproductos del café (Xue et al., 2022).

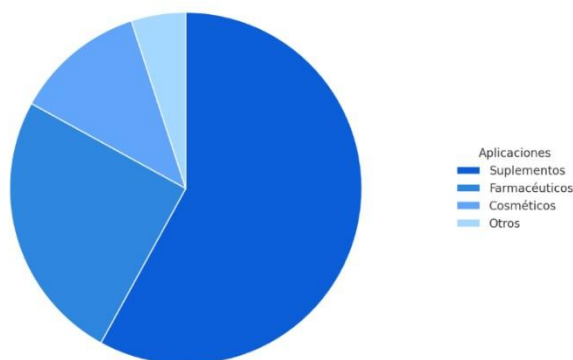
4.6.4. Producción y mercado global

La oferta mundial de ácido clorogénico (CGA) se concentra en Asia, donde el ingrediente se produce y comercializa sobre todo como extractos de madreSelva *Lonicera japonica* (madreSelva), *Eucommia ulmoides* y extracto de café verde (Zhu et al., 2024). Siendo la madreSelva, la principal materia prima a nivel industrial. La demanda de esta se centraliza principalmente en suplementos, seguido de farmacéutica y cosmética.

El patrón de consumo demuestra que Norteamérica concentra la mayor cuota, impulsada por la demanda de productos naturales y la popularidad del extracto de café verde. En 2024, el tamaño del mercado del ingrediente CGA se estimó en aproximadamente \$0.15 mil millones, proyectándose a alcanzar los \$0.21 mil millones en 2033, con una tasa compuesta cercana al 3.1 % (Business Insights, 2024).

Entre los actores líderes figuran Naturex, EUROMED SA, Applied Food Sciences, Sabinsa, Nanjing Zelang, Zhejiang Skyherb, Changsha E.K HERB y Nutragreen, siendo la principal cadena de suministro asiática. Entre los impulsores de la utilización del CGA, destaca la preferencia por ingredientes naturales y de etiqueta limpia, y disponibilidad de materia prima (Business Insights, 2024).

Figura 6. Participación global del ácido clorogénico (CGA) por aplicación



Fuente: Business Insights (2024)

4.7. Subproductos del café

Los residuos se refieren a los subproductos generados durante las diversas etapas de procesamiento y consumo del café, en donde cada uno de ellos posee propiedades químicas y físicas que permiten su posterior uso en diferentes aplicaciones (Daglia, 2012).

Los principales residuos del café en la etapa de producción y procesamiento son cinco, la pulpa de café, la cascara, el líquido de beneficio húmedo, la cascara plateada y los pozos de café.

Pulpa de café: se genera durante el despulpado del grano, se caracteriza por tener altos contenidos de hidratos de carbono, proteínas y polifenoles. Debido a esto es muy utilizado en la producción de biogás y biofertilizantes.

Cascara del café: se obtiene en el proceso de beneficio seco, se caracteriza por tener alto contenido de fibra y compuestos fenólicos. Se suele utilizar actualmente para la alimentación animal y como producto principal de compostaje.

Líquido de beneficio húmedo: son obtenidas de procesos industriales de producción de café, las cuales poseen alta cantidad de materia líquida de nutrientes. Dichas aguas pueden ser tratadas para minimizar el impacto ambiental o ser empleadas para la generación de energía renovable.

Cascara plateada: es uno de los subproductos principales obtenidos a partir del proceso de tostado. Este residuo se emplea para la producción de bioplásticos, cosméticos o aditivos alimentarios.

(Campos-Vega et al., 2015)

4.7.1. Posos de café

Los posos de café, también denominados spent coffee grounds (SCG), constituyen el principal subproducto derivado de la preparación de la bebida. Se estima que únicamente entre 8 y 12 % de los sólidos solubles presentes en el grano se transfieren a la infusión, mientras que la fracción restante queda retenida en el residuo

sólido (Campos-Vega et al., 2015). Este subproducto se caracteriza por su elevada humedad y por conservar compuestos bioactivos de interés, como lo pueden ser los polifenoles, específicamente ácidos clorogénicos, y cafeína, así como, proteínas, carbohidratos estructurales, fibra dietaria y lípidos (Chaves-Ulate & EsquivelRodríguez, 2019). Adicionalmente, contiene nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, así como minerales traza (Ca, Mg, Fe, Zn), lo que lo convierte en un material atractivo para su valorización bajo esquemas de economía circular (Haile & Kang, 2019; Ballesteros et al., 2014).

Cuadro 3. Composición química de los posos de café

| Componentes químicos | Composición (g/100 g material seco) | |
|---------------------------|---|--|
| | Posos de café usados (g/100 g material seco) | Piel plateada de café (g/100 g material seco) |
| Celulosa (glucosa) | 12.40±0.79 | 23.77±0.09 |
| Hemicelulosa | 39.10±1.94 | 16.68±1.30 |
| Arabinosa | 3.60±0.52 | 3.54±0.29 |
| Manosa | 19.07±0.85 | 1.77±0.06 |
| Galactosa | 16.43±1.66 | 3.76±1.27 |
| Xilosa | nd | 7.61±0.02 |
| Lignina | 23.90±1.70 | 28.58±0.46 |
| Lignina insoluble | 17.59±1.56 | 20.97±0.43 |
| Lignina soluble | 6.31±0.37 | 7.61±0.16 |
| Grasa | 2.29±0.30 | 3.78±0.40 |
| Cenizas | 1.30±0.10 | 5.36±0.20 |
| Proteína | 17.44±0.10 | 18.69±0.10 |
| Nitrógeno | 2.79±0.10 | 2.99±0.10 |
| Relación C/N | 16.91±0.10 | 14.41±0.10 |
| Fibra dietética total | 60.46±2.19 | 54.11±0.10 |
| Fibra dietética insoluble | 50.78±1.58 | 45.98±0.18 |
| Fibra dietética soluble | 9.68±2.70 | 8.16±0.90 |

Fuente. Ballesteros et al. (2014). Traducción propia.

Cuadro 4. Composición mineral del poso de café

| Elemento mineral | Composición (mg/100 g material seco) | |
|------------------|---|--|
| | Posos de café usados (mg/kg material seco) | Piel plateada de café (mg/kg material seco) |
| Potasio | 11,700±0.01 | 21,100±0.00 |
| Calcio | 1,200±0.00 | 9,400±0.01 |
| Magnesio | 1,900±0.00 | 3,100±0.00 |
| Azufre | 1,600±0.00 | 2,800±0.00 |
| Fósforo | 1,800±0.00 | 1,200±0.00 |
| Hierro | 52.00±0.50 | 843.30±7.90 |
| Aluminio | 22.30±3.50 | 470.60±13.9 |
| Estroncio | 5.90±0.00 | 71.72±0.30 |
| Bario | 3.46±0.05 | 66.26±0.26 |
| Cobre | 18.66±0.94 | 63.30±1.00 |
| Sodio | 33.70±8.75 | 57.30±1.10 |
| Manganeso | 28.80±0.70 | 50.00±0.60 |
| Boro | 8.40±1.10 | 31.90±1.40 |
| Zinc | 8.40±0.20 | 22.30±0.10 |
| Cobalto | 15.18±0.05 | 21.39±1.04 |
| Yodo | <0.10 | 18.30±1.64 |
| Niquel | 1.23±0.59 | 1.64±0.34 |
| Cromo | <0.54 | 1.59±0.00 |
| Molibdeno | <0.08 | 0.24±0.29 |
| Vanadio | <0.29 | 1.01±0.05 |
| Plomo | <1.60 | <1.60 |
| Selenio | <1.60 | <1.60 |
| Galio | <1.47 | <1.47 |
| Estaño | <1.30 | <1.30 |
| Cadmio | <0.15 | <0.15 |

Fuente: Ballesteros et al. (2014). Traducción propia.

Cuadro 5. Composición fenólica de los posos de café según especie

| Constituent | Content (mg/g) |
|-----------------------------|--|
| Caffeoylquinic Acids | |
| 3-*CQA | Arabica 1.10–1.64 Robusta 0.63–0.83 |
| 4-*CQA | Arabica 1.75–2.51 Robusta 0.97–1.16 |
| 5-*CQA | Arabica 2.48–3.59 Robusta 1.18–1.26 |
| Total *CQAs | Arabica 5.33–7.74 Robusta 2.80–2.91 |
| 3,4-**diCQA | Arabica 2.34–2.53 Robusta 1.49–1.99 |
| 3,5-**diCQA | Arabica 1.09–1.26 Robusta 0.62–0.74 |
| 4,5-**diCQA | Arabica 1.46–2.07 Robusta 1.20–1.41 |
| Total **diCQAs | Arabica 4.89–5.79 Robusta 3.31–4.10 |
| Total *CQAs + **diCQAs | Arabica 11.05–13.24 Robusta 6.22–7.49 |
| Caffeine | |
| Caffeine | Arabica 3.59–5.20 Robusta 5.73–8.09 |

*CQA: monocaffeoylquinic acids, **diCQA: dicaffeoylquinic acids.

Fuente: Ballesteros et al. (2014)

Desde el punto de vista fisicoquímico, los posos de café poseen un perfil fenólico con importante capacidad antioxidante, atribuida principalmente a los ácidos clorogénicos, que pueden representar hasta el 10 % del peso seco del café verde y que, en la bebida, alcanzan concentraciones de entre 200 y 550 mg por taza, quedando cantidades relevantes en los residuos (Natella & Scaccini, 2012; Somporn et al., 2011). Estudios recientes han confirmado que dicho residuo mantiene una notable actividad antioxidante medida por ensayos como DPPH y FRAP, además de poseer capacidad antimicrobiana contra microorganismos gram positivos, lo que amplía sus posibles aplicaciones en la industria alimentaria y cosmética (Iriondo-Dehond et al., 2018; Bresciani et al., 2014).

En cuanto a su aprovechamiento industrial, los SCG ofrecen múltiples rutas de valorización. En la industria alimentaria y nutracéutica, se han empleado como fuente de antioxidantes y cafeína en la formulación de suplementos y alimentos funcionales,

o como ingrediente en productos de panificación, incrementando su contenido bioactivo sin afectar de forma significativa las propiedades sensoriales (Bresciani et al., 2014). En la industria farmacéutica y cosmética, los extractos obtenidos de SCG han demostrado potencial como ingredientes antioxidantes y antimicrobianos de interés en formulaciones tópicas (Chaves-Ulate & Esquivel-Rodríguez, 2019). Asimismo, la fracción lipídica, la cual puede llegar a representar hasta el 2 % de su peso seco, se ha empleado para la producción de biodiésel, mientras que la fracción rica en carbohidratos ha sido empleada como sustrato para fermentación en estado sólido y co-digestión anaerobia, aumentando la generación de bioetanol o metano (Kobylińska et al., 2025).

Asimismo, posterior a la extracción de compuestos de interés como los ácidos clorogénicos, los posos conservan propiedades que permiten su uso como biofertilizantes, mejoradores de suelo o materia prima para materiales compuestos y bioplásticos, gracias a su riqueza en fibra insoluble y polisacáridos estructurales (). Esto refuerza la idea de que los SCG no deben considerarse un desecho final, sino un recurso versátil con aplicaciones en sectores tan diversos como la energía, la agricultura, los biomateriales y la industria química, consolidándose como un ejemplo de aprovechamiento en la economía circular (Torres-Valenzuela et al., 2020).

4.8. Técnicas de extracción

4.8.1. Clasificación por fases

La primera clasificación en que se divide las técnicas de extracción es según las fases que intervienen en la transferencia de masa entre la matriz y el disolvente. A lo largo de la historia se han identificado tres principales, siendo las sólido-líquido, líquido-líquido y gas-líquido.

La extracción sólido-líquido, también denominada lixiviación, es una operación unitaria en donde un soluto que se encuentra presente en una matriz sólida se transfiere a un disolvente líquido, el cual lo disuelve y transporta hacia la fase externa. Dicho proceso ocurre en dos etapas principales, siendo la disolución del compuesto

en la superficie del sólido y la posterior difusión a través de la capa límite hacia el disolvente. El rendimiento de la extracción, de acuerdo con Treybal (1980) y McCabe (2007) depende de la naturaleza del sólido, el área superficial disponible, la agitación y temperatura, así como de la relación sólido-líquido. Además, la elección del disolvente también es significativo, ya que debe de presentar la polaridad adecuada para disolver selectivamente los compuestos de interés. El ácido clorogénico, se caracteriza por ser a fin a mezclas polares, como lo puede ser el agua, etanol, metano y mezclas hidroalcohólicas (Ramírez, 2025).

La extracción líquido-líquido, también llamada partición entre disolventes, es otra de las operaciones unitarias en la cual un soluto se distribuye de manera diferencial entre dos fases líquidas inmiscibles, como agua y un disolvente orgánico. El fundamento del proceso es el coeficiente de reparto del soluto entre ambas fases, que depende de su polaridad, la miscibilidad de los líquidos y las condiciones operativas de presión y temperatura (McCabe, Smith & Harriott, 2005). Además, debido a la ausencia de la matriz sólida, el intercambio la transferencia de masa ocurre únicamente en la interfaz entre las dos fases. Para mejorar el rendimiento, se emplean técnicas de agitación o equipos de contactos, que mejores el área interfacial y faciliten la separación de las fases (Shiveler & Koch, 2015).

La extracción gas-líquido (operación unitaria) consiste en que un soluto presente en una fase líquida se transfiere hacia una fase gaseosa que se encuentra en contacto. Este principio se aprovecha en procesos de absorción y desorción, donde la solubilidad del soluto en la fase gaseosa determina la eficiencia del proceso (McCabe, Smith & Harriott, 2005; Treybal, 1980). Actualmente, dicha operación utiliza fluidos supercríticos, como el dióxido de carbono, nitrógeno, entre otros, los cuales permiten extraer los compuestos bioactivos con gran selectividad y sin afectar el perfil organoléptico del mismo (Esquivel & Jiménez, 2012).

4.8.2. Clasificación de tipos de técnicas

El interés por la extracción de compuestos bioactivos ha aumentado significativamente por el uso potencial en industrias como la alimentaria,

farmacéutica y la cosmética. Desde la antigüedad, se han desarrollado y sistematizado diferentes técnicas de extracción, las cuales se han clasificado en convencionales y no convencionales. Estas se diferencian principalmente por el principio de operación, los recursos energéticos empleados, el grado de simplicidad o complejidad en su implementación, así como por el rendimiento y selectividad alcanzada en el proceso (Sik et al., 2020).

4.8.2.1. Convencionales

Los métodos convencionales de extracción, como la maceración, percolación, reflujo y Soxhlet, han sido ampliamente utilizados en la investigación y en la industria debido a su simplicidad y estandarización desde la antigüedad. Sin embargo, presentan importantes limitaciones que restringen su aplicación a gran escala o en contextos donde se requiere sostenibilidad: dentro de las cuales destacan, tiempos de operación prolongados, uso elevado de solventes costosos y de alta pureza, baja selectividad en la recuperación de metabolitos específicos y, en el caso de técnicas que emplean calor, la posible degradación de compuestos termolábiles (Sik et al., 2020).

Maceración: técnica más antigua y simple, que consiste en el contacto de una matriz sólida con un disolvente adecuada durante un tiempo prolongado. La inducción de la transferencia de masa se alcanza mediante la agitación. Se caracteriza por ser una técnica simple y de bajo costo, sin embargo, las desventajas suelen ser los tiempos de operación y baja eficiencia de extracción (Mathews et al., 2024).

Percolación: extracción mejorada de la maceración, pues se caracteriza por ser un proceso continuo en donde el disolvente saturado se reemplaza por solvente fresco constantemente; lo cual mantiene un gradiente de concentración favorable para la transferencia de masa. A diferencia de la maceración, este inicia con el remojo de la materia prima, para posteriormente permitir que el solvente fluya a través del sólido. Aunque presenta mejores rendimientos, se requiere de

grandes cantidades de disolvente y tiempos prolongados de operación (Mathews et al., 2024).

Reflujo: proceso de extracción sólido-líquido a temperatura constante con evaporación condensación repetibles del disolvente durante un período determinado sin pérdida de disolvente. El principio consiste en el aprovechamiento del calor para aumentar la solubilidad y difusividad de los compuestos de interés, acelerando la transferencia de masa en comparación a otras técnicas. Por lo que permite una extracción más rápida, manteniendo constante el volumen de disolvente. Sin embargo, dentro de las desventajas se presenta, el riesgo de degradación, mayor consumo energético y posible coextracción de impurezas (Chua et al., 2016).

Soxhlet: técnica continua desarrollada en 1879, que consiste en la evaporación del disolvente, su condensación y el contacto repetido con la muestra sólida contenida en un cartucho poroso. Se caracteriza por que el medio poroso con el sólido permanece en contacto con el disolvente recirculado. Dentro de las ventajas se presenta el agotamiento casi total del material sólido y la reproducibilidad de resultados. Sin embargo, necesita un elevado consumo de solvente y energía; así como tiempos prolongados de operación y la posible degradación de los compuestos bioactivos termolábiles (López-Bascón & Luque de Castro, 2020).

4.8.2.2. No convencionales

Las técnicas de extracción no convencionales, también denominadas emergentes o intensificadas, han surgido como alternativas a los métodos tradicionales con el fin de superar sus principales limitaciones. Dichas técnicas emplean nuevas fuentes de energía o condiciones de operación innovadoras, como ultrasonido, microondas, fluidos supercríticos, líquidos presurizados o enzimas; para mejorar la transferencia de masa y la liberación de compuestos bioactivos desde las matrices naturales. Dentro de sus ventajas se encuentran la reducción del tiempo de operación, el menor consumo de disolventes orgánicos,

la mayor selectividad y la posibilidad de preservar la integridad de compuestos termolábiles. Por lo que, estas metodologías se consideran más sostenibles y se alinean con el concepto de extracción verde (Chemat & Vian, 2014; Herrero et al., 2006)

Ultrasonido: se basa en el fenómeno de cavitación acústica, en donde las ondas ultrasónicas generan microburbujas en el disolver que implosionan las paredes celulares de la matriz sólida. Sus principales ventajas son la reducción significativa del tiempo de extracción, el menor consumo de solventes y la posibilidad de trabajar a temperaturas moderadas, lo cual preserva compuestos termolábiles. Sin embargo, si no se maneja adecuadamente, existe la posibilidad de degradar los biocompuestos por la exposición prolongada (Chemat & Vian, 2014).

Microondas: utiliza radiación electromagnética para calentar e manera directa la matriz y el disolvente, provocando una rápida ruptura de las estructuras celulares y facilitando la liberación del compuesto de interés. Se caracteriza por permitir un calentamiento volumétrico y homogéneo, reduciendo drásticamente los tiempos de extracción. Pero sus limitaciones consisten en el requerimiento de equipos especializados y la posible degradación de compuestos sensibles al calor (Vinatoru et al., 2017).

Fluidos supercríticos: técnica no convencional que utiliza solventes en estado supercrítico, es decir, por encima de su temperatura y presión críticas, donde poseen simultáneamente propiedades de gas y líquido. El dióxido de carbono es actualmente, el solvente más empleado debido a su baja toxicidad, disponibilidad y bajo costo, además de permitir la obtención de extractos libres de residuos orgánicos. Sus principales ventajas son la obtención de extractos de alta pureza, el menor impacto ambiental y la posibilidad de modular la selectividad ajustando presión y temperatura. No obstante, requiere de equipos de alto costo y condiciones de operación rigurosa (Herrero et al., 2006).

Enzimas: proceso que emplea la capacidad de biocatalizadores específicos (como celulasas, pectinasas o hemicelulasas) para degradar las paredes celulares y estructuras de la matriz vegetal, facilitando la liberación de los compuestos de interés al medio líquido. Esta técnica se considera una alternativa verde, ya que puede reducir el consumo de solventes y emplear condiciones moderadas de temperatura y pH, preservando la integridad de compuestos termolábiles. Se destaca por la alta selectividad que tiene; sin embargo, sus principales limitaciones radican en el costo de las enzimas comerciales, la necesidad de optimizar rigurosamente las condiciones de reacción (tiempo, temperatura, concentración enzimática) y el riesgo de inactivación de las enzimas en medios no controlados (Vinatoru et al., 2017; Strati et al., 2015)

4.8.3. Factores que inciden en la extracción

El rendimiento de los procesos de extracción depende de múltiples factores físicos, químicos y operativos que influyen directamente en la transferencia de masa entre la matriz y el disolvente. Estos parámetros determinan no solo el rendimiento global del proceso, sino también la selectividad hacia determinados compuestos y la estabilidad de los bioactivos obtenidos.

Solvente: este determina la selectividad de la extracción, siendo la polaridad la más determinante durante el proceso. Esta propiedad, describe su capacidad para establecer interacciones intermoleculares (puentes de hidrógeno, fuerzas dipolo–dipolo, interacciones de van der Waals) con los solutos presentes en la matriz sólida (Smith & Harriott, 2007). Durante el proceso de extracción, la función del disolvente es actuar como un filtro selectivo, el cual determina que fracción de compuestos será solubilizada. En disolventes polares como el agua o el etanol, los metabolitos fenólicos y alcaloides presentan alta solubilidad debido a la capacidad de formar enlaces de hidrógeno. Por otra parte, metabolitos lipídicos como diterpenos o aceites esenciales requieren solventes de menor polaridad, como lo puede ser el hexano o el éter de petróleo.

Si la selección del solvente es incorrecta, el proceso de extracción de bioactivos se puede ver afectado principalmente por el arrastre de impurezas, debido a la preferencia de solubilización de compuestos no deseados, resultando en un baja rendimiento de extracción (Herrero et al., 2006).

Relación sólido-líquido: un factor determinante en la cinética y el rendimiento final de un proceso de extracción. Su importancia radica en que controla el gradiente de concentración, es decir, la diferencia entre la concentración de soluto en la matriz sólida y en el disolvente. Por lo que un mayor volumen de solvente por unidad de masa de sólido incrementa la fuerza impulsora para la difusión y reduce la saturación local, favoreciendo así una transferencia de masa más rápida y eficiente (McCabe, Smith & Harriott, 2007). Además, esta relación actúa como un regulador del equilibrio de extracción, por lo que, a menor relación de solvente, la solución alcanza la saturación rápidamente, minimizando el rendimiento global de extracción y la capacidad de arrastre. Contrariamente, en relaciones altas, se maximiza el arrastre, pero requiere de un uso excesiva de solvente y por ende mayor energía y costos durante el proceso (Herrero et al., 2006).

En técnicas convencionales, se suelen emplear relaciones intermedias (1:10 a 1:20 g/mL), mientras que, en técnicas no convencionales, por los parámetros de operación, dichas relaciones pueden aumentar dependiendo de la matriz sólida por utilizar (Serna-Jiménez et al., 2023).

Tiempo de extracción: es un factor significativo tanto para las técnicas convencionales como las no convencionales, pues regula la cercanía de alcance del equilibrio sólido-líquido y determina la cantidad de compuestos bioactivos que se liberan de la matriz sólida hacia al disolvente. Al inicio del contacto, la pendiente de extracción es pronunciada, es decir, se extraen grandes cantidades de solutos rápidamente, debido al alto gradiente de concentración entre la matriz sólida y el solvente (Treybal, 1980). Sin embargo, conforme pasa el tiempo, este gradiente se reduce y la velocidad de extracción decrece, llegando un punto en el que prolongar

el tiempo ya no aporta incrementos significativos en rendimiento (Zuorro & Lavecchia, 2013).

Temperatura: es uno de los parametros influyentes en los procesos de extracción, pues incide en la cinetica de transferencia de masa, así como la estabilidad química de los compuestos extraídos. De acuerdo con Treybal(1980) un aumento moderado de temperatura incrementa la difusividad del soluto, reduce la viscosidad del solvente y mejora la solubilidad, lo que acelera la migración de metabolitos desde la matriz sólida hacia la fase líquida. No obstante, un control incorrecto de la temperatura puede llegar a la degradación de los bioactivos de interés, su isomerización u oxidación, los cuales afectan la calidad y actividad del extracto (Zuorro & Lavecchia, 2013).

Tamaño de partícula: determina la superficie de contacto entre la matriz sólida y el disolvente. Según Treybal (1980) y McCabe (2007), al disminuir el tamaño de partícula se incrementa el área específica expuesta, lo que reduce la resistencia a la difusión interna y acelera la liberación de los metabolitos. De esta manera, se regula la cinética de transferencia de masa, ya que Partículas demasiado grandes limitan la penetración del solvente, generando un bajo aprovechamiento del sólido y menores rendimientos. Por otro lado, partículas excesivamente pequeñas pueden generar problemas prácticos: retención de solvente en la matriz, dificultades en la filtración, y arrastre de sólidos finos que afectan la claridad del extracto (Herrero, Cifuentes & Ibáñez, 2010). Además, un tamaño muy reducido puede favorecer la co-extracción de compuestos indeseados, lo que compromete la selectividad del proceso, funcionando de manera bidireccional.

4.9. Extracción asistida por ultrasonido

La extracción asistida por ultrasonido es una técnica emergente / no convencional que aprovecha la propagación de ondas acústicas de alta frecuencia (por encima de 20 kHz) en un medio líquido para inducir fenómenos físicos que potencian la liberación de compuestos bioactivos desde la matriz sólida. El principio central es la cavitación acústica, que comprende la formación, crecimiento y colapso inercial de microburbujas,

cuyo colapso genera microzonas extremas en temperaturas y presiones. Dichas condiciones producen ondas de choque y esfuerzos cortantes, capaces de fragmentar las paredes celulares, facilitando la liberación de metabolitos intracelulares (Suslick, 1990).

Adicional, se presenta la sonoporación, la cual es el aumento transitorio de la permeabilidad de las membranas celulares inducidos por el ultrasonido, lo que permite una mayor difusión de moléculas desde el interior de la matriz sólida hacia el disolvente (Chemat et al., 2017). Asimismo, la aplicación ultrasónica provoca microcorrientes y turbulencias acústicas que disminuyen las resistencias difusivas externas y aumentan el coeficiente global de transferencia de masa (Vinatoru, 2001).

Además, aunque dicha técnica se clasifica como no termina, es importante señalar que la variación genera zonas de alta temperatura, que, si no se controlan parámetros como potencia, amplitud y tiempo de exposición, puede ocasionar degradación parcial de compuestos termosensibles, como los ácidos clorogénicos (Mason & Lorimer, 2002). No obstante, con las condiciones adecuadas, el método ofrece ventajas significativas frente a métodos convencionales: reduce tiempos de extracción, disminuye el consumo de solvente, mejora la eficiencia y es compatible con disolventes verdes como etanol y agua (Chemat et al., 2017; Shen et al., 2023). En el caso del café y sus subproductos, como los posos de café, se ha demostrado la eficacia en la recuperación de compuestos fenólicos y en particular de ácidos clorogénicos, gracias a la combinación de ruptura celular, mayor permeabilidad de membranas y acelerada difusión molecular, lo que permite la obtención de extractos más concentrados y estables con aplicaciones en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica (Pyrzyńska, 2025; Ramadan et al., 2025). De esta manera, el ultrasonido se posiciona como una herramienta sostenible y versátil dentro del campo de la valorización de residuos agroindustriales y el aprovechamiento integral de la cadena del café.

4.10. Economía circular

La economía circular (EC) es un marco sistémico que tiene la finalidad de diseñar y gestionar la producción y el consumo de modo regenerativo. Esto para minimizar la utilización de recursos vírgenes y la generación de residuos y emisiones de energía a lo

largo del ciclo de vida de un producto o residuo. Este se diferencia del modelo lineal de producción (extraer-producir-desechar), puesto que busca mantener el valor de productos y materiales a lo largo del tiempo, mediante estrategias de reducción, reutilización, reparación, reacondicionamiento, remanufactura y, en última instancia, reciclaje. El modelo de economía circular se clasifica en dos categorías: técnica; que es aplicable para materiales no biodegradables, con un enfoque de priorización de uso y mantenimiento. Y biológica, la cual es aplicable para materiales que pueden retornar de forma segura a la biosfera. Conceptualmente, se define como un sistema regenerativo que reduce insumos y desechos desde el diseño (Geissdoerfer et al., 2017) y cuya esencia es un cambio sistémico orientado a la mejora económica y calidad ambiental (Kirchherr et al., 2017).

V. ANTECEDENTES

Mussatto et al. (2011), en su estudio *Extraction of antioxidant phenolic compounds from spent coffee grounds*, analizaron el comportamiento de diferentes mezclas hidroalcohólicas (etanol:agua) para la recuperación de compuestos fenólicos desde posos de café. Su investigación reveló que proporciones como 50:50 y 60:40 permiten un rendimiento de extracción óptimo del ácido clorogénico, debido a la capacidad del etanol de disolver compuestos menos polares y la capacidad del agua para hinchar la matriz vegetal y facilitar la liberación de compuestos bioactivos. Los autores destacan además que estos disolventes son una alternativa verde y segura para aplicaciones industriales.

Liang y Kitts (2014), en su artículo *Antioxidant property of coffee components: Assessment of methods that define mechanisms of action*, exponen que el ácido clorogénico, presente de forma natural en el café, presenta propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antidiabéticas. Además, señalan que su eficacia biológica depende no solo de la concentración, sino también de su pureza y estabilidad, lo que justifica la necesidad de métodos de extracción selectivos y eficientes.

Bravo et al. (2012) compararon distintas metodologías de extracción de antioxidantes en café, concluyendo que el perfil fenólico del extracto varía en función del método de preparación del café original.

Esquivel y Jiménez (2012), en su artículo *Functional properties of coffee and coffee byproducts*, destacan que tanto el café como sus subproductos, poseen un alto contenido de compuestos bioactivos, principalmente polifenoles como el ácido clorogénico. Su estudio resalta el potencial de estos residuos como fuente funcional en la formulación de productos con actividad antioxidante. Además, argumentan que la caracterización de estos compuestos permite proyectar diversas aplicaciones en la industria.

Murthy y Naidu (2012), en su estudio *Sustainable management of coffee industry byproducts and value addition—A review*, explican que los residuos generados por la industria del café, como la pulpa, la cáscara y los posos, representan una oportunidad significativa para el desarrollo de productos con valor agregado. Dentro de estos residuos, los posos de café han sido identificados como una fuente accesible y abundante de compuestos fenólicos, incluyendo el ácido clorogénico.

Martínez-Saez et al. (2017), en su estudio titulado *Use of spent coffee grounds as food ingredient in bakery products*, evaluaron el contenido de compuestos fenólicos presentes en los posos de café, identificando al ácido clorogénico como uno de los principales responsables de su actividad antioxidante. A pesar de que los residuos han sido sometidos a un proceso térmico durante la preparación de la bebida, los autores demostraron que los posos aún conservan cantidades significativas de estos compuestos bioactivos. Su investigación resalta la viabilidad de revalorizar estos residuos como fuente alternativa de ingredientes funcionales, lo que representa una oportunidad interesante para la industria alimentaria o cosmética.

Panusa et al. (2013), en su estudio *Recovery of natural antioxidants from spent coffee grounds*, investigaron el uso de ultrasonido como técnica de intensificación para la extracción de ácido clorogénico desde posos de café. Los autores encontraron que la aplicación de ultrasonido a 40 kHz mejora significativamente la eficiencia del

proceso, reduciendo el tiempo de extracción y aumentando el rendimiento de compuestos fenólicos. Las ondas ultrasónicas favorecen la disrupción de la matriz vegetal, promoviendo una mayor liberación de los compuestos bioactivos hacia el disolvente. Este método se presenta como una alternativa efectiva y de bajo consumo energético frente a métodos tradicionales como maceración o Soxhlet.

En la revisión titulada *Ácidos clorogénicos presentes en el café: capacidad antimicrobiana y antioxidante*, Chaves-Ulate y Esquivel-Rodríguez (2019) recopilan evidencia científica sobre la presencia de ácidos clorogénicos tanto en el grano de café como en sus subproductos. Las autoras destacan que estos compuestos no solo contribuyen al perfil sensorial del café, sino que también presentan una importante actividad antioxidante y antimicrobiana, especialmente frente a bacterias Gram positivas. A pesar de que en algunos países latinoamericanos esta línea de investigación aún es incipiente, se reconoce su potencial para el desarrollo de ingredientes funcionales aplicables en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria.

Brzezińska et al. (2023), en su estudio *Response Surface Methodology as a Tool for Optimization of Extraction Process of Bioactive Compounds from Spent Coffee Grounds*, evaluaron la influencia de variables como la temperatura, la proporción de disolvente hidroalcohólico (etanol-agua) y el tiempo de extracción sobre el rendimiento de compuestos fenólicos, específicamente ácido clorogénico a partir de posos de café. Aplicando la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM), las autoras identificaron condiciones óptimas que maximizan tanto el rendimiento como la capacidad antioxidante de los extractos. Su investigación subraya la importancia del ajuste fino de parámetros operativos para alcanzar una extracción eficiente y sostenible desde matrices residuales, destacando además la viabilidad de utilizar subproductos del café en aplicaciones funcionales.

Zuorro y Lavecchia (2012), en su estudio titulado *Spilled coffee as a source of valuable compounds: Recovery of chlorogenic acid by solid-liquid extraction*, evaluaron el contenido de ácido clorogénico en residuos sólidos de café utilizando mezclas hidroalcohólicas con diferentes proporciones de etanol. Observaron que una mezcla de 60% etanol ofrecía el mejor compromiso entre rendimiento y estabilidad del compuesto extraído. Además, el análisis de la actividad antioxidante mediante el ensayo DPPH demostró una fuerte correlación entre el contenido de ácido clorogénico y la capacidad antioxidante del extracto, resaltando la viabilidad de estos residuos como materia prima en aplicaciones funcionales.

Calle-Chumo et al. (2023), en su estudio *Influence of the Solvent on the Extraction of Phenolic Compounds from Coffee Grounds via Soxhlet Leaching*, analizaron el efecto de diferentes disolventes sobre la eficiencia de extracción de compuestos fenólicos desde borra de café, enfocándose en la influencia de parámetros como la polaridad, la constante dieléctrica y la geometría molecular. Comparando etanol, metanol y hexano, encontraron que el etanol ofreció la mejor combinación entre rendimiento y estabilidad del extracto, mientras que el metanol, aunque ligeramente más eficiente, indujo la metanólisis de ciertos compuestos como los dépsidos gálicos, disminuyendo la calidad del producto final. Por su parte, el hexano mostró una eficiencia muy baja debido a su baja polaridad. El estudio concluye que disolventes polares como el etanol son más selectivos y seguros para la recuperación de compuestos como el ácido clorogénico, lo que respalda el uso de mezclas hidroalcohólicas en procesos de extracción aplicados a residuos de café.

Chemat et al. (2012), en su artículo *Green Extraction of Natural Products: Concept and Principles*, establecen los principios fundamentales que deben regir una extracción sustentable de compuestos bioactivos, incluyendo el uso de disolventes seguros (GRAS), fuentes renovables de materia prima y tecnologías que reduzcan el consumo de energía y tiempo. Los autores enfatizan que, para cumplir con los objetivos de la química verde, es necesario reconfigurar los métodos tradicionales de

extracción mediante el uso de tecnologías asistidas como el ultrasonido o las microondas, así como evitar solventes clorados o contaminantes. Este marco conceptual respalda el enfoque metodológico del presente estudio, al priorizar el uso de residuos agroindustriales como los posos de café y la aplicación de solventes hidroalcohólicos, que además de ser eficaces, cumplen con criterios de seguridad y sustentabilidad.

Dias et al. (2024), en su estudio *Effects of extraction processes on recovery, the phenolic profile and antiglycation activity from green and roasted coffee beans*, compararon distintos métodos de extracción aplicados a café verde y tostado, entre ellos agitación, baño maría y ultrasonido. Los resultados indicaron que la extracción asistida por ultrasonido (UAE) fue la más eficiente en la recuperación total de compuestos fenólicos, incluyendo ácido clorogénico, especialmente en matrices de café verde. Además de aumentar el rendimiento, la UAE permitió obtener un perfil fenólico más diverso y estable, sin necesidad de aplicar altas temperaturas ni tiempos prolongados, lo que disminuye el consumo energético y preserva la funcionalidad antioxidante y antiglicante del extracto. Este estudio resalta el potencial del ultrasonido como una tecnología de extracción verde, alineada con los principios de sostenibilidad y eficiencia tecnológica en la valorización de matrices vegetales.

VI. METODOLOGÍA

6.1. Diseño experimental

El estudio se desarrolló bajo un diseño completamente al azar con un enfoque multifactorial, en el que se evaluó el efecto del tipo de solvente y el tiempo de sonicación sobre la concentración y el rendimiento de ácido clorogénico (AC) obtenido a partir de posos de café. Se emplearon cuatro solventes como tratamientos principales: agua destilada y tres mezclas hidroalcohólicas de etanol-agua en proporciones 60:40, 70:30 y 80:20 (v/v).

Cada tratamiento se sometió a sonicación con un equipo ultrasónico de sonda (modelo MS7), con potencia de 100 W, frecuencia de 20 kHz y control de temperatura mediante baño de hielo, asegurando condiciones isotérmicas durante el proceso. Para cada tipo de solvente se establecieron cinco tiempos de extracción: 0, 5, 10, 15 y 20 min, realizándose tres repeticiones independientes por cada combinación solventet tiempo, para un total de 60 corridas experimentales. Esto se realizó en un ambiente a temperatura de 24.7°C y 0.99 bar.

Las variables de respuesta evaluadas fueron: concentración de ácido clorogénico (mg AC g^{-1} de muestra seca), determinada por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC); rendimiento de extracción (% m/m) con base en la masa inicial seca de poso; y el tiempo de retención del analito en la columna cromatográfica (min).

El análisis estadístico de los resultados se realizó mediante un modelo bifactorial con interacción solvente \times tiempo, considerando la media de los triplicados y aplicando pruebas de comparación múltiple (ANOVA y Tukey, $p \leq 0.05$) para identificar diferencias significativas entre tratamientos.

6.2. Preparación y recolección de la muestra

La materia prima consistió en posos de café de la especie *Coffea canephora* (variedad robusta), procesada mediante beneficio húmedo y proveniente de la región de San Marcos, específicamente de la finca La Fama y Anexos – Colomba, Quetzaltenango. Estos fueron recolectados de manera directa en una cafetería local situada en la Ciudad de Guatemala. El material recolectado se colocó en un recipiente de plástico limpio y forrado de papel aluminio para su traslado hacia el laboratorio de procesamiento.

Los posos se almacenaron con su respectivo filtro y en refrigeración haciendo uso del cuarto frío del Laboratorio de Operaciones Unitarias del Departamento de Ingeniería Química, a una temperatura promedio de 7° C. Dicho proceso permitió evitar la descomposición microbiana y la preservación de las características de la muestra en el momento de la experimentación.

6.1.1. Caracterización y acondicionamiento de materia prima

Para la caracterización y acondicionamiento de la materia prima utilizada para los análisis y procesos posteriores se utilizó el siguiente equipo, materiales y cristalería:

Equipo y materiales:

- 1 balanza analítica marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- 1 balanza de humedad marca OHAUS, modelo MB120, con una capacidad de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

- 1 tamizadora marca ROTAP modelo RX-29 con platos Mesh de 20, 30,45, 60, 80, 100 estándar ASTM.
- 1 potenciómetro marca PCSTestr modelo 35 multi-parameter, con un rango de medición de 0 a 14 pH y una precisión $\pm 0,01$ pH
- 1 estufa eléctrica
- 1 bandeja metálica de 60cm de largo por 30cm de ancho y 5cm de altura
- 1 termómetro digital marca Fluke modelo 62 MAX infrarrojo con rango de -20 a +32 grados Fahrenheit
- 1 recipiente de plástico cubierto con aluminio y tapadera

Cristalería:

- 1 beaker marca Kimax kimble con capacidad de 100 mL
- 1 brobeta marca Kimax con capacidad de 50 mL

6.1.2. Análisis de humedad

- Para la medición de la humedad de la materia prima se utilizó la balanza de humedad de modo que se pudiera contar con el valor inicial de humedad previo al secado.
- Para la muestra de posos de café, se preparó la balanza de humedad cargando la configuración *default* correspondiente a un acorrida de 30 min a 100 °C.
- Una vez cargada la configuración en la balanza de humedad, se taró el plato de muestras, y se colocó una muestra de 1 g de poso de café y se cerró la tapa de la balanza de humedad permitiendo que iniciara la corrida.
- Luego de que transcurriera el tiempo de la corrida en la balanza de humedad, se desplegó el valor de porcentaje de humedad del poso y se anotó el valor.

- Este mismo procedimiento se repitió para cada tipo de poso de café (V60 y Chemex) realizando quintuplicado, utilizando una sección diferente del poso para cada una de las corridas de las muestras.

6.1.3. Secado

- Se encendió y precalentó el horno de convección a una temperatura controlada
- Para determinar la temperatura dentro del horno se colocó un termómetro dentro del horno, posicionándolo sobre las bandejas, para finalmente se cerraron las puertas del equipo
- Una vez encendido el horno, se monitoreó la temperatura durante el precalentamiento con el termómetro interior hasta que el horno llegara a una temperatura oscilante entre 40-50 °C.
- Mientras el precalentamiento del horno, los posos de café se distribuyeron en una bandeja metálica formando una capa delgada de aproximadamente 1cm y pesando la masa a introducir al sistema.
- Una vez medidos los posos de café y precalentado el horno, se abrieron las puertas y la bandeja con el material se introdujo en el horno, manteniendo la puerta ligeramente abierta para permitir la salida de humedad y evitar el incremento de temperatura.
- Se realizó un secado durante un período de 6 a 8 horas, verificando cada 30 minutos la temperatura y tomando muestras distribuidas alrededor de la bandeja para determinar la humedad y observar el decaimiento con el tiempo.
- En una balanza de humedad calibrada se pesó 1.0 g de poso de café que se encuentra en proceso de secado y se anotó el rango de humedad.
- Se realizó el procedimiento anterior hasta que la humedad de la materia prima se encontrara en un rango de humedades de 8-10% de humedad.
- Una vez la materia prima alcanzó el contenido de humedad deseado, se apagó el equipo apagando inicialmente el panel de control y finalmente.

6.1.4. Análisis granulométrico

- Para determinar la distribución de tamaños de partícula y determinar los porcentajes de materia que atraviesa y se quedan en una malla se utilizó un sistema de tamizaje mecánico con 7 platos con distintos mesh. Los platos utilizados corresponden a los números de mesh 20, 28, 42, 60, 80 y 100 y un plato de recolección de finos sin malla.
- En un primer paso se midió la masa del poso de café previamente secado con la ayuda de una balanza, siendo esta la totalidad de la muestra.
- Luego de medir la masa total, se abrió la tapadera del primer plato de modo que se pudiera alimentar al sistema de tamizaje.
- Se colocó el material en el primer plato del sistema de tamizaje correspondiente al plato con número de mesh 20 y se colocó la tapa para iniciar con el proceso de separación.
- Una vez colocado el material en el primer plato y colocada la tapa, se configuró la tamizadora para operar durante 10 minutos en el panel de control del equipo.
- Luego de haber configurado el tiempo de operación se inició el proceso de tamizaje, con el botón de inicio.
- Luego de transcurridos los 10 minutos, se separó cada uno de los platos y con la ayuda de la balanza se midió la masa residente en cada plato para realizar el análisis granulométrico.
- Se realizó el mismo procedimiento mencionado para cada uno de los posos de café.
- Una vez finalizado el análisis con la tamizadora, se recuperó la materia prima de cada plato y se limpió con aire comprimido.

6.1.5. Medición pH

- Para la medición de pH de la materia prima, para los dos tipos de posos de café, se utilizó método de la Asociación Oficial de Químicos

Analíticos (AOAC) para pH en muestras sólidas. Debido al tipo de materia prima se optó por seguir dicha metodología.

- Se taró un beaker de 150 mililitros y se pesaron 10 gramos de posos de café previamente acondicionados.
- En una probeta de 100 mililitros, se midió el agua destilada requerida para la experimentación y se transfirió al beaker con la muestra de poso correspondiente, estableciendo una relación de 1:10 (m/v).
- Se encendió la estufa con agitador incorporado y se configuró el modo de agitación en el panel de control y se aseguró que el calentamiento de la estufa estuviera desactivado.
- Se colocó el beaker con la muestra sobre la estufa, se añadió el agitador magnético y se inició la agitación. La suspensión se mantuvo bajo agitación durante 30 minutos a temperatura ambiente.
- Finalizado el tiempo de agitación, se retiró el beaker con la muestra y se procedió a medir el pH con un potenciómetro digital previamente calibrado
- El procedimiento se realizó en cuadruplicado para cada tipo de posos de café, reportando los resultados como promedio.

6.3. Extracción de ácido clorogénico por procesador ultrasónico

Para el proceso de extracción de ácido clorogénico de la materia prima utilizada se utilizó el siguiente equipo, materiales y cristalería:

Equipo y materiales:

- 1 balanza analítica marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.
- Procesador ultrasónico marca Hielscher modelo UP100H con frecuencia de 30 ± 1 kHz.

- 1 sistema de soporte (soporte universal y pinzas).
- 1 centrifuga marca Benchmark modelo LC-8 con un rango de velocidad de 100 a 5000 rpm y capacidad de 8 tubos de 15 mL cada uno.
- Baño frío.
- HPLC marca Agilent modelo 1100 con detector UV/VIS con arreglo de diodos con una columna Eclipse Plus C-18 y un tamaño de partícula de 5 μm .

Cristalería:

- Beakers de 10 mL marca Kimax
- Probeta de 50 mL marca Kimax
- Probetal de 100 mL marca Kimax
- Balones de aforo de 500 mL marca Kimax
- Balones de aforo de 10 mL marca Kimax

Reactivos:

- Etanol 500mL a 99 % de pureza
- Ácido clorogénico 5-cafeoilquinico marca Sigma-Aldrich con pureza ≥ 95 %

6.3.1. Preparación de mezclas hidroalcohólicas

- Para la preparación de los solventes de extracción se utilizaron soluciones hidroalcohólicas de etanol absoluto grado analítico y agua destilada.
- Se elaboraron tres mezclas con proporciones volumétricas de 60:40, 70:30 y 80:20 (etanol:agua).
- El volumen correspondiente de etanol se midió utilizando una probeta de 100 mililitros y posteriormente se transfirió a un matraz aforado de 500 mililitros, posteriormente se completó el volumen restante con agua destilada hasta la línea de enrase.

- Cada una de las mezclas se homogenizó mediante agitación manual durante 2 minutos para asegurar la distribución uniforme de ambos componentes.
- Las soluciones hidroalcohólicas se transfirieron a frascos con una envoltura de aluminio y tapa hermética para evitar la evaporación de etanol y se conservaron en el cuarto frío para evitar cualquier posible alteración de su composición.

6.3.2. Extracción por procesador ultrasónico

- Para la extracción de ácido clorogénico se empleó un procesador ultrasónico marca Hielscher UP100H. El sistema se montó en un sistema universal con dos pinzas, lo que permitió mantener el equipo en posición vertical y estable.
- Se ensambló y ajustó el sonotrodo de 3 milímetros de diámetro al equipo.
- Se conectó el equipo a la corriente eléctrica y se posicionaron las manecillas en la configuración de onda, con una amplitud de 50 % y un ciclo de 1 (funcionamiento continuo), parámetros seleccionados para asegurar una cavitación eficiente sin provocar una degradación excesiva de los compuestos fenólicos.
- El beaker con la muestra se colocó dentro de un recipiente metálico con hielo, para conformar un baño frío. Esto permitió controlar la temperatura durante la extracción.
- Para cada extracción, se pesó 1 gramo de poso de café acondicionado en un beaker. Posteriormente se adicionó 30 mililitros de la mezcla hidroalcohólica correspondiente medido con una probeta de 50 mililitros.
- Se inició el proceso de extracción.
- El proceso se realizó en triplicado para cada condición experimental, es decir para cada una de las mezclas hidroalcohólicas son cinco tiempos de sonicación: 0, 5, 10, 15 y 20 minutos.
- Finalizado el tiempo de extracción, el contenido del beaker se filtró, separando el extracto líquido del residuo sólido de posos de café.

- El extracto líquido obtenido se transfirió a tubos de ensayo para centrifuga, llenando cada tubo con un volumen y masa homogéneo, para garantizar un equilibrio en el rotor durante la centrifugación.
- El residuo sólido humedecido (poso de café restante después de la extracción) se pesó en una balanza analítica con el fin de llevar un control de masas y realizar el balance de masa correspondiente.
- Posteriormente, los tubos con el extracto líquido se sometieron a un proceso de centrifugación a 5000 revoluciones por minuto (rpm) durante 30 minutos en una centrifuga.
- El sobrenadante obtenido se transfirió a un frasco de vidrio envuelto en papel aluminio con tapa, y se almacenaron en un cuarto frío, hasta el momento del análisis instrumental por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

6.4. Cuantificación de ácido clorogénico por HPLC

6.3.1. Preparación de estándares

- Se utilizó ácido clorogénico estándar (≥ 95 % de pureza, Sigma-Aldrich o equivalente) como referencia analítica para la construcción de la curva de calibración.
- Se inició con el pesado del ácido clorogénico sólido en beakers previamente tarados utilizando una balanza analítica.
- Posteriormente, el sólido pesado se transfirió a un matraz aforado de 10 mililitros enjuagando el beaker con pequeñas porciones de agua destilada para asegurar la transferencia completa.
- Se preparó una solución madre de 40 ppm, completando el volumen del matraz aforado con agua destilada hasta la marca de enrase.
- A partir de esta solución madre, se elaboraron diluciones hijas con agua destilada para obtener las soluciones de trabajo en concentraciones de 5, 10, 15, 20, 25, 30 ppm, que conformaron el rango de la curva de calibración.

6.3.2. Cuantificación de AC en muestras

El análisis cromatográfico de los extractos se realizó en el Laboratorio de Analítica Avanzada de la Universidad del Valle de Guatemala. Por el tipo de equipo y de análisis el procedimiento fue realizado por la analista especializada. El procedimiento general para la cuantificación es el siguiente:

Cada una de las muestras se preparó mediante filtración utilizando una jeringa con filtro, y posteriormente se colocaron en viales ámbar compatibles con el equipo de cromatografía líquido de alta resolución. El procedimiento se efectuó en triplicado para cada condición experimental con el fin de garantizar la confiabilidad estadística de los resultados. Las inyecciones se llevaron a cabo de manera secuencial, desde la primera hasta la quinta muestra, manteniendo un intervalo de cinco minutos entre corridas, conforme a las recomendaciones operativas del laboratorio. Los resultados obtenidos se compararon con los reportados en la literatura científica y se utilizó la curva de calibración construida con soluciones patrón de ácido clorogénico para determinar el rendimiento de extracción en los diferentes tratamientos.

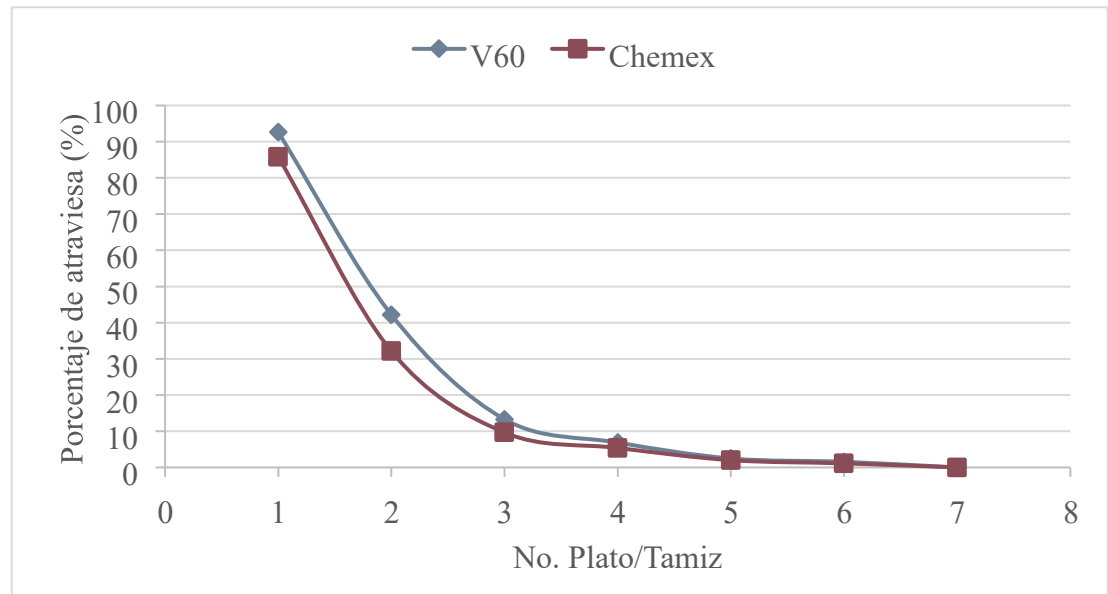
VIII. RESULTADOS

Cuadro 6. Promedio de las características fisicoquímicas (pH y contenido de humedad) de los posos de café obtenidos mediante los métodos V60 y Chemex

| Variables | Método V60 | Método Chemex |
|------------------|-------------------|----------------------|
| pH | 6.16 ± 0.20 | 6.21 ± 0.06 |
| Humedad (% b.h.) | 67.13 ± 1.24 | 67.97 ± 2.09 |

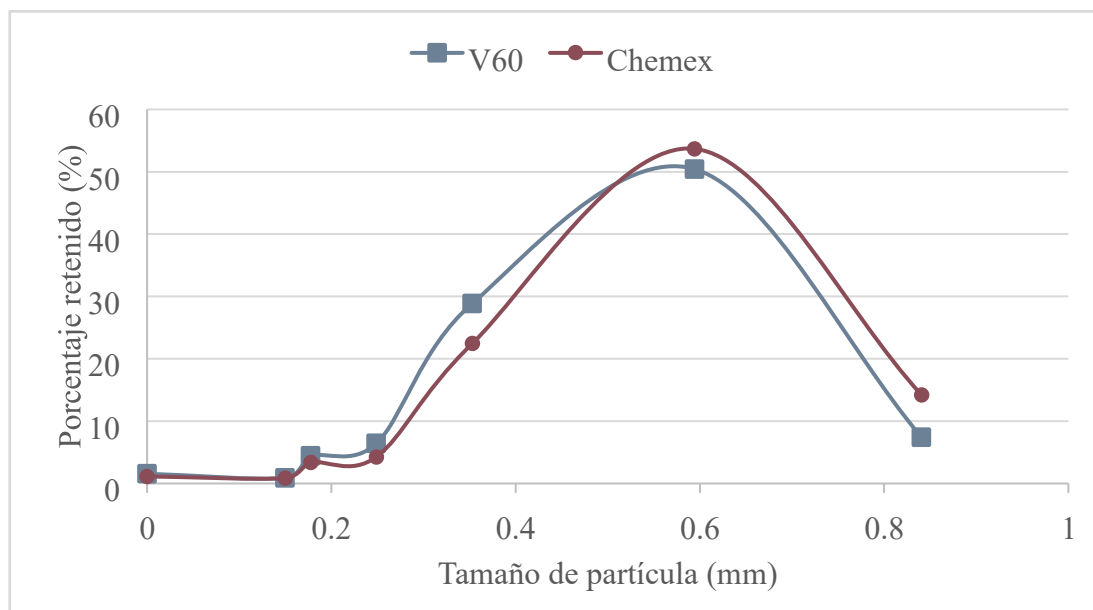
El cuadro representa el promedio ± desviación estándar de los resultados de las características fisicoquímicas de las muestras de poso de café obtenida mediante los métodos de V60 y Chemex. Las muestras fueron aleatorias y se realizaron ocho muestreos. Los resultados se obtuvieron a condiciones de laboratorio de 24.7 °C y 0.99 bar.

Gráfico 1. Porcentaje de posos de café que atraviesa cada tamiz para el promedio de corridas del método V60 y Chemex



Se presenta el gráfico para el porcentaje promedio de posos de café provenientes del método V60 que atraviesa cada uno de los platos del tamizador vibratorio eléctrico. Los datos provienen del Cuadro 36 y Cuadro 39. Los resultados se obtuvieron a condiciones de laboratorio de 24.7 °C y 0.99 bar.

Gráfico 2. Distribución de tamaño de partícula para el promedio de corridas de los posos de café del método V60 y Chemex



Se presenta el gráfico para la distribución de tamaño de partícula para el promedio de corridas de los posos de café provenientes del método V60 y Chemex que son retenidos en cada uno de los platos del tamizador vibratorio eléctrico. Los datos provienen del Cuadro 36 y Cuadro 39. Los resultados se obtuvieron a condiciones de laboratorio de 24.7 °C y 0.99 bar.

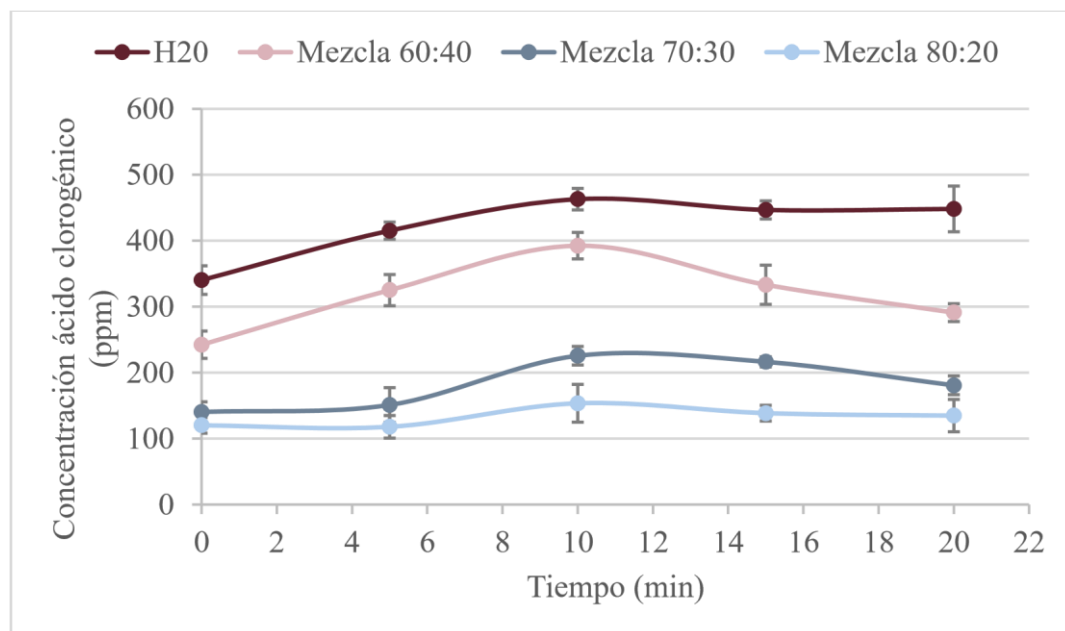
Cuadro 7. Análisis de varianza de dos factores (ANOVA) para la distribución granulométrica de los posos de café V60 y Chemex

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Grados de libertad | Valor F | Valor p |
|---------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|---------|
| Método | 0.003 | 0.003 | 1 | 0.028 | 0.8674 |
| Malla | 2.186 | 0.364 | 6 | 3.970 | 0.0054 |
| Método:Malla | 0.049 | 0.008 | 6 | 0.089 | 0.9970 |

Se muestran los resultados del análisis de varianza realizado para evaluar el efecto de la distribución granulométrica y el método de preparación de café (V60 y

Chemex), así como la interacción entre ambos. La notación empleada para los niveles de significancia corresponde a: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

Gráfico 3. Concentración de ácido clorogénico en extractos de posos de café (agua y mezclas hidroalcohólicas) a lo largo del tiempo



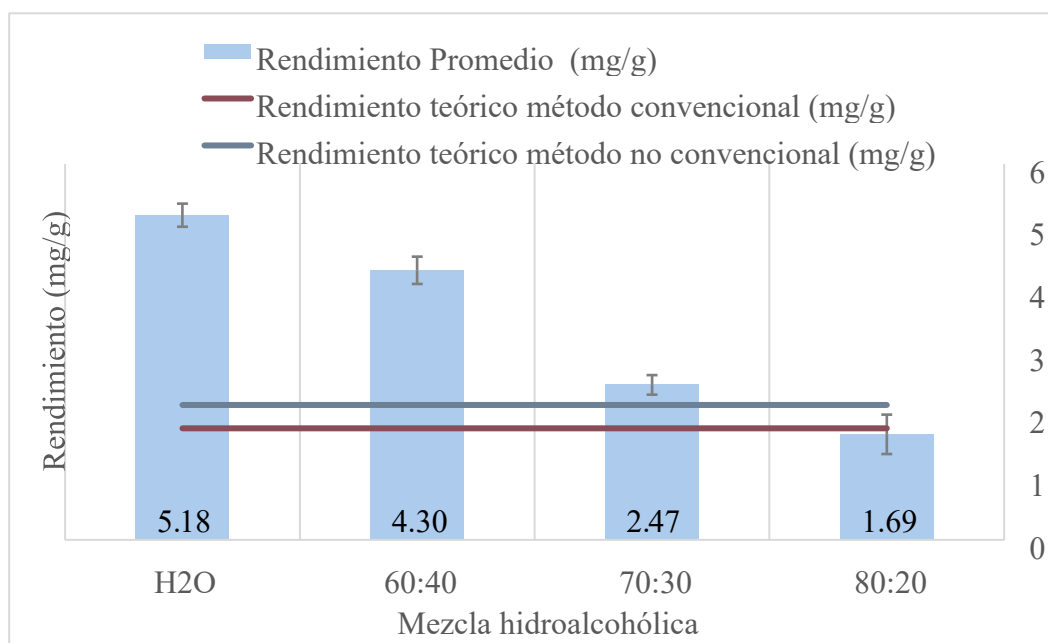
Se presentan los resultados para la extracción de ácido clorogénico a lo largo de 20 minutos para cuatro solventes, agua y tres mezclas hidroalcohólicas etanol-agua, en proporciones 60:40, 70:30 y 80:20. Cada una de las tendencias presentan la desviación estándar presentadas a través de barras de error, para los cuales se utilizaron triplicado. Los resultados se obtuvieron a condiciones de laboratorio de 24.7 °C y 0.99 bar

Cuadro 8. Análisis de varianza de dos factores (ANOVA) para la extracción de ácido clorogénico (AC)

| Fuente de variación | Suma de cuadrados | Cuadrados medios | Grados de libertad | Valor F | Valor p |
|---------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|----------|
| Mezcla | 785527 | 261842 | 3 | 643.142 | 2.00E-16 |
| Tiempo | 66544 | 16636 | 4 | 40.862 | 1.27E-13 |
| Mezcla:Tiempo | 22040 | 1837 | 12 | 4.511 | 0.000148 |
| Residuales | 16285 | 407 | 40 | | |

Se muestran los resultados del análisis de varianza realizado para evaluar la significancia de la mezcla empleada y el tiempo de extracción, así como la interacción entre ambos. La notación empleada para los niveles de significancia corresponde a: *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

Gráfico 4. Rendimiento de ácido clorogénico de la extracción de poso de café utilizando distintas mezclas hidroalcohólicas



Se presenta los resultados del rendimiento de ácido clorogénico de la extracción llevada a cabo para cada una de las mezclas hidroalcohólicas evaluadas. El gráfico presenta el rendimiento obtenido para la extracción durante 10 minutos, debido a que este tiempo fue el que mejor extracción representó para la totalidad de las muestras

evaluadas y mezclas utilizadas. Además, se proporciona los rendimientos teóricos reportados en la literatura para el AC extraído mediante un método convencional (Soxhlet) y uno no convencional (baño ultrasonido).

Cuadro 9. Costo directo de la preparación de una taza de café por método V60 y Chemex

| Concepto | V60 (Q/taza) | Chemex (Q/taza) |
|--------------------------------|---------------------|------------------------|
| Café | 5.36 | 6.55 |
| Filtro | 0.79 | 1.7 |
| Energía | 0.041 | 0.041 |
| Agua | 0.03 | 0.03 |
| Mano de obra directa | 1.48 | 1.48 |
| Costo total preparación | 7.7 | 9.8 |

Se presentan los resultados del costo directo de preparación por taza para los dos métodos evaluados, V60 y Chemex. Se desglosan los principales rubros asociados al proceso de elaboración de la bebida, incluyendo el costo del café utilizado, el filtro correspondiente a cada método, la energía requerida para el calentamiento del agua, el consumo de agua, la energía empleada en la molienda y la mano de obra directa

Cuadro 10. Costo directo y rendimiento de extracción de ácido clorogénico en agua y e ventana de 10 min de extracción

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------------|-------------------|
| Rendimiento promedio | 5.18 mg/g SCG |
| SCG por corrida | 3 g |
| AC recuperado por corrida | 15.54 mg |
| Costo extracción por corrida | Q3.70 |
| Costo unitario de producción | Q 0.238/mg |

Se presenta el análisis económico del proceso de extracción de ácido clorogénico (AC) utilizando agua como solvente bajo las condiciones seleccionadas experimentalmente. Se reporta el rendimiento promedio obtenido en términos de mg

de AC por gramo de SCG, la cantidad de residuo empleada por corrida, la masa total de AC recuperada y el costo directo asociado al proceso extractivo.

Cuadro 11. Relación económica entre preparación y valorización

| Indicador | V60 | Chemex |
|--|-------------|---------------|
| AC potencial por taza (mg) | 93.24 | 113.96 |
| Costo extracción equivalente (Q) | 26.49 | 32.38 |
| Costo preparación de taza de café (Q) | 7.7 | 9.8 |
| Relación extracción/preparación | 3.44 | 3.3 |

Se presenta la relación entre el costo de preparación de la bebida y el costo equivalente de extracción del ácido clorogénico contenido en el residuo generado por taza. Se reporta la cantidad potencial de AC recuperable por taza según el método de preparación, el costo equivalente de extracción asociado a dicha cantidad y la relación entre el costo extractivo y el costo de preparación.

Cuadro 12. Valorización económica bajo escenario inferior y de equilibrio total

| Indicador | V60 | | Chemex | |
|---------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| | Limite Inferior | Punto de equilibrio | Limite Inferior | Punto de equilibrio |
| Valorización del café (Q) | 19.80 | 19.80 | 17.70 | 17.70 |
| Valorización del AC (Q) | -13.40 | -19.80 | -16.38 | -17.70 |
| Valorización Total | 6.40 | 0.00 | 1.32 | 0.00 |

Se presenta la valorización económica para cada uno de los métodos, considerando un precio promedio de Q27.50 por taza de café de especialidad en Guatemala. Así mismo, se determinó el precio de equilibrio del ácido clorogénico de Q0.0718/mg para el método V60 y Q0.1288 para el Chemex; lo cual permitió encontrar la valorización total en equilibrio para cada método.

IX . DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta investigación, se analizaron los residuos de poso de café generados por dos métodos de preparación por filtración (V60 y Chemex) provenientes de una misma cafetería local para asegurar homogeneidad de origen. Ambas muestras obtenidas de posos de café pertenecen a la especie *Coffea canephora – Robusta*, caracterizada por su contenido fenólico. El estudio tuvo la intención de establecer las condiciones de mezcla hidroalcohólicas que recuperaran con mayor eficacia el ácido clorogénico (AC) a partir del residuo. Para ello fue necesario la caracterización, acondicionamiento, extracción y análisis de las muestras realizadas durante la experimentación.

En un primer punto, los parámetros considerados para la caracterización de la materia prima; potencial de hidrógeno (pH), humedad y tamaño de partículas (granulometría). El pH inicial es relevante, debido a que delimita el microentorno ácido en el que ocurre el contacto sólido-líquido de la matriz de café. Por lo que valores levemente ácidos favorecen la estabilidad y solubilidad de los compuestos fenólicos presentes. El Cuadro 6 presenta los primeros dos parámetros evaluados, en donde se determinó un pH de 6.16 ± 0.20 para el método de filtración V60 y de 6.21 ± 0.06 para el método Chemex. Ambos resultados se encontraron dentro del rango ácido esperado, por lo que no se atribuyó efectos significativos al pH, con respecto al proceso extractivo. Además, se observa en el Cuadro 34 y Cuadro 35, un análisis estadístico consistente del pH, en donde se obtuvo un coeficiente de variación de 3.29 % para el V60 y 0.97 % para el Chemex, reflejando así una dispersión baja ($CV < 5 \%$). Es necesario mencionar que la ligera variabilidad en el método V60 radica principalmente en el patrón de flujo y sensibilidad de vertido durante la preparación de la bebida.

Dado que el filtro utilizado, pulsos, caudal y ángulo de vertido, pueden generar zonas de distinto grado de lavado, originando pequeñas variaciones en la composición residual. Sin embargo, se concluyó que ambas matrices sólidas presentan medias similares con baja variabilidad, adecuadas para la extracción y sin necesidad de acondicionamiento de acidez.

Complementariamente, se determinó la humedad promedio correspondiente al poso de café para cada uno de los métodos. Tal como se observa en el Cuadro 6 de la sección de resultados, se obtuvo un valor de porcentaje de humedad promedio de 67.13 ± 1.24 % para el método de filtrado V60 y de 67.97 ± 2.09 % para el método Chemex. Al realizar el análisis estadístico de ambos métodos, se determinaron coeficientes de variación de 1.84 % y 3.07 %, respectivamente (Cuadro 34 y Cuadro 35). Dichos valores reflejaron un estado hídrico alto y consistente entre métodos, propio de un residuo fresco y recién generado. Además, estos evidenciaron una baja variabilidad entre muestras de ambas matrices sólidas ($CV < 5$ %), condición que permitió un acondicionamiento de secado común. Es importante mencionar que, sin pre-acondicionamiento, los posos de café suelen salir con humedades mayores de aproximadamente 80 a 90 % en base húmeda. No obstante, la cafetería aplicó un prensado previo, por lo que los valores observados son coherentes con los reportados en la literatura (Gómez-de la Cruz et al., 2015) y operativamente favorables para el método de secado equivalente antes de la extracción. Dado que ambos métodos se basan en la filtración por gravedad, el régimen térmico y los tiempos de contacto son comparables, homologando los microentornos de preparación. Esto explica la cercanía entre los valores de pH y porcentaje de humedad inicial de ambos posos de café, considerándolos como una misma matriz sólida. No obstante, la naturaleza del filtro y la configuración geométrica del sistema, pueden modificar la permeabilidad efectiva, la retención de partículas finas la microestructura del residuo. Por ello se analizó la granulometría como parámetro potencialmente determinante de la caracterización y posible divergencia entre métodos.

Con respecto a la granulometría, primero se estudió el porcentaje de sólido que atraviesa cada uno de los tamices, tanto para el método V60 como para el Chemex. El Gráfico 1, presenta la curva del porcentaje de poso de café que atraviesa cada uno de los tamices. Se evidenció una caída pronunciada al pasar por el mesh 20 (0.840mm) al mesh 30 (0.594mm), seguida de un descenso suavizado a partir del plato 3 (aberturas menores). Visualmente, el V60 y Chemex siguen comportamientos y trayectorias próximas entre sí

con leves diferencias, posicionando al V60 por encima, con una mayor concentración de sólidos en los primeros dos platos, pero siguiendo la misma tendencia. Por otra parte, la distribución de tamaño de partícula, presentada en el Gráfico 2, también refleja comportamientos similares entre sí, difiriendo únicamente en la forma de la curva. Ambas distribuciones presentaron un comportamiento unimodal con un máximo en 0.60 mm aproximadamente; no obstante, la curva de V60 mostró una ligera sobre representación en el intervalo 0.35 mm a 0.40 mm, mientras que Chemex presentó mayor cantidad de material retenido en 0.85 mm. En el extremo izquierdo del gráfico, se evidenció nuevamente una baja carga de finos, caracterizando a ambos posos con tamaños medios de partícula.

Los resultados de la granulometría de V60 y Chemex se ubicaron dentro del rango recomendado de tamaño de partícula para la extracción de compuestos fenólicos (0.45 a 0.65 mm), en donde se logra un correcto equilibrio entre la superficie de contacto y la permeabilidad de la matriz sólida. Asimismo, se incrementa el área de contacto, favoreciendo la acción de la cavitación y minimizando el efecto de colmatación de partículas (Herrero, Cifuentes & Ibáñez, 2010). Para comprobar los resultados visuales, se elaboró y aplicó un ANOVA de dos factores sobre las métricas granulométricas. El factor método, hizo referencia al origen del residuo según el procedimiento de preparación del café, y evaluó, si las fracciones granulométricas cambiaban según su origen. El factor malla, se definió por la abertura del tamiz y estudió la diferencia entre las fracciones que atraviesan cada tamiz; mientras que el factor de interacción evaluó la existencia de alguna particularidad en el comportamiento según la malla. En el Cuadro 7, los resultados del análisis de varianza determinaron que el método no es un factor significativo ($F = 0.028$; $p = 0.8674$), es decir, no hubo evidencia de diferencias globales de tamaño de partícula entre V60 y Chemex. Por otro lado, la malla sí resultó significativa ($F = 3.970$; $p = 0.0054$), algo esperable debido a que cada tamiz representa aberturas diferentes y, por definición, retenía proporciones distintas del material. Finalmente, la interacción de los factores método-malla, tampoco fue significativa ($F = 0.089$; $p = 0.9970$), lo que indicó que la forma de la distribución a través de las mallas es consistente en ambos métodos. Dicho lo anterior, se concluyó que la granulometría resultó comparable entre V60 y Chemex y, al situarse en el rango óptimo para extracción, permitió tratar ambos posos como una misma matriz sólida para el análisis extractivo. Por lo tanto, si se observaron diferencias de rendimiento, estas

se atribuyeron a la composición del solvente y a las condiciones de operación, más que al tamaño de partícula, pH y humedad.

Posterior a la caracterización de la materia prima, se procedió a la extracción de ácido clorogénico (AC) de los posos acondicionados mediante el procesador ultrasónico, evaluando condiciones de operación diferentes como; el tiempo de sonicación y la composición del solvente. Para ello se configuró el sistema como se muestra en la Ilustración 1, empleándose el sonotrodo MS7 con micro tip 7 (Ilustración 2). La selección de dicho sonotrodo radicó que durante las pruebas preliminares se ensayaron los sonotrodos MS2 (Ø 2 mm, amplitud máx. 220 μm , 600 W cm^{-2}) y MS3 (Ø 3 mm, 180 μm , 460 W cm^{-2}). Sin embargo, no se observó agitación macroscópica sostenida en el vaso durante la extracción; la energía se concentró en un volumen muy reducido cerca de la punta, con escasa circulación del solvente. Además, dicho comportamiento se reflejó con las muestras enviadas a HPLC, las cuales no arrojaron lecturas de concentraciones de AC. Por esto mismo, se utilizó el sonotrodo MS7 (Ø 7 mm, 125 μm , 130 W cm^{-2}), que aunque posee menor densidad de potencia, el área efectiva era mayor logrando una mejor cavitación y una agitación de la totalidad del volumen. Consecuentemente, las muestras por HPLC con MS7 mostraron las mayores concentraciones de AC, razón de su uso durante la experimentación. El Gráfico 3 mostró que el agua como solvente, extrajo las mayores concentraciones del compuesto fenólico, con un incremento secuencial a través del tiempo, hasta un máximo alrededor de los 10 minutos (473.10 ± 16.34 ppm), con una pequeña disminución posterior. La mezcla hidroalcohólica 60:40 ocupó el segundo mejor desempeño (392.56 ± 20.06 ppm), mientras que la mezcla 70:30 y 80:0 reflejaron valores intermedios, con perfiles más planos y bajos. Por lo que se observó el siguiente comportamiento $\text{H}_2\text{O} > 60:40 > 70:30 > 80:20$, todos con una obtención mayor de AC en el minuto 10.

Al analizar cada uno de los solventes utilizados, se determinó que el desempeño del agua se explicó por la polaridad y afinidad del ácido clorogénico. Este al ser una molécula con múltiples enlaces -OH y coeficiente de partición igual a cero, caracterizó a una molécula hidrofílica (Crozier et al., 2006); lo cual favoreció su solubilidad en medios altamente polares. El agua, posee una constante dieléctrica de aproximadamente 78-80 a temperatura ambiente, en contraste con el etanol, la cual se encuentra dentro de un rango

alrededor de 24-25 (Maryott & Smith, 1951). Debido a esto, las mezclas con mayor proporción acuosa desplazaron las fuerzas de solvatación y el gradiente de partición de ácido hacia la fase líquida.

La mezcla 60:40 mostró un comportamiento favorable, con una curva ascendente durante los primeros minutos, donde se alcanzó la mayor extracción alrededor del minuto 10. Esto se interpretó como el resultado de un equilibrio entre la afinidad soluto-solvente y la mecánica de cavitación generada por el ultrasonido. La fracción acuosa mayoritaria desplazó la solubilidad del AC minimizando las pérdidas por falta de polaridad. Mientras que, por su parte, la fracción etanólica ajustó las propiedades del medio, facilitando el colapso de burbujas, y por ende la intensificación de las microfracturas de la matriz sólida, favoreciendo una liberación rápida durante los primeros minutos. Luego de ese tiempo, se evidenció un decaimiento pronunciado en la curva, atribuible a la degradación del AC, generada por la isomerización y oxidación de los grupos funcionales.

La mezcla 70:30 también alcanzó un máximo de extracto de AC en el minuto 10 (225.19 ± 14.09 ppm) la cual decreció con el paso del tiempo. Mismo comportamiento se presentó para la mezcla 80:20, en donde se observó un perfil plano con una extracción máxima a los 10 minutos de 153.64 ± 28.64 ppm. Esto se interpretó como consecuencia de una afinidad soluto-solvente insuficiente para el ácido clorogénico al incrementar la proporción de etanol. Por lo que, la disminución de la polaridad efectiva del medio limitó la concentración alcanzable de ácido a pesar de la energía mecánica aportada mediante la cavitación. Es necesario mencionar, que existen investigaciones que reportan una mayor extracción de ácido clorogénico con mayores proporciones de etanol. Dicha discrepancia radicó en la forma de cuantificación, puesto que modelaron el conjunto de compuestos fenólicos del poso de café como si fuesen ácido clorogénico en su totalidad. Con esas condiciones el incremento de etanol enriqueció las especies fenólicas de menor polaridad como: cafeoilquínicos, dicafeoilquínicos (diCQA), feruloilquínicos (FQA), así como fenoles libres como cafeico, ferúlico y p-cumárico. La cafeína también suele extraerse con mezclas hidroalcohólicas, debido a su afinidad por la misma.

Fue necesario el estudio del factor tiempo, ya que todas las mezclas presentaron una fase rápida de extracción en los primeros minutos de sonicación, la cual consistió en la

desorción superficial, la renovación de la capa límite y la microfractura de la matriz sólida mediante cavitación. A partir del minuto 11, las curvas mostraron un descenso en donde se atribuyó como principales causantes la difusión intraarticular y la degradación del compuesto mediante oxidación e isomerización, hacia fenoles más simples. Estas tendencias se observaron de manera visual, no obstante, para sustentar dicho comportamiento, se elaboró y ejecutó un ANOVA de dos vías, siendo el primer factor las mezclas hidroalcohólicas, el cual evaluó si la composición era significativa para la extracción. Asimismo, el segundo factor (tiempo) representó los minutos de sonicación y si influencia en la concentración de ácido obtenido. El Cuadro 8 presenta el análisis estadístico realizado, el cual mostró que el factor mezcla fue altamente significativo ($F = 643.142$; $p = 2.00 \times 10^{-16}$), es decir, las composiciones solventes sí cambiaron la concentración de AC. De igual forma, se determinó que el factor tiempo también fue significativo ($F = 40.862$; $p = 1.27 \times 10^{-13}$), lo que confirmó la fase rápida inicial. Con respecto a la interacción de los factores (mezcla - tiempo) resultó significativa ($F = 4.511$; $p = 0.000148$), lo cual indicó que el efecto del tiempo también dependió de la mezcla, es decir picos más altos y sostenidos en medios con mayor fracción acuosa.

Dado que la interacción de todos los factores fue significativa, se procedió a un análisis de efectos simples y a pruebas post hoc tipo Tukey HSD para ubicar con precisión qué pares de mezclas difirieron en cada tiempo. Dicho análisis permitió resolver comparaciones pareadas manteniendo el nivel global de significancia y evitó sobrestimar diferencias por multiplicidad. Las pruebas Tukey expusieron que en la ventana de 10 minutos se alcanzaron los máximos para todas las mezclas hidroalcohólicas, confirmando el orden de desempeño de cada una de las mezclas hidroalcohólicas, siendo: agua > 60:40 > 70:30 > 80:20, con diferencias significativas en todas ($p < 0.0001$) (Cuadro 48).

Asimismo, se identificó que en los minutos iniciales (0–5), el agua y la mezcla también presentaron diferencias significativas ($p < 0.0001$) exceptuando las mezclas con mayor proporción de etanol ($p = 0.61$ y $p = 0.2014$, respectivamente (Cuadro 46 y Cuadro 47). Finalmente, en los minutos finales (15–20), las curvas tendieron a converger por descenso; aun así, el agua se mantuvo significativamente por encima ($p < 0.05$) de las demás mezclas 60:40 quedó por encima de 70:30 y 80:20, y entre 70:30 y 80:20 las

diferencias no resultaron significativas ($p > 0.05$), reflejando el agotamiento de sitios accesibles y la mayor influencia de difusión intrapartícula y transformaciones del AC.

Para la comparación de rendimientos, se fijó el minuto 10 como referencia operativa, ya que en dicho punto todas las mezclas presentaron extracciones con valores máximos, confirmados por las pruebas Tukey mencionadas anteriormente. El Gráfico 4, demostró un rendimiento de 5.18 ± 0.18 mg/g de ácido clorogénico empleando agua como solvente, seguido de 4.30 ± 0.22 mg/g para la mezcla 60:40; 2.47 ± 0.16 mg/g para la proporción 70:30 y de 1.69 ± 0.31 mg/g para a mezcla 80:20. Dichos valores superaron los referentes teóricos reportados para la extracción convencional (soxhlet) siendo de 1.781 mg/g, y en los casos de agua y mezcla 60:40, también superaron el valor referente no convencional (baño ultrasónico, 2.154 mg/g). La mejora se atribuyó a los factores de la compatibilidad solvente-soluto mencionados con anterioridad (mayor fracción acuosa y solubilidad del AC), así como la intensificación por ultrasonido, la cual aumentó la transferencia de masa mediante cavitación (microfracturas de la matriz sólida), reduciendo tiempos y evitando la sobreexposición térmica propia del Soxhlet. Además, al comparar los métodos no convencionales, el procesador entregó mayor potencia en el volumen de contacto que un baño ultrasónico, lo que mejoró la eficiencia y acortó los tiempos de extracción. Lo cual demostró un sistema más eficaz para liberar bioactivos, en concordancia con lo descrito en la literatura (Islam et al., 2023). Se determinó que la ventana de 10 min bajo un proceso de sonda ultrasónica con agua y mezclas hidroalcohólicas de 60:40 como alternativa, maximizó el rendimiento de AC y superó los referentes de los métodos convencional y no convencional, confirmando que la composición del solvente y el tiempo de sonicación son los determinantes principales del proceso.

Con el propósito de relacionar el costo de extracción del ácido clorogénico (AC) con el costo de preparación de una taza de café por los métodos V60 y Chemex, se desarrolló un análisis económico comparativo considerando de manera independiente el sistema de preparación de la bebida y el sistema de valorización del residuo generado. El costo directo de preparación, presentado en el Cuadro 9, fue de Q7.70 para el método V60 y Q9.80 para el método Chemex. Esta diferencia se atribuyó principalmente a la mayor cantidad de café utilizada en el método Chemex y al mayor costo unitario del filtro

correspondiente, mientras que los costos de energía, agua y mano de obra directa se mantuvieron constantes en ambos casos. Estos valores constituyen el punto de referencia económico de la bebida, previo a cualquier etapa de aprovechamiento del residuo.

Por su parte, el análisis de extracción utilizando agua como solvente durante 10 minutos, condición que presentó el mayor rendimiento experimental, permitió obtener un promedio de 5.18 mg de ácido clorogénico por gramo de SCG. Considerando que cada corrida experimental empleó 3 g de residuo seco, se recuperaron aproximadamente 15.54 mg de AC por extracción, con un costo directo asociado de Q3.70. A partir de estos datos, se determinó un costo unitario de producción de Q0.238 por mg de ácido clorogénico, indicador que permite cuantificar económicamente el proceso de valorización al asignar un costo definido al compuesto bioactivo recuperado.

Al escalar los resultados al residuo generado por cada taza preparada, se estimó una recuperación potencial de 93.24 mg de AC para el método V60 y 113.96 mg para el método Chemex, valores derivados de la cantidad de café empleada en cada preparación. El costo equivalente de extracción por taza fue de Q26.49 en V60 y Q32.38 en Chemex, tal como se presenta en el Cuadro 10. Al comparar estos montos con el costo de preparación de la bebida, se observó que la etapa extractiva representa aproximadamente 3.44 veces el costo de preparación en el método V60 y 3.30 veces en el método Chemex. Estos resultados evidencian que, bajo las condiciones evaluadas a escala laboratorio, la valorización del residuo implica una inversión económica adicional significativa en relación con el producto principal (Cuadro 11).

No obstante, para el análisis de la valorización económica fue importante considerar el precio del ácido clorogénico en el mercado. Actualmente, en caso de reactivos y compuestos de referencia utilizados en investigación, los valores pueden oscilar entre \$18 y \$76 por gramo, dependiente principalmente del grado de pureza y proveedor. A partir de dicha referencia, se empleó el límite inferior del rango de precios como criterio para la evaluación económica. Esto debido a que en el extracto obtenido durante esta investigación corresponde a un producto sin etapas de purificación, por lo que su valor estaría alrededor del extremo inferior en el mercado. Cabe mencionar que, para la valorización económica

de la taza de café, se utilizó un precio promedio de venta de Q27.50 por taza de especialidad, lo cual permitió identificar la valorización total del proceso.

Bajo el enfoque previamente mencionado, el análisis de valorización evidenció que la incorporación del proceso de extracción no logra compensar los costos asociados, resultando en una valorización negativa para cada uno de los métodos, siendo de Q-13.40 y Q-16.38 para el V60 y Chemex, respectivamente (Cuadro 12). Este comportamiento, indicó que el AC recuperado no generó un ingreso suficiente para cubrir el costo de su extracción y, por lo tanto, no presenta un retorno económico inmediato. Esto se encuentra influenciado principalmente por las condiciones de experimentación a escala laboratorio, en donde los costos de producción aumentan por el uso de equipo no optimizados y bajos volúmenes de procesamiento. Sin embargo, la valorización negativa no implica la inviabilidad del proceso, si no refleja las limitaciones del proceso evaluado. Al observar el punto de equilibrio económico, se determinó que el ácido clorogénico debería alcanzar un precio mínimo de Q0.0717/mg para el método V60 y Q0.1288/mg para el método Chemex, con el fin de lograr una valorización neutra. La diferencia entre ambos métodos se tribuye principalmente a la cantidad de residuo generado y al costo base de preparación de la bebida, puesto esto influye directamente en la cantidad de compuesto recuperable y en el valor económico del sistema. Dicho esto, el método V60 presenta una ventaja relativa, al requerir un menor precio de equilibrio para alcanzar la sostenibilidad del proceso.

Alcanzar estos precios de equilibrio en un contexto real dependería de la implementación de estrategias que permitan la optimización de las condiciones actuales de extracción y el escalamiento del proceso hacia niveles industriales, lo cual también minimizaría el precio mínimo requerido para alcanzar el equilibrio. Por otra parte, desde la perspectiva comercial, la valorización económica del producto también podría fortalecerse mediante el posicionamiento del ácido clorogénico como ingrediente funcional de origen natural para mercados especializados. Así el valor del producto no dependería únicamente de su composición química, si no también de factores asociados a su origen y su contribución a modelos de economía circular.

X. CONCLUSIONES

- Se compararon mezclas hidroalcohólicas para extraer AC de posos de V60 y Chemex y se identificó que el agua, a 10 min de sonicación con sonda ultrasónica, maximizó el rendimiento (5.18 ± 0.18 mg/g), superando a 60:40 (4.30 ± 0.22 mg/g), 70:30 (2.47 ± 0.16 mg/g) y 80:20 (1.69 ± 0.31 mg/g); además, estos valores superaron los referentes teóricos de Soxhlet (1.781 mg/g) y de baño ultrasónico (2.154 mg/g), por lo que la composición del solvente y el control del tiempo se confirmaron como determinantes del proceso.
- Se caracterizaron los posos de café de V60 y Chemex y se determinó un pH levemente ácido y estable (V60: 6.16 ± 0.20 ; Chemex: 6.21 ± 0.06 ; CV 3.29 y 0.97 %), humedad alta y consistente (V60: 67.13 ± 1.24 %; Chemex: 67.97 ± 2.09 %; CV 1.84 y 3.07 %), y una granulometría unimodal dentro del rango óptimo de extracción (aproximadamente entre 0.45–0.65 mm). El ANOVA mostró que el método (V60 vs Chemex) no fue significativo sobre las fracciones granulométricas ($F = 0.028$; $p = 0.867$), por lo que ambos residuos se trataron como una misma matriz sólida.

- Se demostró una etapa de extracción creciente y rápida, con máximo a los 10 min para todas las mezclas, seguida de descensos atribuidos a degradación y transformaciones del ácido clorogénico. El ANOVA de dos vías confirmó efectos significativos de la mezcla ($F = 643.142$; $p \approx 2.0 \times 10^{-16}$), del tiempo ($F = 40.862$; $p \approx 1.27 \times 10^{-13}$) y de su interacción ($F = 4.511$; $p \approx 0.000148$). Las pruebas de Tukey ubicaron diferencias pareadas coherentes con el orden $H_2O > 60:40 > 70:30 > 80:20$ en el minuto 10, confirmando la preferencia del Ac hacia fracciones acuosas.
- Se logró relacionar el costo de extracción del ácido clorogénico con el costo de preparación de una taza de café por los métodos V60 y Chemex, con valores de Q7.70 y Q9.80, respectivamente. Bajo la condición óptima evaluada (agua, 10 min), se obtuvo un rendimiento de 5.18 mg de AC por g de SCG, con un costo unitario de Q0.238 por mg. Al escalar dichos resultados al residuo generado por taza, los costos de extracción fueron de Q26.49 (V60) y Q32.38 (Chemex), representando aproximadamente 3.44 y 3.30 veces el costo de preparación de la bebida. Se determinó una valorización económica negativa para ambos métodos, evidenciando un proceso no viable a escala laboratorio, así como un precio de equilibrio Q0.0717/mg para V60 y Q0.1288/mg para Chemex, indicando que la viabilidad depende de la optimización y escala del proceso.

XI. RECOMENDACIONES

- Evaluar posos de *espresso* bajo las condiciones óptimas halladas (ultrasonido, 10 min, agua) y comparar rendimiento, costos por taza y perfil fenólico frente a V60/Chemex.
- Incorporar ensayos funcionales (DPPH/ABTS/FRAP) y perfilar otros fenoles para vincular rendimiento de ácido clorogénico con capacidad antioxidante global.
- Estudiar la extracción de AC en húmedo (matriz sólida sin secar) vs poso secado, cuantificando energía, rendimiento y calidad del extracto, para evaluar las discrepancias.
- Estudiar residuos agroindustriales abundantes en Guatemala con alto contenido de ácido clorogénico (AC) para comparar y seleccionar los de mayor rendimiento y viabilidad.
- Estudiar la estabilidad del extracto, con respecto a la luz, oxígeno, pH y temperatura, para proponer formulaciones con antioxidantes seguros si se busca una vida útil extendida.
- Explorar la aplicación del sólido post-extracción como material micelial y sustrato parcial para *Pleurotus ostreatus* u otros hongos para evaluar su desempeño.
- Evaluar la obtención de pulpas celulósicas a partir del sólido post-extracción para fabricar papel y/o biocompuestos.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- AGEXPORT. (2025d. C.). *Cifras de exportación 2025*.
<https://www.export.com.gt/cifras-de-exportacion-2025>
- Amrouk, E. M., Palmeri, F., & Magrini, E. (2024). *Global coffee market and recent price developments*. 10.
- ANACAFÉ, (2013). Las regiones de café de nuestra Guatemala. Gento Coffee Roasters.
<https://www.gentocoffee.com.gt/blogs/news/lasregiones-de-cafe-de-nuestra-guatemala>
- Asociación Nacional del Café. (2025). *Café de Guatemala: resultados de la cosecha 2023-2024*. <http://demo.anacafe.org/cafe-de-guatemala/>
- Ballesteros, L., Teixeira, J., & Mussatto, S. (2014). *Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin*. Food and Bioprocess Technology, 7. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
- Bastian, F., Hutabarat, O. S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T. B., & SimalGandara, J. (2021). *From Plantation to Cup: Changes in Bioactive Compounds during Coffee Processing*. Food., 10(11), 2827.
<https://doi.org/10.3390/foods10112827>
- Brzezińska, R., Górská, A., Wirkowska-Wojdyła, M., & Piasecka, I. (2023). *Response Surface Methodology as a Tool for Optimization of Extraction Process of Bioactive*

- Compounds from Spent Coffee Grounds*. Applied Sciences, 13(13), 7634.
<https://doi.org/10.3390/app13137634>
- Business Insights. (2024). *Chlorogenic Acid Market Size, Share, Growth, Trend, Forecast, 2033*. Business Research Insights.
<https://www.businessresearchinsights.com/marketreports/chlorogenic-acid-market-108441>
- Calle-Chumo, R., Gallegos-Paredos, A., & Jarrín-Oseguera, P. (2023). *Influence of the Solvent on the Extraction of Phenolic Compounds from Coffee Grounds via Soxhlet Leaching*. Research Article / Chemical, Food and Environmental Engineering, 43(1), 7. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.97521>
- Castro-Díaz, R., Silva-Beltrán, N. P., Gámez-Meza, N., & Calderón, K. (2025). *The Antimicrobial Effects of Coffee and By-Products and Their Potential Applications in Healthcare and Agricultural Sectors: A State-of-Art Review*. Microorganisms, 13(2), 215. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020215>
- CENICAFÉ. (1932). *Manual del cafetero colombiano*. Litografía Colombia.
- Chaves-Ulate, E. C., & Esquivel-Rodríguez, P. (2019). *Ácidos clorogénicos presentes en el café: Capacidad antimicrobiana y antioxidante*. Agronomía Mesoamericana, 299-311. <https://doi.org/10.15517/am.v30i1.32974>
- Chemat, F., Abert Vian, M., Ravi, H. K., Khadhraoui, B., Hilali, S., Perino, S., & Fabiano Tixier, A.-S. (2019). *Review of Alternative Solvents for Green Extraction of Food and Natural Products: Panorama, Principles, Applications and Prospects*. Molecules, 24(16), 3007. <https://doi.org/10.3390/molecules24163007>
- Chu, Y.-F. (2012). *Coffee: Emerging Health Effects and Disease Prevention* (1.^a edición, 1-1).
- Chua, L. S., Latiff, N. A., & Mohamad, M. (2016). *Reflux extraction and cleanup process by column chromatography for high yield of andrographolide enriched extract*. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 3(2), 64-70.
<https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.01.004>

- Crozier, A., Jaganath, I. B., & Clifford, M. N. (2006). *Phenols, Polyphenols and Tannins: An Overview. En Plant Secondary Metabolites* (pp. 1-24). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470988558.ch1>
- Dias, É. C. P. P., Macedo, G. A., Camargo, G. A., Macedo, J. A., & Chiocchetti, G. D. M. E. (2024). *Effects of Extraction Processes on Recovery, the Phenolic Profile, and Antiglycation Activity from Green Coffee Residues (Coffea arabica and Coffea canephora Pierre)*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(36), 13464-13474. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c02718>
- Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). *Functional properties of coffee and coffee byproducts*. *Food Research International*, 46(2), 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- Ferreira, L., de Souza Gomes, M., Maciel de Oliveira, L., & Diniz Santos, L. (2023). *Coffee fermentation process: A review*. *Food Research International*, 169, 112793. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793>
- Figuroa Campos, G. A., Sagu, S. T., Saravia Celis, P., & Rawel, H. M. (2020). *Comparison of Batch and Continuous Wet-Processing of Coffee: Changes in the Main Compounds in Beans, By-Products and Wastewater*. *Foods*, 9(8), 1135. <https://doi.org/10.3390/foods9081135>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm?* *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gómez-de la Cruz, F. J., Cruz-Peragón, F., Casanova-Peláez, P. J., & PalomarCarnicero, J. M. (2015). *A vital stage in the large-scale production of biofuels from spent coffee grounds: The drying kinetics*. *Fuel Processing Technology*, 130, 188-196. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.10.012>
- Haile, M., & Kang, W. (2019). *The Harvest and Post-Harvest Management Practices' Impact on Coffee Quality*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89224>

- He, Y., Mao, S., Zhao, Y., & Yang, J. (2025). *Research Advances in the Synthesis, Metabolism, and Function of Chlorogenic Acid*. *Foods*, 14(11), 1914. <https://doi.org/10.3390/foods14111914>
- Herrero, M., Cifuentes, A., & Ibañez, E. (2006). *Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review*. *Food Chemistry*, 98(1), 136-148. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058>
- Hoffmann, J. (2018). *The World Atlas of Coffee: From beans to brewing – coffees explored, explained and enjoyed (2.^a ed.)*. Octopus Publishing Group.
- Huang, J., Xie, M., He, L., Song, X., & Cao, T. (2023). *Chlorogenic acid: A review on its mechanisms of anti-inflammation, disease treatment, and related delivery systems*. *Frontiers in Pharmacology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1218015>
- Islam, M., Malakar, S., Rao, M. V., Kumar, N., & Sahu, J. K. (2023). *Recent advancement in ultrasound-assisted novel technologies for the extraction of bioactive compounds from herbal plants: A review*. *Food Science and Biotechnology*, 32(13), 1763-1782. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01346-6>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions*. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kobylińska, Z., Biesiadecki, M., Kuna, E., Galiniak, S., & Molon, M. (2025). *Coffee as a Source of Antioxidants and an Elixir of Youth*. *Antioxidants*, 14, 285. <https://doi.org/10.3390/antiox14030285>
- Lavecchia, R., & Zuurro, A. (2011). *Polyphenols and Energy Recovery from Spent Coffee Grounds*. *Chemical Engineering Transactions*, 25, 285-290. <https://doi.org/10.3303/CET1125048>
- Lu, H., Tian, Z., Cui, Y., Liu, Z., & Ma, X. (2020). *Chlorogenic acid: A comprehensive review of the dietary sources, processing effects, bioavailability, beneficial properties, mechanisms of action, and future directions*. *Comprehensive Reviews in*

Food Science and Food Safety, 19(6), 3130-3158. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12620>

Martinez-Saez, N., García, A. T., Pérez, I. D., Rebollo-Hernanz, M., Mesías, M., Morales, F. J., Martín-Cabrejas, M. A., & del Castillo, M. D. (2017). *Use of spent coffee grounds as food ingredient in bakery products*. Food Chemistry, 216, 114-122.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.173>

Maryott, A., & Smith, E. (1951). *Table of dielectric constants of pure liquids*. National Bureau of Standards.

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/circ/nbscircular514.pdf>

Moreno-Ruiz, G. (2002). *Nueva variedad de café de porte alto resistente a la roya del cafeto*. 53, 12.

Morris, J. (2019). *Coffee: A Global History*. Reaktion Books.

Moseley, Q., Colindres, O., Caballero, C., Serrano, A., Gallardo, J., Moreno, I., & Serracín, J. (2024). *Procesos de secado del café y su impacto en la industria*. I+D Tecnológico, 20(2), 63-74. <https://doi.org/10.33412/idt.v20.2.4059>

Naveed, M., Hejazi, V., Abbas, M., Kamboh, A. A., Khan, G. J., Shumzaid, M., Ahmad, F., Babazadeh, D., FangFang, X., Modarresi-Ghazani, F., WenHua, L., & XiaoHui, Z. (2018). Chlorogenic acid (CGA): A pharmacological review and call for further research. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 97, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.10.064>

Panusa, A., Zuorro, A., Lavecchia, R., Marrosu, G., & Petrucci, R. (2013). *Recovery of Natural Antioxidants from Spent Coffee Grounds*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61(17), 4162-4168. <https://doi.org/10.1021/jf4005719>

Rodriguez, R. (2021). *La importancia del café en la economía de Guatemala: Productividad, Sostenibilidad, Migración y Huella*. 45.

- Roth, I., & Lindorf, H. (1971). *Anatomía y desarrollo del fruto y de la semilla del café*. (Vol. 6). https://www.researchgate.net/profile/Helga-Lindorf/publication/319159851_Anatomia_y_desarrollo_del_fruto_y_de_la_semilla_del_cafe/links/5999b42845851564432dbec0/Anatomia-y-desarrollo-del-fruto-y-de-lasemilla-del-cafe.pdf
- Serna-Jiménez, J. A., Torres-Valenzuela, L. S., Sanín Villarreal, A., Roldan, C., Martín, M. A., Siles, J. A., & Chica, A. F. (2023). *Advanced extraction of caffeine and polyphenols from coffee pulp: Comparison of conventional and ultrasound-assisted methods*. LWT, 177, 114571. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114571>
- Shiveler, G., & Koch, J. (2015). *Design Principles for Liquid-Liquid Extraction*. <https://www.aisce.org/resources/publications/cep/2015/november/design-principlesliquid-liquid-extraction>
- Sik, B., Hanczné, E. L., Kapcsándi, V., & Ajtony, Z. (2020). *Conventional and nonconventional extraction techniques for optimal extraction processes of rosmarinic acid from six Lamiaceae plants as determined by HPLC-DAD measurement*. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 184, 113173. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2020.113173>
- Solano, W. (2020). *Coffea Libérica* (N81; p. 4). Organización Internacional del Café. https://www.researchgate.net/publication/342503618_Coffea_liberica
- Stalikas, C. D. (2007). *Extraction, separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids*. Journal of Separation Science, 30(18), 3268-3295. <https://doi.org/10.1002/jssc.200700261>
- Strati, I. F., Gogou, E., & Oreopoulou, V. (2015). *Enzyme and high pressure assisted extraction of carotenoids from tomato waste*. Food and Bioproducts Processing, 94, 668-674. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2014.09.012>

- Tay, K. (2025). *Coffee Annual Guatemala Report* (GT2025-0007; p. 13). Global Agricultural Information Network.
- Torres-Valenzuela, L., Serna-Jimenez, J., & Martínez, K. (2020). *Coffee By-Products: Nowadays and Perspectives*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89508>
- United States Department of Agriculture (USDA). (2025). *Coffee: World Markets and Trade* (3; Global Market Analysis, p. 9). United States Department of Agriculture. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>
- Velásquez, R. (2019). *Guía de Variedades de Café*. Asociación Nacional del Café. <https://www.anacafe.org/uploads/file/9a4f9434577a433aad6c123d321e25f9/Gu%C3%ADa-de-variedades-Anacaf%C3%A9.pdf>
- Vinatoru, M., Mason, T. J., & Calinescu, I. (2017). *Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials*. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 97, 159-178. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.002>
- Xue, N., Liu, Y., Jin, J., Ji, M., & Chen, X. (2022). *Chlorogenic Acid Prevents UVA-Induced Skin Photoaging through Regulating Collagen Metabolism and Apoptosis in Human Dermal Fibroblasts*. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(13), 6941. <https://doi.org/10.3390/ijms23136941>
- Zhu, Y., Wu, B., Xia, S., Zheng, G., Cheng, J., Huang, S., Xiong, Q., Chen, J., Li, H., Hirao, H., He, Y., & Chen, J. (2024). *Toward separation and purification of chlorogenic acid from *Lonicerae Japonicae* Flo (honeysuckle) using melamine-formaldehyde aerogel: A green and efficient approach*. *Chemical Engineering Journal*, 500, 157455. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157455>

Zuorro, A., & Lavecchia, R. (2012). *Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy*. *Journal of Cleaner Production*, 34, 49-56.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.003>

XIII. ANEXOS

13.1. Datos originales

Cuadro 13. Datos de placa de balanza analítica digital

| | |
|----------------------|---------|
| Marca | OHAUS |
| Modelo | EX24001 |
| Capacidad | 24000 g |
| Incertidumbre | ±0.1 g |
| Potencia | 15 w |

Cuadro 14. Datos de placa de balanza de humedad

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Marca | OHAUS |
| Modelo | MB120 |
| Capacidad | 120 g |
| Rango de temperatura | 40 - 230°C |
| Rango de humedad | 0.01% - 100% |
| Potencia | 120 VAC |
| Incertidumbre | ±0.3% |

Cuadro 15. Datos de placa de estufa eléctrica

| | |
|---------------------------|-------------------|
| Marca | Thermo Scientific |
| Modelo | SP88857105 |
| Temperatura máxima | 5401C |
| Frecuencia | 50/60 Hz |
| Voltaje | 230V |

Cuadro 16. Datos de placa de procesador ultrasónico

| | |
|---------------|-----------|
| Marca | Hielscher |
| Modelo | UP100H |

| | |
|-------------------|------------|
| Eficiencia | >90% |
| Frecuencia | 50/60 Hz |
| Amplitud | 20% - 100% |
| Voltaje | 100 - 120V |

Cuadro 17. Datos de cromatógrafo líquido de alta resolución utilizado

| | |
|------------------|------------------|
| Marca | Benchmark |
| Modelo | LC-8 |
| Capacidad | 8 x 15mL |
| Potencia | 120 VAC |

Cuadro 18. Datos del cromatógrafo líquido de alta resolución (HPLC)

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Fase móvil | Metanol - Agua (60:40) |
| Flujo | 0.5 mL/min |
| Longitud de onda | 325 nm |
| Columna | Hypersil ODS 200x2.1 mm |
| Volumen de inyección | 20µL |

Cuadro 19. Reactivos utilizados durante la experimentación

| Reactivo | Fórmula molecular | Pureza (%) | Grado | Masa Molar (g/mol) | Marca |
|-------------------|--|-------------------|--------------|---------------------------|---------------|
| Etanol | C ₂ H ₅ OH | <95% | Analítico | 46.07 | Supelco |
| Ácido clorogénico | C ₁₆ H ₁₈ O ₉ | <95% | Analítico | 354.31 | Sigma-Aldrich |

Se presenta los reactivos empleados para la ejecución de la experimentación. El primero se utilizó para las mezclas hidroalcohólicas necesarias para las extracciones. El segundo se usó para la realización de la curva de calibración para el HPLC.

Cuadro 20. Caracterización inicial de los posos de café por el método de preparación V60: masa de muestra, porcentaje de humedad y pH por corrida

| Corrida | Masa (g) (± 0.001 g) | Porcentaje de humedad (± 0.005 %) | pH |
|----------------|--|---|-----------|
| 1 | 1.0390 | 66.70% | 6.13 |
| 2 | 1.0070 | 67.59% | 5.98 |
| 3 | 1.0030 | 65.00% | 6.54 |
| 4 | 1.0200 | 66.08% | 5.86 |
| 5 | 1.0030 | 67.90% | 6.23 |
| 6 | 1.0040 | 68.13% | 6.12 |
| 7 | 0.9990 | 68.84% | 6.18 |
| 8 | 1.0040 | 66.77% | 6.28 |

Se presenta la humedad y el pH del poso de café extraído por el método de preparación de café V60 previo a la realización del proceso de secado. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro 21. Caracterización inicial de los posos de café por el método de preparación Chemex: masa de muestra, porcentaje de humedad y pH por corrida

| Corrida | Masa (g) (± 0.001 g) | Porcentaje de humedad (± 0.005 %) | pH |
|----------------|--|---|-----------|
| 1 | 1.008 | 67.96% | 6.18 |
| 2 | 1.008 | 66.27% | 6.2 |
| 3 | 1.003 | 65.74% | 6.16 |
| 4 | 1.000 | 65.60% | 6.17 |
| 5 | 1.000 | 70.90% | 6.32 |
| 6 | 1.004 | 70.12% | 6.25 |
| 7 | 0.996 | 69.82% | 6.29 |
| 8 | 1.008 | 67.36% | 6.18 |

Se presenta la humedad y el pH del poso de café extraído por el método de preparación de café Chemex previo a la realización del proceso de secado. Para ello

se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro 22. Humedad final de los posos de café V60 posterior al secado

| Corrida | Masa (g) (± 0.001 g) | Porcentaje de humedad (± 0.005 %) |
|----------------|--|---|
| 1 | 1.004 | 7.98% |
| 2 | 1.006 | 8.21% |
| 3 | 1.022 | 7.01% |
| 4 | 1.003 | 8.12% |
| 5 | 1.007 | 10.15% |
| 6 | 1.044 | 9.54% |
| 7 | 1.001 | 8.98% |
| 8 | 1.022 | 7.92% |

Se muestra la humedad del poso de café extraído por el método de preparación de café V60 posterior al proceso de secado. Se realizó el proceso de secado durante 8 horas continuas. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro 23. Humedad final de los posos de café Chemex posterior al secado

| Corrida | Masa (g) (± 0.001 g) | Porcentaje de humedad (± 0.005 %) |
|----------------|--|---|
| 1 | 0.997 | 8.23% |
| 2 | 1,004 | 7.04% |
| 3 | 0.999 | 8.01% |
| 4 | 1,000 | 8.54% |
| 5 | 1.002 | 9.23% |
| 6 | 1,004 | 9.17% |
| 7 | 1,004 | 10.01% |
| 8 | 1,001 | 9.98% |

Se muestra la humedad del poso de café extraído por el método de preparación de café Chemex posterior al proceso de secado. Se realizó el proceso de secado durante 8 horas continuas. Para ello se utilizó una balanza de humedad Ohaus, modelo MB 120, con un rango de medición de 0 a 120 g y una incertidumbre de ± 0.001 g.

Cuadro 24. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación V60, 1ra corrida

| Mesh | Masa beaker (± 0.1 g) | Abertura (in) | Masa total (± 0.1 g) | Tamizado (± 0.1 g) |
|-------------|---|--------------------------|--|--|
| 20 | 49.6 | 0.0331 | 53.4 | 3.8 |
| 30 | 65.8 | 0.0234 | 82.8 | 17 |
| 45 | 70.9 | 0.0139 | 79.4 | 8.5 |
| 60 | 49.3 | 0.0098 | 50.9 | 1.6 |
| 80 | 33.5 | 0.007 | 34.4 | 0.9 |
| 100 | 28.8 | 0.0059 | 29.1 | 0.3 |
| Finos | 29.4 | Finos | 30 | 0.6 |

Se muestran los datos empleados para la primera corrida del análisis granulométrico del poso de café extraído por el método de preparación de café V60. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Mesh presentada en la primera columna del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

Cuadro 25. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación V60, 2da corrida

| Mesh | Masa beaker (± 0.1 g) | Abertura (in) | Masa total (± 0.1 g) | Tamizado (± 0.1 g) |
|-------------|---|--------------------------|--|--|
| 20 | 0.0331 | 70.9 | 73.9 | 3.0 |
| 30 | 0.0234 | 49.3 | 68.1 | 18.8 |
| 45 | 0.0139 | 65.9 | 77.9 | 12.0 |
| 60 | 0.0098 | 49.5 | 51.5 | 2.0 |
| 80 | 0.007 | 28.8 | 29.9 | 1.1 |
| 100 | 0.0059 | 33.6 | 33.9 | 0.3 |

| | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-----|
| Finos | Finos | 181.6 | 182.4 | 0.8 |
|-------|-------|-------|-------|-----|

Se muestran los datos empleados para la segunda corrida del análisis granulométrico del poso de café extraído por el método de preparación de café V60. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Mesh presentada en la primera columna del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

Cuadro 26. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación V60, 3ra corrida

| Mesh | Masa beaker (± 0.1 g) | Abertura (in) | Masa total (± 0.1 g) | Tamizado (± 0.1 g) |
|-------|-------------------------------|------------------|------------------------------|----------------------------|
| 20 | 0.0331 | 69.5 | 70.5 | 1.1 |
| 30 | 0.0234 | 49.3 | 69.0 | 19.7 |
| 45 | 0.0139 | 60.0 | 71.5 | 11.5 |
| 60 | 0.0098 | 48.5 | 52.1 | 3.6 |
| 80 | 0.007 | 28.8 | 31.8 | 3.0 |
| 100 | 0.0059 | 33.6 | 34.0 | 0.4 |
| final | Finos | 181.7 | 182.0 | 0.3 |

Se muestran los datos empleados para la tercera corrida del análisis granulométrico del poso de café extraído por el método de preparación de café V60. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Mesh presentada en la primera columna del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

Cuadro 27. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación Chemex, 1ra corrida

| Mesh | Masa beaker (±0.001 g) | Abertura (in) | Masa total (±0.001 g) | Tamizado (±0.001 g) |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 49.6 | 0.0331 | 53.9 | 4.3 |
| 30 | 65.8 | 0.0234 | 83.7 | 17.9 |
| 45 | 70.9 | 0.0139 | 78.8 | 7.9 |
| 60 | 49.3 | 0.0098 | 50.7 | 1.4 |
| 80 | 32.5 | 0.007 | 34.3 | 1.8 |
| 100 | 28.8 | 0.0059 | 29.2 | 0.4 |
| final | 49.6 | Finos | 50.1 | 0.5 |

Se muestran los datos empleados para la primera corrida del análisis granulométrico del poso de café extraído por el método de preparación de café Chemex. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Mesh presentada en la primera columna del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

Cuadro 28. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación Chemex, 2da corrida

| Mesh | Masa beaker (±0.001 g) | Abertura (in) | Masa total (±0.001 g) | Tamizado (±0.001 g) |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 0.0331 | 70.9 | 77.9 | 7 |
| 30 | 0.0234 | 49.2 | 70.9 | 21.7 |
| 45 | 0.0139 | 65.9 | 73.7 | 7.8 |
| 60 | 0.0098 | 49.6 | 51 | 1.4 |
| 80 | 0.007 | 28.8 | 29.7 | 0.9 |
| 100 | 0.0059 | 33.5 | 33.8 | 0.3 |
| Finos | Finos | 33 | 33.3 | 0.3 |

Se muestran los datos empleados para la segunda corrida del análisis granulométrico del poso de café extraído por el método de preparación de café Chemex. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Mesh presentada en la primera columna del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

Cuadro 29. Análisis granulométrico de los posos de café del método de preparación Chemex, 3ra corrida

| Mesh | Masa beaker (± 0.001 g) | Abertura (in) | Masa total (± 0.001 g) | Tamizado (± 0.001 g) |
|-------------|---|--------------------------|--|--|
| 20 | 0.0331 | 49.6 | 54.8 | 5.2 |
| 30 | 0.0234 | 65.8 | 88.6 | 22.8 |
| 45 | 0.0139 | 70.9 | 81.3 | 10.4 |
| 60 | 0.0098 | 49.3 | 51.5 | 2.2 |
| 80 | 0.007 | 33.5 | 34.6 | 1.1 |
| 100 | 0.0059 | 28.8 | 29.1 | 0.3 |
| final | Finos | 49.6 | 50.1 | 0.5 |

Se muestran los datos empleados para la tercera corrida del análisis granulométrico del poso de café extraído por el método de preparación de café Chemex. Para ello se utilizó una tamizadora ROTAP modelo RX-29 con las mallas Mesh presentada en la primera columna del cuadro. Las masas de cada malla se midieron por medio de una balanza marca OHAUS, modelo EX24001 con un rango de medición de 0 a 2000 g y una incertidumbre de ± 0.1 g.

Cuadro 30. Masas de posos de café empleadas por condición experimental para la extracción sólido-líquido

| Mezcla | Tiempo de extracción (min) | Masa poso café (± 0.001 g) | | |
|--------|----------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|
| | | Corrida 1 | Corrida 2 | Corrida 3 |
| Agua | 0 | 3.0002 | 3.0094 | 3.0123 |
| | 5 | 3.0006 | 3.0009 | 3.0034 |
| | 10 | 3.0003 | 3.0053 | 3.006 |
| | 15 | 3.0096 | 3.0087 | 3.0057 |
| | 20 | 3.0000 | 3.0017 | 3.0019 |
| 60:40 | 0 | 3.0004 | 3.003 | 3.0028 |
| | 5 | 3.0006 | 3.0009 | 3.0009 |
| | 10 | 3.0001 | 3.0053 | 3.0009 |
| | 15 | 3.0006 | 3.0087 | 3.0064 |
| | 20 | 3.0034 | 3.0011 | 3.0052 |
| 70:30 | 0 | 3.0005 | 3.0083 | 3.0002 |
| | 5 | 3.0019 | 2.9952 | 3.0077 |
| | 10 | 3.0009 | 3.0002 | 3.0041 |
| | 15 | 3.0001 | 3.0103 | 3.0012 |
| | 20 | 3.0008 | 3.0002 | 3.0022 |
| 80:20 | 0 | 3.0000 | 3.0043 | 3.0023 |
| | 5 | 3.0002 | 3.0043 | 3.0006 |
| | 10 | 3.0001 | 3.0017 | 3.0002 |
| | 15 | 3.0034 | 3.0004 | 3.0008 |
| | 20 | 3.0028 | 3.0005 | 2.9999 |

El cuadro presenta las masas de posos de café empleadas en cada combinación de mezcla hidroalcohólica y tiempo de extracción empleando un procesador ultrasónico marca Hielscher modelo UP100H con frecuencia de 30 ± 1 kHz, con tres corridas por condición.

Cuadro 31. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando agua como solvente, tiempo de retención y concentración (ppm)

| Mezcla | Tiempo de extracción (min) | Código de Masa poso café muestra (± 0.001 g) | | Tiempo de retención (min) | HPLC Cuantificación AC (ppm) |
|--------|----------------------------|---|--------|---------------------------|------------------------------|
| | | | | | |
| H2O | 0 | M1 | 3.0002 | 2.476 | 17.4629 |
| | 0 | M1.1 | 3.0094 | 1.490 | 620.45185 |
| | 0 | M1.2 | 3.0123 | 1.488 | 637.24937 |
| | 5 | M2 | 3.0006 | 2.576 | 25.39753 |
| | 5 | M2.1 | 3.0009 | 1.489 | 611.65302 |
| | 5 | M2.2 | 3.0034 | 1.484 | 567.98726 |
| | 10 | M3 | 3.0003 | 2.568 | 30.95965 |
| | 10 | M3.1 | 3.0053 | 1.487 | 618.27829 |
| | 10 | M3.2 | 3.006 | 1.482 | 487.06523 |
| | 15 | M4 | 3.0096 | 2.573 | 34.037710 |
| | 15 | M4.1 | 3.0087 | 1.489 | 726.06596 |
| | 15 | M4.2 | 3.0057 | 1.483 | 490.26124 |
| | 20 | M5 | 3.0000 | 1.493 | 30.12946 |
| | 20 | M5.1 | 3.0017 | 1.488 | 828.80354 |
| | 20 | M5.2 | 3.0019 | 1.484 | 483.97023 |

Cuadro 32. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando una mezcla de proporción 60:40 (etanol-agua) como solvente, tiempo de retención y concentración (ppm)

| Mezcla | Tiempo de extracción (min) | Código de Masa poso café | | Tiempo de retención (min) | HPLC Cuantificación AC (ppm) |
|--------|----------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| | | muestra | (±0.001 g) | | |
| 60:40 | 0 | M1 | 3.0004 | 1.356 | 218.87827 |
| | 0 | M1.1 | 3.003 | 1.401 | 257.92740 |
| | 0 | M1.2 | 3.0028 | 1.405 | 250.28304 |
| | 5 | M2 | 3.0006 | 1.405 | 536.42542 |
| | 5 | M2.1 | 3.0009 | 1.406 | 203.53092 |
| | 10 | M2.2 | 3.0009 | 1.408 | 221.50545 |
| | 10 | M3 | 3.0001 | 1.409 | 544.74940 |
| | 10 | M3.1 | 3.0053 | 1.403 | 259.24117 |
| | 10 | M3.2 | 3.0009 | 1.407 | 216.69778 |
| | 15 | M4 | 3.0006 | 1.410 | 561.89220 |
| | 15 | M4.1 | 3.0087 | 1.398 | 305.51291 |
| | 15 | M4.2 | 3.0064 | 1.404 | 197.49198 |
| | 20 | M5 | 3.0034 | 1.408 | 575.96212 |
| | 20 | M5.1 | 3.0011 | 1.411 | 235.49168 |
| | 20 | M5.2 | 3.0052 | 1.407 | 231.91518 |

Cuadro 33. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando una mezcla de proporción 70:30 (etanol-agua) como solvente, tiempo de retención

| Mezcla | Tiempo de extracción (min) | Código de Masa poso café muestra | | Tiempo de retención (min) | HPLC Cuantificación AC (ppm) |
|--------|----------------------------|----------------------------------|------------|---------------------------|------------------------------|
| | | | (±0.001 g) | | |
| 70:30 | 0 | M1 | 3.0005 | 2.53 | 271.98174 |
| | 0 | M1.1 | 3.0083 | 1.304 | 134.05048 |
| | 0 | M1.2 | 3.0002 | 1.441 | 129.47845 |
| | 5 | M2 | 3.0019 | 2.650 | 280.96185 |
| | 5 | M2.1 | 2.9952 | 1.386 | 140.24485 |
| | 5 | M2.2 | 3.0077 | 1.389 | 132.02654 |
| | 10 | M3 | 3.0009 | 2.635 | 296.64838 |
| | 10 | M3.1 | 3.0002 | 1.391 | 159.27632 |
| | 10 | M3.2 | 3.0041 | 1.387 | 139.14495 |
| | 15 | M4 | 3.0001 | 2.642 | 256.13400 |

Cuadro 34. Resultados de extracción de ácido clorogénico de posos de café empleando una mezcla de proporción 80:20 (etanol-agua) como solvente, tiempo de retención y concentración (ppm)

| Mezcla | Tiempo de extracción (min) | Muestra | Masa poso café (± 0.001 g) | Tiempo de retención (min) | HPLC Cuantificación AC (ppm) |
|--------|----------------------------|---------|---------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 80:20 | 0 | M1 | 3.0000 | 2.577 1.392 | 109.73440 |
| | 0 | M1.1 | 3.0043 | 1.394 | 117.51105 |
| | 0 | M1.2 | 3.0023 | 2.627 | 133.33168 |
| | 5 | M2 | 3.0002 | 2.638 | 193.45736 |
| | 5 | M2.1 | 3.0043 | 2.635 | 190.83717 |
| | 5 | M2.2 | 3.0006 | 2.641 | 190.59800 |
| | 10 | M3 | 3.0001 | 2.530 | 219.22519 |
| | 10 | M3.1 | 3.0017 | | 217.46245 |
| | 10 | M3.2 | 3.0002 | 2.648 | 211.24227 |
| | 15 | M4 | 3.0034 | 2.643 | 235.03519 |
| | 15 | M4.1 | 3.0004 | 2.618 | 191.91303 |
| | 15 | M4.2 | 3.0008 | 2.633 | 218.87827 |
| | 20 | M5 | 3.0028 | 2.546 | 206.96647 |
| | 20 | M5.1 | 3.0005 | 1.393 | 174.67788 |
| | 20 | M5.2 | 2.9999 | 1.395 | 163.07444 |

Cuadro 35. Parámetros de operación para el costo directo por taza

| Parámetro | Unidad | Valor |
|---------------------------------|--------|-------|
| Volumen de bebida | mL | 300 |
| Temperatura ambiente | °C | 25 |
| Temperatura de infusión | °C | 90 |
| Eficiencia del hervidor | – | 0.9 |
| Factor de agua extra (pérdidas) | – | 1.15 |
| Potencia del molino | W | 200 |
| Tiempo de molido por taza | s | 20 |

| | | |
|--------------------------------|-----|-------|
| Mano de obra (tarifa) | Q/h | 19.73 |
| Tiempo de preparación por taza | min | 4.5 |

El cuadro presenta los parámetros de operación utilizados para el cálculo del costo directo de la preparación de una taza de café, tanto para el método V60 como para el Chemex. Es necesario mencionar que la eficiencia del hervidor, la potencia del molino y el tiempo de molienda y preparación por taza, fueron proporcionados por la cafetería loca. Adicional, la tarifa de mano de obra se obtuvo del salario promedio reportado en trabajos de graduaciones con enfoque de administración de cafés en Guatemala. Es necesario mencionar, que el salario coincide con el salario mínimo de un trabajador guatemalteco.

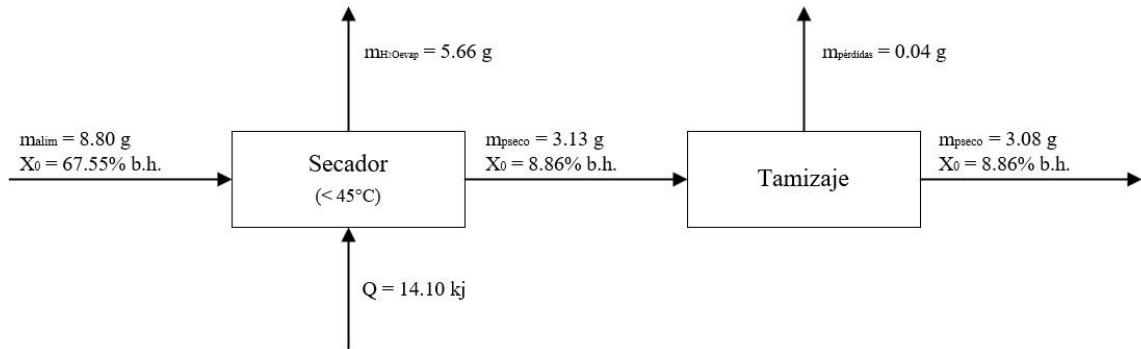
Cuadro 36. Tarifas y precios de materiales e insumos necesarios para la preparación de café y método de extracción

| Insumo/Servicio | Unidad | | Precio |
|------------------|--------|---|--------|
| Tarifa eléctrica | Q/kWh | Q | 1.419 |
| Tarifa de agua | Q/L | Q | 0.095 |
| Precio del café | Q/g | Q | 0.30 |
| Filtro V60 | Q/u | Q | 0.79 |
| Filtro Chemex | Q/u | Q | 1.70 |
| Etanol | Q/L | Q | 45.00 |

Se presentan las tarifas eléctricas y de agua para la ciudad de Guatemala, en donde se llevó a cabo la experimentación, los datos obtenidos de obtuvieron del portal de EGGSA y la tasa municipal de agua de la ciudad. Es necesario mencionar que a la tarifa de agua, se le adicionó un 20 % por considerar el tratamiento de filtrado en la instalación. Los filtros de café se obtuvieron de un proveedor de materiales de barismo.

13.2. Balance de masa y energía

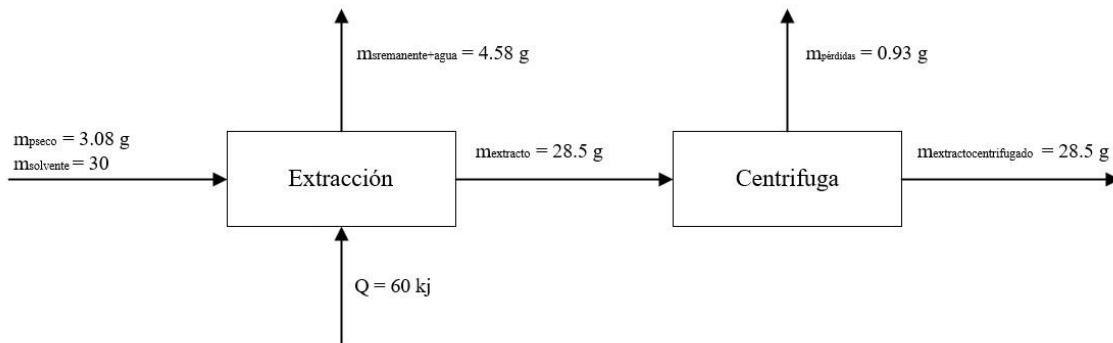
Figura 7. Balance de masa y energía del proceso de extracción de ácido clorogénico parte 1



(Fuente: propia)

Se presenta la primera parte del balance del proceso general de extracción de ácido clorogénico a partir de posos de café. El diagrama se realizó por medio de Visio.

Figura 8. Balance de masa y energía del proceso de extracción de ácido clorogénico



(Fuente: propia)

Se presenta la segunda parte del balance del proceso general de extracción de ácido clorogénico a partir de posos de café. El diagrama se realizó por medio de Visio.

13.3. Datos calculados

Cuadro 37. Análisis estadístico de la caracterización del poso de café del método de preparación V60

| Corrida | Masa (g) (± 0.001 g) | Porcentaje de humedad (± 0.005 %) | pH |
|----------------------------|---------------------------|--|---------------|
| 1 | 1.039 | 66.70 | 6.13 |
| 2 | 1.007 | 67.59 | 5.98 |
| 3 | 1.003 | 65.00 | 6.54 |
| 4 | 1.020 | 66.08 | 5.86 |
| 5 | 1.003 | 67.90 | 6.23 |
| 6 | 1.004 | 68.13 | 6.12 |
| 7 | 0.999 | 68.84 | 6.18 |
| 8 | 1.004 | 66.77 | 6.28 |
| Promedio | 1.010 | 67.13 | 6.17 |
| Desviación estándar | 0.013 | 1.24 | 0.20 |
| CV | 1.32 % | 1.84 % | 3.29 % |

Cuadro 38. Análisis estadístico de la caracterización del poso de café del método de preparación Chemex

| Corrida | Masa (g) (± 0.001 g) | Porcentaje de humedad (± 0.005 %) | pH |
|----------------------------|---------------------------|--|---------------|
| 1 | 1.008 | 67.96 | 6.18 |
| 2 | 1.008 | 66.27 | 6.20 |
| 3 | 1.003 | 65.74 | 6.16 |
| 4 | 1.000 | 65.60 | 6.17 |
| 5 | 1.000 | 70.90 | 6.32 |
| 6 | 1.004 | 70.12 | 6.25 |
| 7 | 0.996 | 69.82 | 6.29 |
| 8 | 1.008 | 67.36 | 6.18 |
| Promedio | 1.003 | 0.68 | 6.22 |
| Desviación estándar | 0.005 | 0.02 | 0.06 |
| CV | 0.45 % | 3.07 % | 0.97 % |

Cuadro 39. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la primera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación V60.

| Mesh | Masa beaker (±0.001 g) | Abertura (in) | Abertura (mm) | Masa total (±0.001 g) | Porcentaje de retenido promedio (%) | Porcentaje que atraviesa (%) |
|------|------------------------|---------------|---------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 20 | 49.6 | 0.0331 | 0.84074 | 53.4 | 11.6207 | 88.3792 |
| 30 | 65.8 | 0.0234 | 0.59436 | 82.8 | 51.9877 | 36.3914 |
| 45 | 70.9 | 0.0139 | 0.35306 | 79.4 | 25.9938 | 10.3975 |
| 60 | 49.3 | 0.0098 | 0.24892 | 50.9 | 4.8929 | 5.5045 |
| 80 | 33.5 | 0.007 | 0.1778 | 34.4 | 2.7522 | 2.7522 |
| 100 | 28.8 | 0.0059 | 0.14986 | 29.1 | 0.9174 | 1.8348 |

Cuadro 40. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la segunda corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación V60.

| Mesh | Beaker | Abertura (in) | Abertura (mm) | Masa total (±0.001 g) | Porcentaje de retenido promedio (%) | Porcentaje que atraviesa (%) |
|------|--------|---------------|---------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 20 | 70.9 | 0.0331 | 0.84074 | 73.9 | 7.8947 | 92.1053 |
| 30 | 49.3 | 0.0234 | 0.59436 | 68.1 | 49.4737 | 42.6316 |
| 45 | 65.9 | 0.0139 | 0.35306 | 77.9 | 31.5789 | 11.0526 |
| 60 | 49.5 | 0.0098 | 0.24892 | 51.5 | 5.2632 | 5.7895 |
| 80 | 28.8 | 0.007 | 0.1778 | 29.9 | 2.8947 | 2.8947 |
| 100 | 33.6 | 0.0059 | 0.14986 | 33.9 | 0.7895 | 2.1053 |

Cuadro 41. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la tercera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación V60.

| Mesh | Beaker | Abertura (in) | Abertura (mm) | Masa total (± 0.001 g) | Porcentaje de retenido promedio (%) | Porcentaje que atraviesa (%) |
|------|--------|---------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 20 | 69.45 | 0.0331 | 0.84074 | 70.5 | 2.6549 | 97.3451 |
| 30 | 49.3 | 0.0234 | 0.59436 | 69 | 49.8104 | 47.5348 |
| 45 | 60 | 0.0139 | 0.35306 | 71.5 | 29.0771 | 18.4576 |
| 60 | 48.5 | 0.0098 | 0.24892 | 52.1 | 9.1024 | 9.3552 |
| 80 | 28.8 | 0.007 | 0.1778 | 31.8 | 7.5853 | 1.7699 |
| 100 | 33.6 | 0.0059 | 0.14986 | 34 | 1.0114 | 0.7585 |

Cuadro 42. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la primera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación Chemex

| Mesh | Masa beaker (± 0.001 g) | Abertura (in) | Abertura (mm) | Masa total (± 0.001 g) | Porcentaje de retenido promedio (%) | Porcentaje que atraviesa (%) |
|------|------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 20 | 49.6 | 0.0331 | 0.84074 | 53.9 | 12.5731 | 87.4269 |
| 30 | 65.8 | 0.0234 | 0.59436 | 83.7 | 52.3392 | 35.0877 |
| 45 | 70.9 | 0.0139 | 0.35306 | 78.8 | 23.0994 | 11.9883 |
| 60 | 49.3 | 0.0098 | 0.24892 | 50.7 | 4.0936 | 7.8947 |
| 80 | 32.5 | 0.007 | 0.1778 | 34.3 | 5.2632 | 2.6316 |
| 100 | 28.8 | 0.0059 | 0.14986 | 29.2 | 1.1696 | 1.4620 |

Cuadro 43. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la segunda corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación Chemex

| Mesh | Masa beaker (±0.001 g) | Abertura (in) | Abertura (mm) | Masa total (±0.001 g) | Porcentaje de retenido promedio (%) | Porcentaje que atraviesa (%) |
|------|---------------------------|---------------|------------------|---------------------------|---|------------------------------------|
| 20 | 70.9 | 0.0331 | 0.84074 | 77.9 | 17.7665 | 82.2335 |
| 30 | 49.2 | 0.0234 | 0.59436 | 70.9 | 55.0761 | 27.1574 |
| 45 | 65.9 | 0.0139 | 0.35306 | 73.7 | 19.7970 | 7.3604 |
| 60 | 49.6 | 0.0098 | 0.24892 | 51 | 3.5533 | 3.8071 |
| 80 | 28.8 | 0.007 | 0.1778 | 29.7 | 2.2843 | 1.5228 |
| 100 | 33.5 | 0.0059 | 0.14986 | 33.8 | 0.7614 | 0.7614 |

Cuadro 44. Resultados calculados del tamizaje vibratorio para la tercera corrida de posos de café obtenidos por el método de preparación Chemex

| Mesh | Masa beaker (±0.001 g) | Abertura (in) | Abertura (mm) | Masa total (±0.001 g) | Porcentaje de retenido promedio (%) | Porcentaje que atraviesa (%) |
|------|------------------------------|------------------|------------------|---------------------------|---|---------------------------------|
| 20 | 49.6 | 0.0331 | 0.84074 | 54.8 | 12.2353 | 87.7647 |
| 30 | 65.8 | 0.0234 | 0.59436 | 88.6 | 53.6471 | 34.1176 |
| 45 | 70.9 | 0.0139 | 0.35306 | 81.3 | 24.4706 | 9.6471 |
| 60 | 49.3 | 0.0098 | 0.24892 | 51.5 | 5.1765 | 4.4706 |
| 80 | 33.5 | 0.007 | 0.1778 | 34.6 | 2.5882 | 1.8824 |
| 100 | 28.8 | 0.0059 | 0.14986 | 29.1 | 0.7059 | 1.1765 |

Cuadro 45. Resultado de cuantificación de ácido clorogénico promedio para cada uno de los solventes y tiempos de extracción con su desviación estándar

| Mezcla | Tiempo (min) | Cuantificación de Ácido Clorogénico (ppm) | Cuantificación de Ácido Clorogénico promedio(ppm) | Desviación estándar promedio (ppm) |
|--------|--------------|---|---|------------------------------------|
| H2O | 0 | 363.4629 | | |
| | 0 | 337.24937 | 340.38804 | 21.67662433 |
| | 0 | 320.45185 | | |
| | 5 | 400.39753 | | |
| | 5 | 421.65302 | 415.3459367 | 12.99820432 |
| | 5 | 423.98726 | | |
| | 10 | 491.95965 | | |
| | 10 | 464.27829 | 473.1010567 | 16.34327952 |
| | 10 | 463.06523 | | |
| | 15 | 434.03771 | | |
| | 15 | 436.06596 | 442.96907 | 13.75050107 |
| | 15 | 458.80354 | | |
| | 20 | 412.12946 | | |
| | 20 | 470.26124 | 452.12031 | 34.68270772 |
| | 20 | 473.97023 | | |
| 60:40 | 0 | 218.87827 | | |
| | 0 | 257.92740 | 242.3629033 | 20.69432439 |
| | 0 | 250.28304 | | |
| | 5 | 350.42542 | 325.15393 | 23.65918611 |
| | 5 | 303.53092 | | |
| | 5 | 321.50545 | | |
| | 10 | 400.7494 | | |
| | 10 | 407.24117 | 392.5627833 | 20.0659426 |
| | 10 | 369.69778 | | |
| | 15 | 361.89220 | | |

| | | | | |
|---|---|-----------|-------------|-------------|
| | 1 | 335.51291 | 333.29903 | 29.76193009 |
| | 5 | | | |
| | 1 | 302.49198 | | |
| | 5 | | | |
| | 2 | 275.96212 | | |
| | 0 | | | |
| | 2 | 295.49168 | 291.1229933 | 13.51681909 |
| | 0 | | | |
| | 2 | 301.91518 | | |
| | 0 | | | |
| | | | | 15.30820153 |
| | 0 | | | |
| | 0 | 157.98174 | 140.5035567 | |
| | 0 | 134.05048 | | |
| | 5 | 129.47845 | | 26.20457744 |
| 7 | 5 | 180.96185 | 151.0777467 | |
| 0 | 5 | 140.24485 | | |
| : | 1 | 132.02654 | | |
| 3 | 0 | 226.64838 | | |
| 0 | 1 | 239.27632 | 225.6898833 | 14.09015725 |
| | 0 | | | |
| | 1 | 211.14495 | | |
| | 0 | | | |
| | 1 | 216.13400 | | |
| | 5 | | | |
| | 1 | 224.32347 | 216.4408667 | 7.733737405 |
| | 5 | | | |
| | 1 | 208.86513 | | |
| | 5 | | | |

Cuadro 46. Rendimiento promedio (mg/g) de ácido clorogénico extraído mediante ultrasonido de poso de café

| Mezcla | Rendimiento Promedio (mg/g) | Rendimiento teórico método convencional (mg/g) | Rendimiento teórico método no convencional (mg/g) | Desviación estándar Rendimiento (\pm mg/g) |
|--------|-----------------------------|--|---|---|
| H2O | 5.18 | 1.781 | 2.154 | 0.184548217 |
| 60:40 | 4.30 | 1.781 | 2.154 | 0.217976188 |

| | | | | |
|-------|------|-------|-------|-------------|
| 70:30 | 2.47 | 1.781 | 2.154 | 0.156121884 |
| 80:20 | 1.69 | 1.781 | 2.154 | 0.314608367 |

Cuadro 47. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=0 min

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|---------------|----------------------|---------|
| H2O - 60:40 | 98 | <0.0001 |
| H2O - 70:30 | 199.9 | <0.0001 |
| H2O - 80:20 | 220.2 | <0.0001 |
| 60:40 - 70:30 | 101.9 | <0.0001 |
| 60:40 - 80:20 | 122.2 | <0.0001 |
| 70:30 - 80:20 | 20.3 | 0.6100 |

Cuadro 48. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=5 min

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|---------------|----------------------|---------|
| H2O - 60:40 | 98 | <0.0001 |
| H2O - 70:30 | 199.9 | <0.0001 |
| H2O - 80:20 | 220.2 | <0.0001 |
| 60:40 - 70:30 | 101.9 | <0.0001 |
| 60:40 - 80:20 | 122.2 | <0.0001 |
| 70:30 - 80:20 | 20.3 | 0.6100 |

Cuadro 49. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=10 min

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|---------------|----------------------|---------|
| H2O - 60:40 | 80.5 | 0.0001 |
| H2O - 70:30 | 247.4 | <0.0001 |
| H2O - 80:20 | 319.5 | <0.0001 |
| 60:40 - 70:30 | 166.9 | <0.0001 |
| 60:40 - 80:20 | 238.9 | <0.0001 |
| 70:30 - 80:20 | 72 | 0.0005 |

Cuadro 50. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=15 min

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|------------------|-----------------------------|----------------|
| H2O - 60:40 | 109.7 | <0.0001 |
| H2O - 70:30 | 226.5 | <0.0001 |
| H2O - 80:20 | 304.4 | <0.0001 |
| 60:40 - 70:30 | 116.9 | <0.0001 |
| 60:40 - 80:20 | 194.7 | <0.0001 |
| 70:30 - 80:20 | 77.8 | 0.0002 |

Cuadro 51. Análisis Tukey para la variación de tiempo en cada una de las combinaciones de mezclas hidroalcohólicas, T=20 min

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|------------------|-----------------------------|----------------|
| H2O - 60:40 | 161 | <0.0001 |
| H2O - 70:30 | 271.2 | <0.0001 |
| H2O - 80:20 | 317.2 | <0.0001 |
| 60:40 - 70:30 | 110.2 | <0.0001 |
| 60:40 - 80:20 | 156.2 | <0.0001 |
| 70:30 - 80:20 | 46 | 0.0386 |

Cuadro 52. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=agua

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|-----------------------|-----------------------------|----------------|
| Tiempo 0 - Tiempo 5 | -74.96 | 0.0005 |
| Tiempo 0 - Tiempo 10 | -132.71 | <0.0001 |
| Tiempo 0 - Tiempo 15 | -102.58 | <0.0001 |
| Tiempo 0 - Tiempo 20 | -111.73 | <0.0001 |
| Tiempo 5 - Tiempo 10 | -57.76 | 0.0095 |
| Tiempo 5 - Tiempo 15 | -27.62 | 0.4594 |
| Tiempo 5 - Tiempo 20 | -36.77 | 0.189 |
| Tiempo 10 - Tiempo 15 | 30.13 | 0.3718 |
| Tiempo 10 - Tiempo 20 | 20.98 | 0.7086 |

| | | |
|-----------------------|-------|--------|
| Tiempo 15 - Tiempo 20 | -9.15 | 0.9806 |
|-----------------------|-------|--------|

Cuadro 53. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=60:40

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|---------------------|----------------------|---------|
| Tiempo0 - Tiempo5 | -82.79 | 0.0001 |
| Tiempo0 - Tiempo10 | -150.2 | <0.0001 |
| Tiempo0 - Tiempo15 | -90.94 | <0.0001 |
| Tiempo0 - Tiempo20 | -48.76 | 0.039 |
| Tiempo5 - Tiempo10 | -67.41 | 0.0018 |
| Tiempo5 - Tiempo15 | -8.15 | 0.9874 |
| Tiempo5 - Tiempo20 | 34.03 | 0.2548 |
| Tiempo10 - Tiempo15 | 59.26 | 0.0074 |
| Tiempo10 - Tiempo20 | 101.44 | <0.0001 |
| Tiempo15 - Tiempo20 | 42.18 | 0.0976 |

Cuadro 54. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=70:30

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|---------------------|----------------------|---------|
| Tiempo0 - Tiempo5 | -10.57 | 0.9672 |
| Tiempo0 - Tiempo10 | -85.19 | 0.0001 |
| Tiempo0 - Tiempo15 | -75.94 | 0.0004 |
| Tiempo0 - Tiempo20 | -40.37 | 0.123 |
| Tiempo5 - Tiempo10 | -74.61 | 0.0005 |
| Tiempo5 - Tiempo15 | -65.36 | 0.0026 |
| Tiempo5 - Tiempo20 | -29.8 | 0.383 |
| Tiempo10 - Tiempo15 | 9.25 | 0.9798 |
| Tiempo10 - Tiempo20 | 44.82 | 0.0685 |

Cuadro 55. Análisis Tukey para la variación de mezclas hidroalcohólicas en cada una de las combinaciones de tiempo, Mezcla=80:20

| Contraste | Diferencia de medias | Valor p |
|-------------------|----------------------|---------|
| Tiempo0 - Tiempo5 | 2.23 | 0.9999 |

| | | |
|---------------------|--------|--------|
| Tiempo0 - Tiempo10 | -33.45 | 0.2705 |
| Tiempo0 - Tiempo15 | -18.42 | 0.7962 |
| Tiempo0 - Tiempo20 | -14.71 | 0.8978 |
| Tiempo5 - Tiempo10 | -35.68 | 0.2136 |
| Tiempo5 - Tiempo15 | -20.64 | 0.7207 |
| Tiempo5 - Tiempo20 | -16.94 | 0.8407 |
| Tiempo10 - Tiempo15 | 15.03 | 0.8904 |
| Tiempo10 - Tiempo20 | 18.74 | 0.7859 |
| Tiempo15 - Tiempo20 | 3.7 | 0.9994 |

Cuadro 56. Costeo directo de la extracción de ácido clorogénico empleando agua y mezcla hidroalcohólica

| Concepto | Mezcla hidroalcohólica | | Agua | |
|----------------------|------------------------|--------------|----------|--------------|
| Ultrasonido | Q | 0.024 | Q | 0.024 |
| Centrífuga | Q | 0.0213 | Q | 0.021 |
| Mano de obra directa | Q | 3.29 | Q | 3.288 |
| Secado (prorratedo) | Q | 0.2714 | Q | 0.271 |
| Solvente (R=0) | Q | 0.81 | Q | 0.10 |
| Total directo | Q | 4.416 | Q | 3.700 |

Cuadro 57. Cálculos intermedios comunes entre métodos de preparación del café

| Magnitud | Unidad | | Valor |
|------------------------|--------|---|-------------|
| Masa real de agua | kg | | 0.345 |
| Salto térmico | °C | | 65 |
| Energía calentar agua | kWh | | 0.02897 |
| Costo energía calentar | Q | Q | 0.04 |
| Costo agua | Q | Q | 0.03 |
| Energía de molido | kWh | | 0.001111111 |
| Costo energía molido | Q | Q | 0.0016 |
| Mano de obra directa | Q | Q | 1.48 |

Aquí se resumen los requerimientos de insumos y energía comunes para preparar una taza de café, compartidos por ambos métodos de preparación evaluados. El

cuadro reporta la masa de agua utilizada y el salto térmico aplicado, a partir de los cuales se estima la energía para calentar el agua (kWh) y su costo. También se incluye el costo del agua como insumo. En cuanto al acondicionamiento del café, se consigna la energía de molido (kWh) y su costo asociado. Finalmente, se considera el componente de mano de obra directa.

Cuadro 58. Parámetros de operación para el costo directo por extracción de ácido clorogénico de todas las etapas

| Parámetro | Unidad | Valor |
|----------------------------------|---------------|--------------|
| Masa SCG húmedos del lote secado | g | 580 |
| Humedad inicial de SCG | % b.h. | 67.55% |
| Masa SCG secos del lote | g | 188.21 |
| Masa SCG secos por corrida | g | 3 |
| Volumen de solvente | mL | 30 |
| Fracción etanol | – | 0.6 |
| Potencia ultrasonido | W | 100 |
| Tiempo ultrasonido | min | 10 |
| Potencia centrífuga | W | 120 |
| Tiempo por run (centrífuga) | min | 30 |
| Runs usados por tu muestra | – | 1 |
| Volumen de extracto obtenido | mL | 28 |
| Tiempo MO directa (corrida) | min | 10 |

Se presentan los parámetros operativos que alimentan el cálculo del costo directo de la extracción de ácido clorogénico a escala de laboratorio, considerando todas las etapas (preparación, extracción y separación). El lote parte de 580 g de posos húmedos (SCG) con 67.55 % b.h., equivalentes a 188.21 g secos. Cada corrida utiliza 3 g (bs) y 30 mL de solvente con fracción de etanol = 0.6 (mezcla hidroalcohólica). La extracción se realiza por ultrasonido a 100 W durante 10 min y la separación por centrifugación a 120 W durante 30 min por corrida (1 run por muestra). De cada corrida se obtienen 28 mL de extracto y se contabilizan 10 min de mano de obra directa.

Cuadro 59. Desglose por etapa de energía y costos directos por corrida en la extracción de ácido clorogénico

| Etapa | Magnitud | Unidad | Valor |
|---------------------------------|------------------------------|---------------|--------------|
| Secado | Energía del lote | kWh | 12 |
| | Costo secado del lote | Q | Q |
| | Secado asignado a la corrida | Q | 17.03 |
| | | | 0.2714 |
| Ultrasonido | Energía | kWh | Q |
| | Costo | Q | 0.0166 |
| | | | 0.024 |
| Centrífuga (run compartido 4×2) | Energía de la corrida | kWh | Q |
| | Costo de la corrida | Q | 0.06 |
| | | | 0.0213 |
| Solvente (sin recuperación) | Consumo neto | L | Q |
| | Costo solvente | Q | 0.03 |
| | | | 0.81 |
| Mano de obra directa | Costo MO | Q | Q |
| | | | 3.29 |

Se presenta por etapa del proceso (secado, ultrasonido, centrifugación, solvente y mano de obra), las magnitudes usadas en el cálculo del costo directo unitario: energía consumida (kWh) y su costo, la asignación proporcional del secado a cada corrida, el consumo neto de solvente sin recuperación (L) y su costo, y el costo de mano de obra directa (Q). Con ello se garantiza trazabilidad entre consumos energéticos, insumos y el costo por corrida.

13.4. Ecuaciones

Ecuación 1. Porcentaje de humedad luego de x minutos de secado

$$\% \text{Humedad}_{t=x \text{ min}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}, t=x \text{ min}}}{m_i} \times 100\%$$

Donde:

$m_{\text{H}_2\text{O}, t=x \text{ min}}$ = masa de agua inicial en la materia prima

% humedad, $t=x_{\text{min}}$ = porcentaje de humedad luego de x minutos de secado

m_i = masa inicial de la materia prima

Ecuación 2. Masa de la materia prima seca utilizada para la extracción

$$m_{\text{material seco}} = m_i - m_{\text{H}_2\text{O, inicial}}$$

Donde:

$m_{\text{H}_2\text{O, inicial}}$ = masa de agua luego de x minutos

de secado

m_i = masa inicial de la materia prima

Ecuación 3. Porcentaje de material en una malla determinada

$$\% \text{ en malla} = \frac{m_{\text{malla,t}}}{m_T} \times 100\%$$

Donde:

% malla = % que se encuentra

en la malla

m_T = masa total alimentada al

tamizaje

$m_{\text{malla, t}}$ = masa retenida en la malla t

Ecuación 4. Porcentaje de material que atraviesa la malla inicial

$$\% \text{ que pasa por la malla}_{\text{inicial}} = 100\% - \% \text{ en malla}_{\text{inicial}}$$

Donde:

% que pasa por malla = % que atraviesa la malla

% en malla_{inicial} = % retenido en la primera malla

Ecuación 5. Curva de calibración

$$y = mx + b$$

Donde:

m = pendiente (sensibilidad del método)

x = concentración del analito (ppm) b = intercepto (sesgo o ruido)

Ecuación 6. Rendimiento de ácido clorogénico (mg/g)

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{ácido clorogénico (mg)}}{\text{masa de posos de café (g)}}$$

Ecuación 7. Balance de masa para sistemas sin acumulación

$$\sum_{\text{entradas}} \dot{m} = \sum_{\text{salidas}} \dot{m}$$

Ecuación 8. Balance de energía de un sistema

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_{\text{in}} h_{\text{in}} - \sum \dot{m}_{\text{out}} h_{\text{out}}$$

Donde:

Q = calor hacia el sistema

\dot{m} = flujo másico de la corriente

\dot{W} = trabajo hecho por el sistema

Ecuación 9. Modelo ANOVA de dos vías con interacción

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k

μ = media global

α_i = efecto del nivel i del factor A

β_j = efecto del nivel j del factor B

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de interacción A×B en la celda

$(i,j)(i,j)(i,j)\dots$

ε_{ijk} = error aleatorio

Ecuación 10. Número de réplicas por celda

$$\bar{y}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k
 n = número de réplicas por celda

Ecuación 11. Media marginal del factor A (nivel i)

$$\bar{y}_{i\cdot} = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ij}$$

Donde:

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k n = número de réplicas por celda
 b = niveles de factor B

Ecuación 12. Media marginal del factor B (nivel j)

$$\bar{y}_{\cdot jk} = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n y_{ij}$$

Donde:

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k n = número de réplicas por celda
 a = niveles de factor A

Ecuación 13. Media global del experimento

$$\bar{y} = \frac{1}{abn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k n = número de réplicas por celda
 a = niveles de factor A
 b = niveles de factor B

Ecuación 14. Suma de cuadrados del factor A (SSA)

$$SSA = nb \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y})^2$$

Donde:

n = número de réplicas por celda a = niveles de factor A

b = niveles de factor B

Ecuación 15. Suma de cuadrados del factor B (SSB)

$$SSB = na \sum_{j=1}^b (\bar{y}_j - \bar{y})^2$$

Donde:

n = número de réplicas por celda a = niveles de factor A b = niveles de factor B

Ecuación 16. Suma de cuadrados de la interacción A×B (SSAB)

$$SS_{AB} = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..})^2$$

Donde:

n = número de réplicas por celda

a = niveles de factor A

b = niveles de factor B

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k

Ecuación 17. Suma de cuadrados del error (SSE)

$$SSE = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij})^2$$

Donde:

n = número de réplicas por celda

a = niveles de factor A

b = niveles de factor B

y_{ijk} = observación en el nivel i de A, nivel j de B, réplica k

Ecuación 18. Suma total de cuadrados (SST) y su descomposición

$$SST = SSA + SSB + SS_{AB} + SSE$$

Donde:

SSA, SSB, SSAB, SSE, SST: sumas de cuadrados (A, B, interacción, error y total).

Ecuación 19. Grados de libertad por fuente de variación

$$df_A = a - 1 \quad ; \quad df_B = b - 1 \quad ; \quad df_{AB} = (a - 1)(b - 1) \quad ; \quad df_E = ab(n - 1)$$

Ecuación 20. Medias cuadráticas y estadísticos F para A, B y A×B

$$MS_A = \frac{SSA}{gl_A}; \quad F_A = \frac{MS_A}{MS_E}; \quad MS_B = \frac{SSB}{gl_B}; \quad F_B = \frac{MS_B}{MS_E}$$

$$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{gl_{AB}}; \quad F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$$

Ecuación 21. Estadístico de Tukey

$$HSD = q_{\alpha, a, gl_E} \sqrt{\frac{MS_E}{n}}$$

Donde:

q: cuantil de la distribución de rango studentizado

MSE: media cuadrática del error del ANOVA (pooled).

n: réplicas por grupo y_i : media del grupo i .

Ecuación 22. Media aritmética

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Donde:

\bar{x} = media aritmética

x_i = valores individuales que componen el conjunto de mediciones de réplicas

N = conjunto de mediciones

Ecuación 23. Desviación estándar muestral

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

Donde:

S = desviación estándar muestral

x_i = valores individuales que componen el conjunto de mediciones de réplicas \bar{x} = media poblacional

n = conjunto de mediciones

Ecuación 24. Coeficiente de variación

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100$$

Donde:

CV = coeficiente de variación

s = desviación estándar poblacional

\bar{x} = media poblacional

Ecuación 25. Intervalo de confianza

$$IC = \bar{x} \pm \frac{zS}{\sqrt{N}}$$

Donde:

IC = intervalo de confianza

σ = desviación estándar poblacional

\bar{x} = media poblacional

z = nivel de confianza

N = tamaño de la muestra

Ecuación 26. Programación de error (incertidumbre) en sumas y restas

$$s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + s_c^2 + \dots}$$

Donde:

Sy = incertidumbre resultante de la suma o resta

s_a, s_b, s_c = margen de error de cada valor que se está sumando o restando

Ecuación 27. Propagación de error (incertidumbre) para multiplicaciones y divisiones

$$\frac{s_c}{c} = \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2}$$

Donde:

S_y = incertidumbre resultante de la multiplicación o división y = resultado de la multiplicación o división

s_a, s_b, s_c = margen de error de cada valor que se está multiplicando o dividiendo a, b, c = valores que se están multiplicando o dividiendo

13.5. Cálculos de muestra

Cálculo 1. Porcentaje de humedad en el proceso de secado de los posos de café

$$m_i = 8.8 \text{ g}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O, inicial}} = (8.8 \text{ g}) \times 0.6755 = 5.94 \text{ g H}_2\text{O}$$

$$m_{\text{material seco}} = (8.8 - 5.94) \text{ g H}_2\text{O} = 2.85 \text{ g poso}$$

de café seco

Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de humedad durante el proceso de secado por medio de un horno. Se realizó este mismo cálculo para cada uno de los posos de café (V60 y Chemex). Se utilizó la Ecuación 1 y la Ecuación 2 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 2. Análisis granulométrico de poso de café

$$m_t = 32.7 \text{ g}$$

$$m_{\text{tamizada mesh 20}} = 3.8 \text{ g}$$

$$\% \text{ retenido en la malla}_{20} = \frac{3.8 \text{ g}}{32.7 \text{ g}} \times 100\% = 11.62\%$$

$$\% \text{ que atraviesa la malla}_{20} = 100\% - 11.62\% = 88.37\%$$

Se realizó el cálculo anterior para determinar el porcentaje de poso de café en cada malla de la tamizadora, así como el porcentaje de materia que atravesaba cada mesh.

Este cálculo se realizó para todas las corridas de análisis granulométricas, tanto para el poso de café del método V60 como para el Chemex. Se utilizó la Ecuación 3 y Ecuación 4 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 3. Rendimiento de AC en poso de café para agua en 10 minutos de extracción

$$\text{Rendimiento} = \frac{14.75 \text{ mg AC}}{2.7345 \text{ g poso cafe}} = 5.39 \text{ mg/g}$$

Se realizó el cálculo anterior para determinar el rendimiento del ácido clorogénico para cada una de las combinaciones mezcla-tiempo de extracción (agua, mezcla 60:40, 70:30 y 80:20) a 0, 5, 10, 15 y 20 minutos, respectivamente. Se ejemplifica el cálculo correspondiente para la primera corrida de extracción de AC con agua a 0 minutos. Se utilizó la Ecuación 5 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 4. Balance de masa del secador

$$8.8 \text{ g poso humedo} = 3.13 \text{ g poso seco} + 5.66 \text{ g agua evaporada}$$

Se realizó el cálculo anterior para determinar la masa de agua evaporada a través del proceso de secado. Este cálculo se realizó para cada una de las operaciones que participan en el proceso de extracción, haciendo uso de los datos correspondientes de cada etapa. Se utilizó la Ecuación 6 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 5. Balance de energía del secador

$$Q_s = mC_p\Delta T = \left(2.85 \text{ g poso} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) \left(1.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) (45 - 25)^\circ\text{C} = 0.086 \text{ kJ}$$

$$Q_w = mC_p\Delta T = \left(5.66 \text{ g H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) \left(4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) (45 - 25)^\circ\text{C} = 0.474 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{evap}} = \left(5.66 \text{ g H}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) \left(2390 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) = 14.10 \text{ kJ}$$

Se realizó el cálculo anterior para determinar la energía necesaria para el secado del poso de café. Este cálculo se realizó para cada una de las operaciones que participan en el proceso de extracción, haciendo uso de los datos correspondientes de cada etapa. Se utilizó la Ecuación 7 de la sección de ecuaciones.

13.6. Código utilizado para análisis de datos

Se empleó R como herramienta principal para el tratamiento estadístico, particularmente para ANOVA y la comparación múltiple de medias mediante Tukey. A continuación, se muestran todos los análisis efectuados:

```
-----  
-----  
#Universidad del Valle de Guatemala  
#Tesis - Extracción de ácido clorogénico de poso de café  
#Astrid Cermeño 20139  
  
# Paquetes  
install.packages(c("readxl","dplyr","car","emmeans","effectsize")  
) library(readxl); library(dplyr); library(car); library(emmeans);  
library(effectsize) # 1) Leer documentación ruta <- "Cálculos  
Tesis (version 2).xlsx" hoja <- "ExtraccionANOVA" raw <-  
read_excel(path = ruta, sheet = hoja)  
  
# 2) Tomar columnas por POSICIÓN: A=Mezcla, B=Tiempo  
(min), F=ppm datos <- raw %>% transmute(  
  Mezcla = as.factor(.[[1]]),  
  Tiempo = as.numeric(.[[2]]),  
  AC_ppm = as.numeric(.[[6]])  
) %>% filter(!is.na(Mezcla), !is.na(Tiempo),  
!is.na(AC_ppm)) %>% mutate(  

```

```

Mezcla = factor(Mezcla, levels = c("H2O", "60:40", "70:30", "80:20")),
Tiempo = factor(Tiempo, levels = c(0,5,10,15,20), ordered = TRUE)
)

# Revisión rápida
cat("\nConteos por celda Mezcla×Tiempo:\n");
print(table(datos$Mezcla,
datos$Tiempo))

# 3) ANOVA 2 vías fit <- aov(AC_ppm ~ Mezcla * Tiempo, data = datos)
cat("\n=== ANOVA ===\n"); print(summary(fit)) cat("\nη² parcial:\n");
print(eta_squared(fit, partial = TRUE))

# 4) Tukey según corresponda
p <- anova(fit)[["Pr(>F)"]] if (!is.na(p[3]) && p[3] < 0.05) {
cat("\nInteracción significativa. Tukey condicionado:\n")
cat("\nMezclas dentro de cada tiempo:\n"); print(pairs(emmeans(fit, ~ Mezcla |
Tiempo), adjust="tukey"))
cat("\nTiempos dentro de cada mezcla:\n"); print(pairs(emmeans(fit, ~ Tiempo
| Mezcla), adjust="tukey"))
} else { cat("\nSin interacción. Efectos principales:\n")
if (!is.na(p[1]) && p[1] < 0.05) { cat("\nTukey para
Mezcla:\n"); print(pairs(emmeans(fit, ~ Mezcla), adjust="tukey")) }
if (!is.na(p[2]) && p[2] < 0.05) { cat("\nTukey para
Tiempo:\n"); print(pairs(emmeans(fit, ~ Tiempo), adjust="tukey")) }
}

# 5) Medias del modelo con IC95% (para tabla de resultados) emm <-
emmeans(fit, ~ Mezcla * Tiempo) tab_ci <- as.data.frame(confint(emm)) %>%

```

```

dplyr::rename(media = emmean, li = lower.CL, ls = upper.CL) cat("\nMedias
del modelo con IC95%:\n"); print(tab_ci)

-----
-----

## ANOVA granulometría: lee la hoja "GranAnova" y corre mixto Metodo*Malla
## Paquetes (instala si hace falta):
need <- c("readxl","dplyr","lme4","lmerTest") inst <- setdiff(need,
rownames(installed.packages())) if(length(inst)) install.packages(inst,
dependencies = TRUE) invisible(lapply(need, library, character.only = TRUE))

## 1) Lee tu archivo y hoja (ajusta la ruta si no está en el working dir)
ruta <- "Cálculos Tesis (version 2).xlsx" hoja <- "GranAnova" df <-
readxl::read_excel(ruta, sheet = hoja)

## 2) Construye p (0–1) desde "Porcentaje Retenido (%)" o, si falta,
desde "Masa retenida (g)" dat <- df

if ("Porcentaje Retenido (%)" %in% names(dat)) { pvec <-
suppressWarnings(as.numeric(dat[["Porcentaje Retenido (%)"]]))
# si viene en 0–100 -> conviértelo a 0–1 pvec <-
ifelse(is.na(pvec), NA_real_, ifelse(pvec > 1, pvec/100,
pvec)) dat$p <- pvec
} if (!("p" %in% names(dat)) || all(is.na(dat$p))) { stopifnot("Masa retenida
(g)" %in% names(dat)) dat <- dat |> dplyr::group_by(`Método`, `Réplica`)
|> dplyr::mutate(p = as.numeric(`Masa retenida (g)`) /
sum(as.numeric(`Masa retenida (g)`), na.rm = TRUE)) |> dplyr::ungroup()
}

## 3) Factores, orden de malla, transformación eps <- 0.0025 dat <- dat |>
dplyr::mutate( Metodo = factor(`Método`), Replica = factor(`Réplica`),

```

```

Malla = factor(as.character(`Mesh`)), p = pmin(pmax(p, eps), 1 - eps), y
= asin(sqrt(p)) )
## (opcional) mover "Finos" al final si existe lv <- levels(dat$Malla) if
(any(grepl("fino", lv, ignore.case = TRUE))) { fin <- lv[grepl("fino", lv,
ignore.case = TRUE)] otros <- lv[!lv %in% fin] dat$Malla <-
factor(dat$Malla, levels = c(otros, fin)) }
## 4) Chequeo (cada réplica debería sumar ≈1) print(dat |>
dplyr::group_by(Metodo, Replica) |> dplyr::summarise(suma_p = sum(p),
.groups="drop"))

## 5) ANOVA mixto: y ~ Metodo * Malla + (1 | Metodo:Replica) m1 <-
lme4::lmer(y ~ Metodo * Malla + (1 | Metodo:Replica), data = dat)

cat("\n=== ANOVA (efectos fijos) ===\n") print(lmerTest::anova(m1)) # <- F y
p para Metodo, Malla e Interacción

## 6) (extra) Medias para tu cuadro cat("\n=== Medias de p por malla y método
(±DE) ===\n")
print( dat |> dplyr::group_by(Metodo, Malla) |>
dplyr::summarise(media_p = mean(p), sd_p = sd(p), n = dplyr::n(),
.groups="drop") |dplyr::arrange(Malla, Metodo)
-----
--

```

13.7. Análisis de error

Cálculo 6. Media aritmética

$$\%Humedad = \frac{67.90+68.13+68.84+66.77}{4} = 67.13\%$$

Se realizó el cálculo anterior para determinar el promedio de una serie de datos medidos y/o calculados. Se realizó este cálculo para determinar el valor promedio de porcentaje de humedad (inicial y final de la materia prima) para cada uno de los métodos de preparación de café, así como pH, granulometría, extracción de ácido clorogénico, tiempos de retención. Se muestra el cálculo correspondiente a la media del porcentaje de humedad inicial en muestra de posos de café V60. Se utilizó la Ecuación 22 de la sección de ecuaciones.

Cálculo 7. Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{(67.90\% - 67.13\%)^2 + (68.13\% - 67.13\%)^2 + (68.84\% - 67.13\%)^2 + (66.77\% - 67.13\%)^2}{5 - 1}}$$

$$\sigma = 1.24\%$$

Se realizó el cálculo anterior para determinar la desviación estándar de una serie de datos medidos y/o calculados. Se realizó este cálculo para determinar la desviación estándar de porcentaje de humedad (inicial y final de la materia prima) para cada uno de los métodos de preparación de café, así como pH, granulometría, extracción de ácido clorogénico, tiempos de retención. Se muestra el cálculo correspondiente a la desviación estándar del porcentaje de humedad inicial en muestra de posos de café V60. Se utilizó la Ecuación 23 de la sección de ecuaciones.

XIV. ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Sistema de extracción con procesador ultrasónico



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 2. Sonotrodo utilizado de MS7 Micro tip 7



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 3. Mezclas hidroalcohólicas: 60:40, 70:30 y 80:20



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

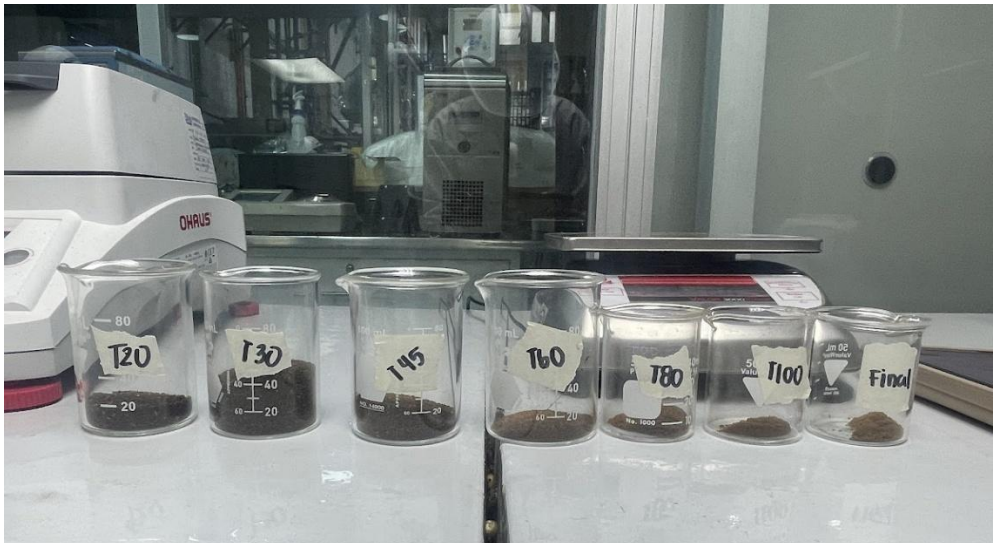
Ilustración 4. Muestra del poso de café V60



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 5. Pesajes de muestras tamizadas del poso de café del método de filtrado V60



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 6. Solución madre y soluciones patrón de ácido clorogénico para la curva de calibración



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

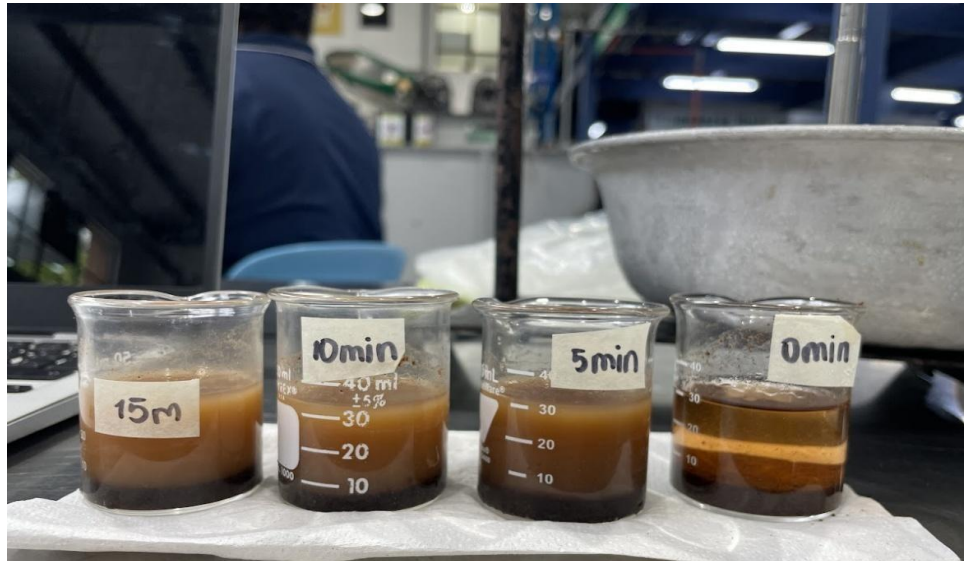
Ilustración 7. Muestras de posos de café antes de ser sometidos al proceso de extracción



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 8. Muestras posterior a la extracción por ultrasonido para la mezcla hidroalcohólica 60:40, en los tiempos 0,5,10 y 15 minutos



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 9. Extractos posteriores a la operación de centrifugado



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Ilustración 10. Extracto centrifugado



(Fuente: propia)

Ilustración obtenida en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Figura 9. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 1ra corrida

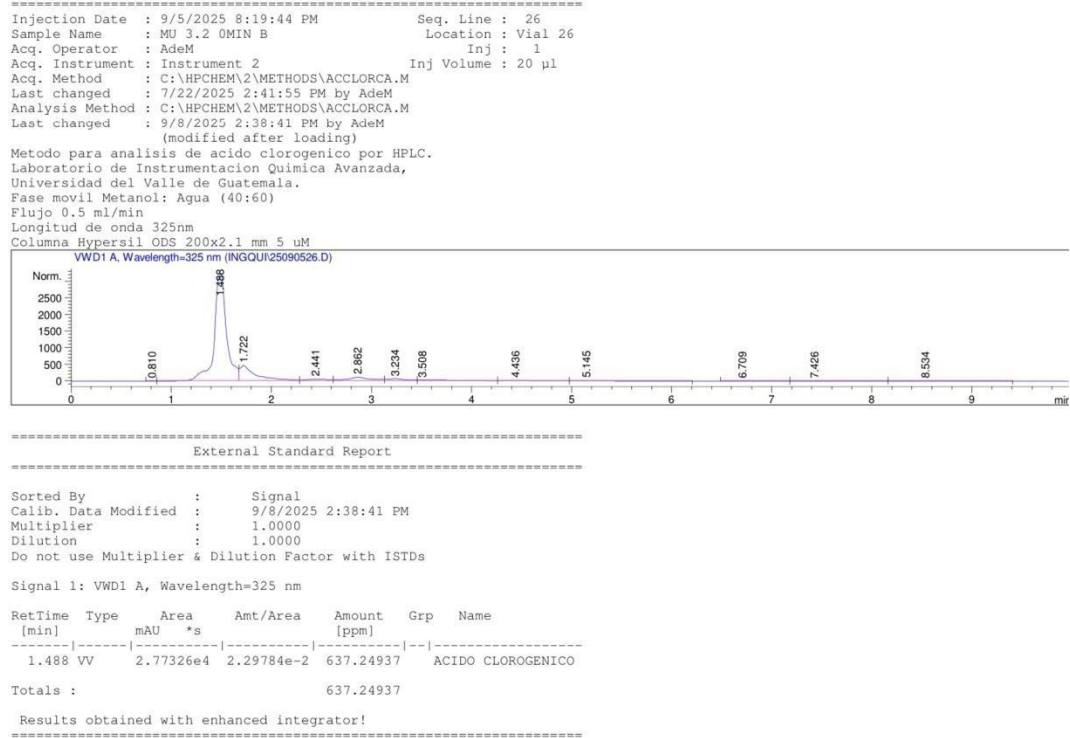


Figura 10. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 2da corrida

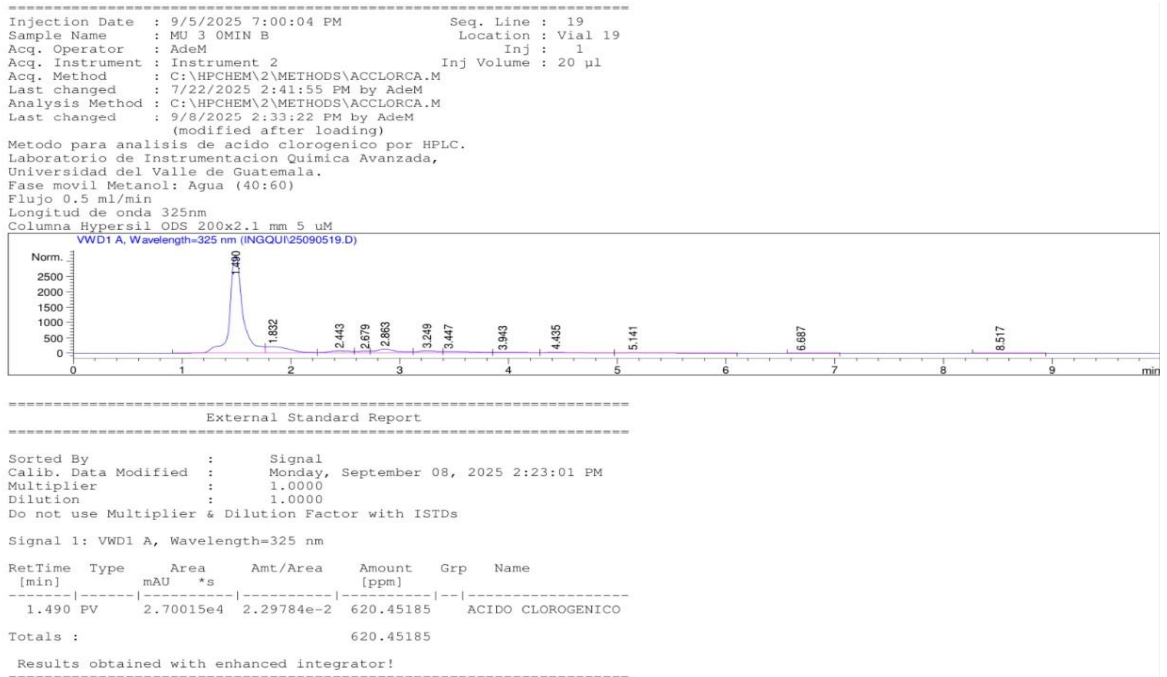


Figura 11. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1da corrida

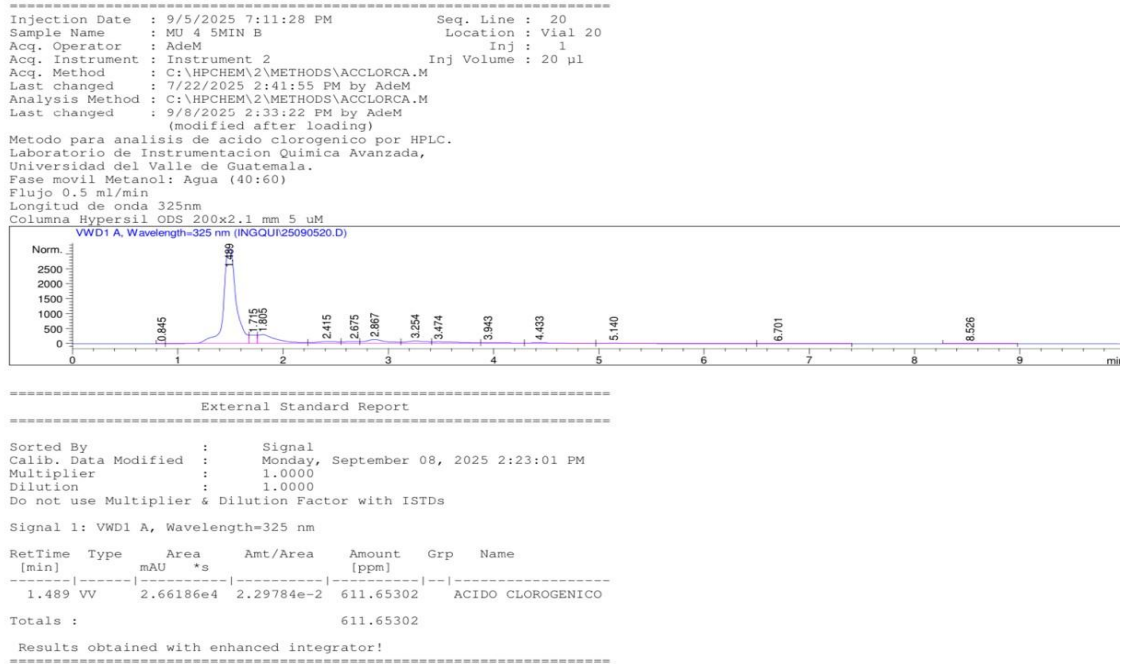


Figura 12. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida

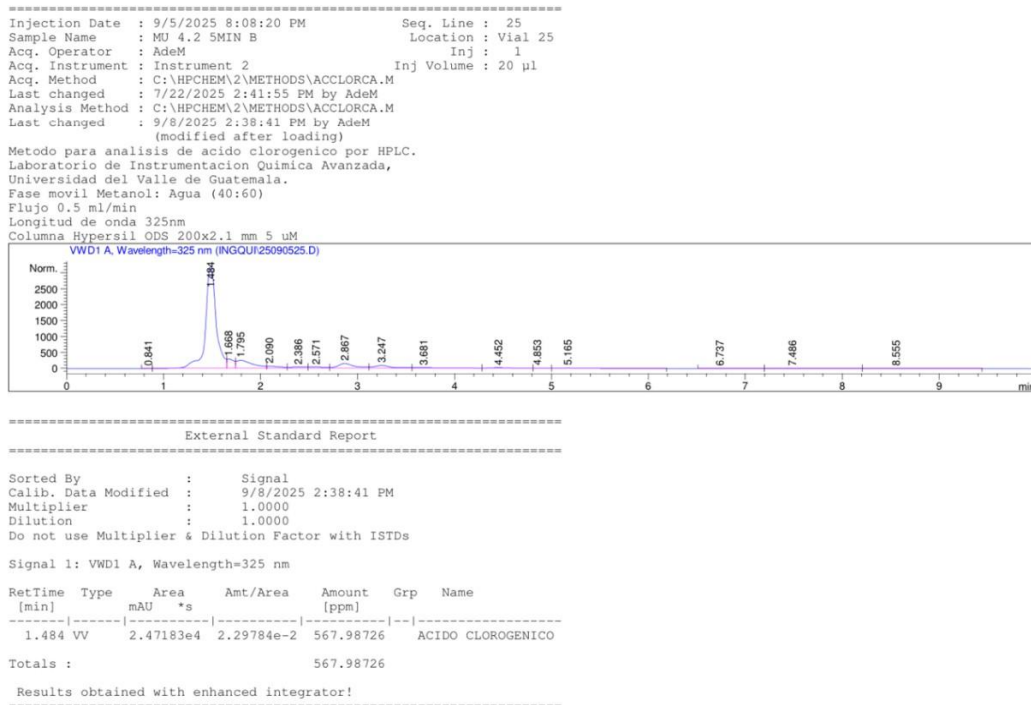


Figura 13. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida

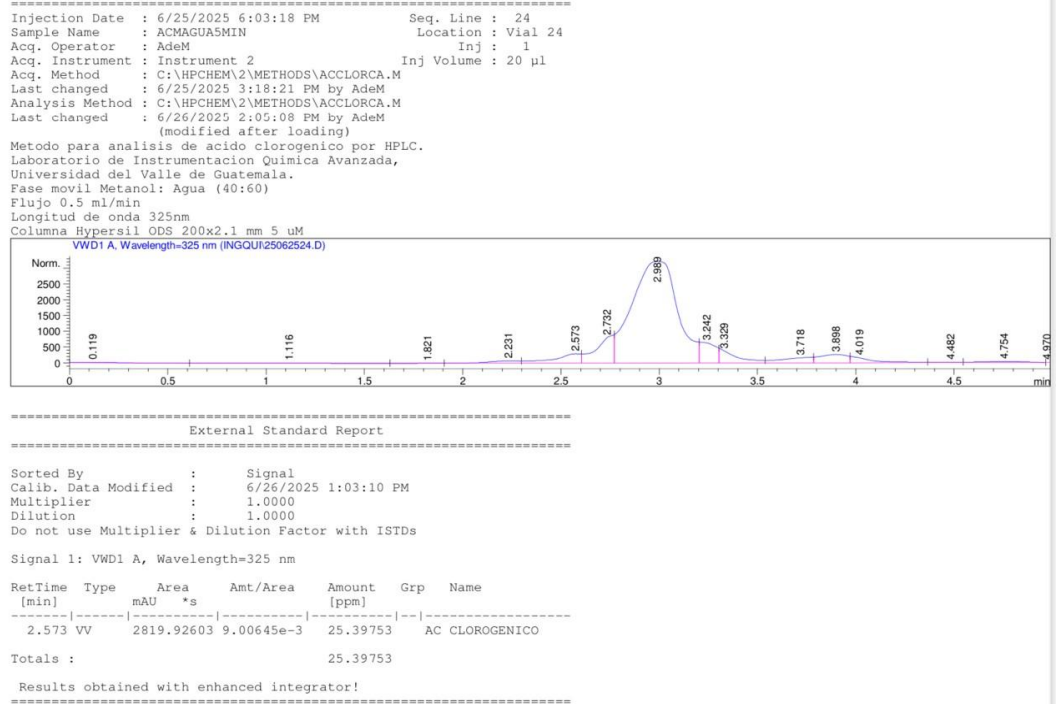


Figura 14. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida

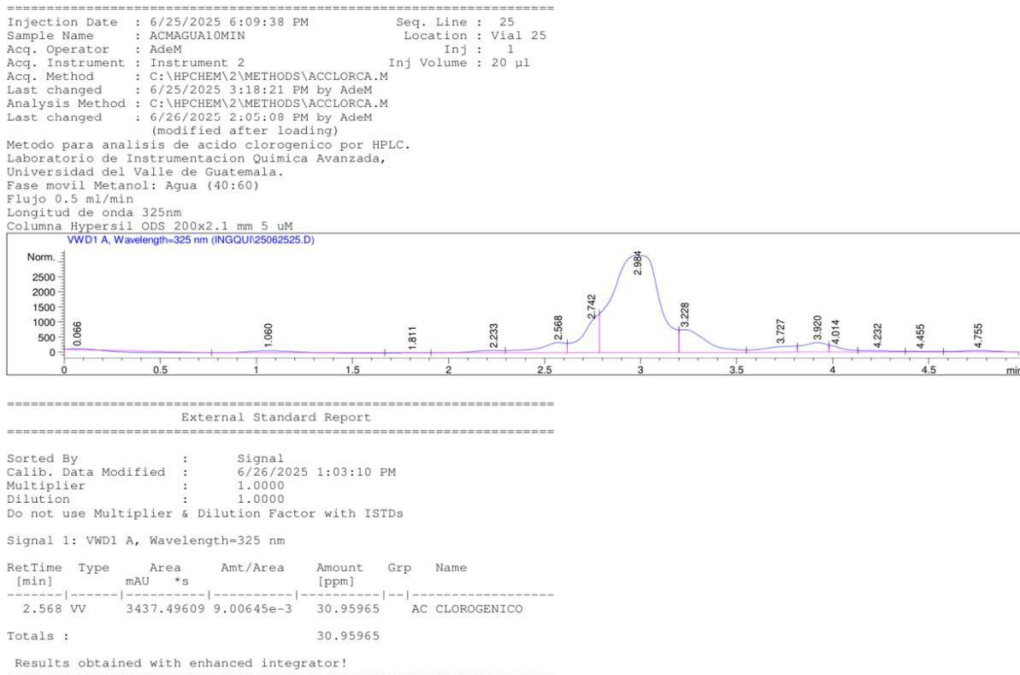


Figura 15. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida

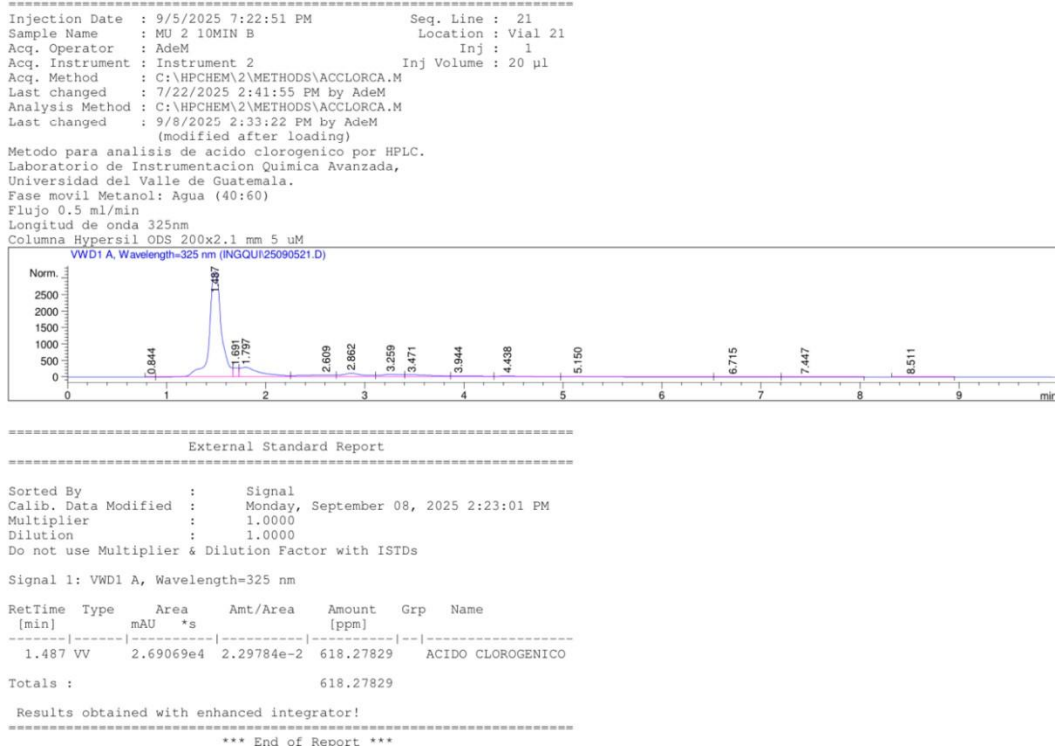


Figura 16. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 3ra corrida

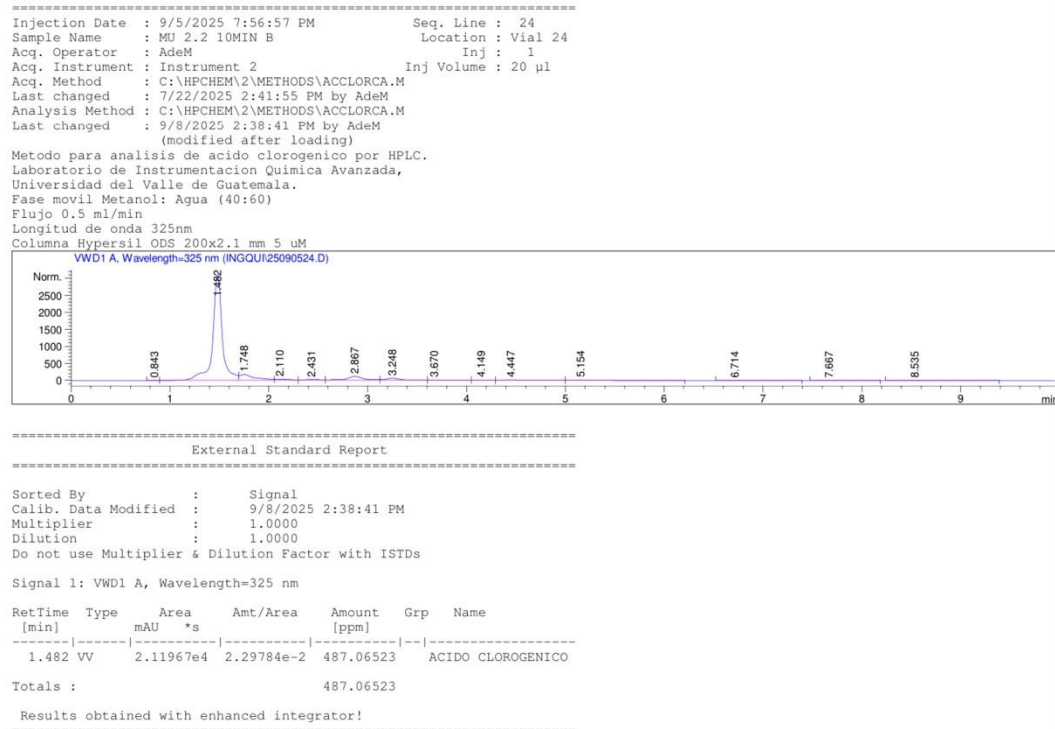


Figura 17. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida

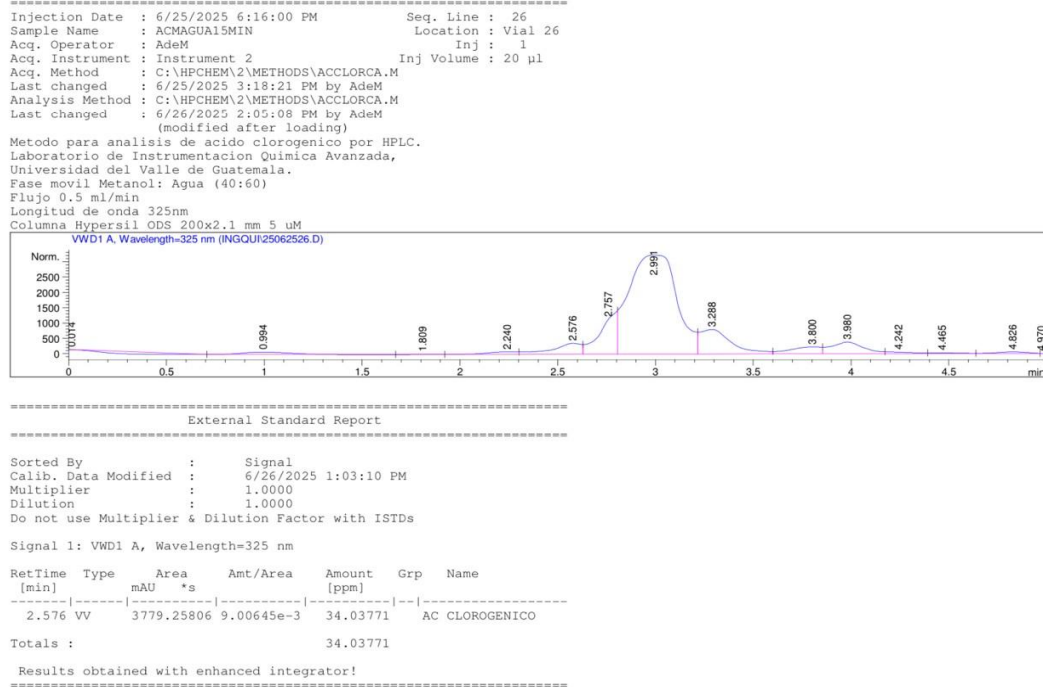


Figura 18. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida

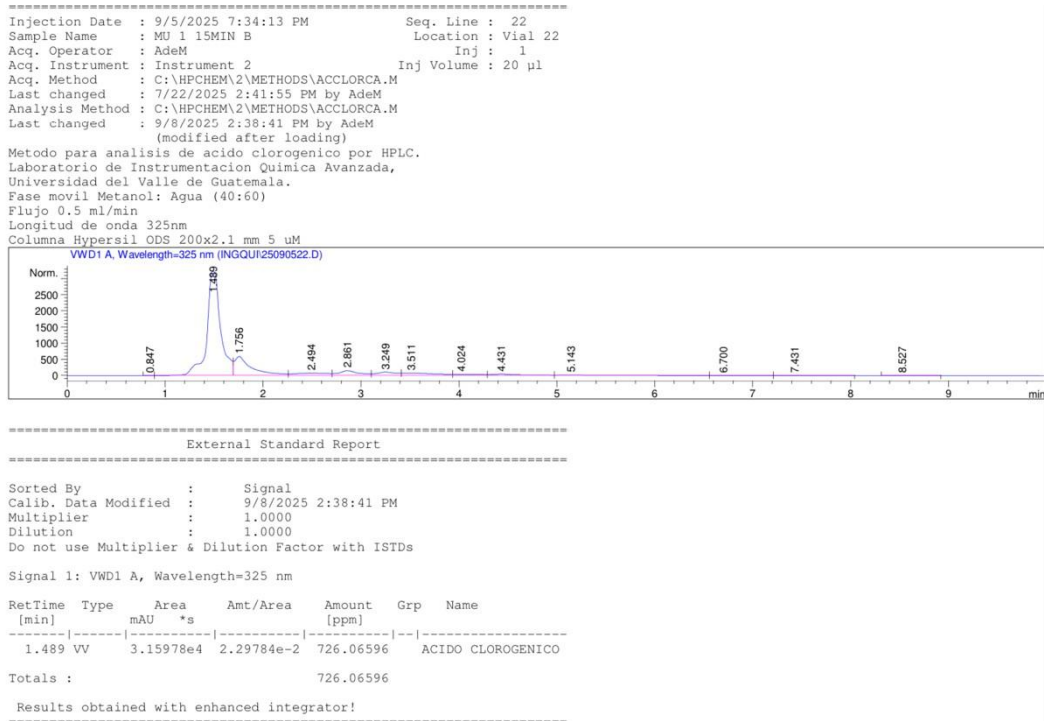


Figura 19. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 3ra corrida

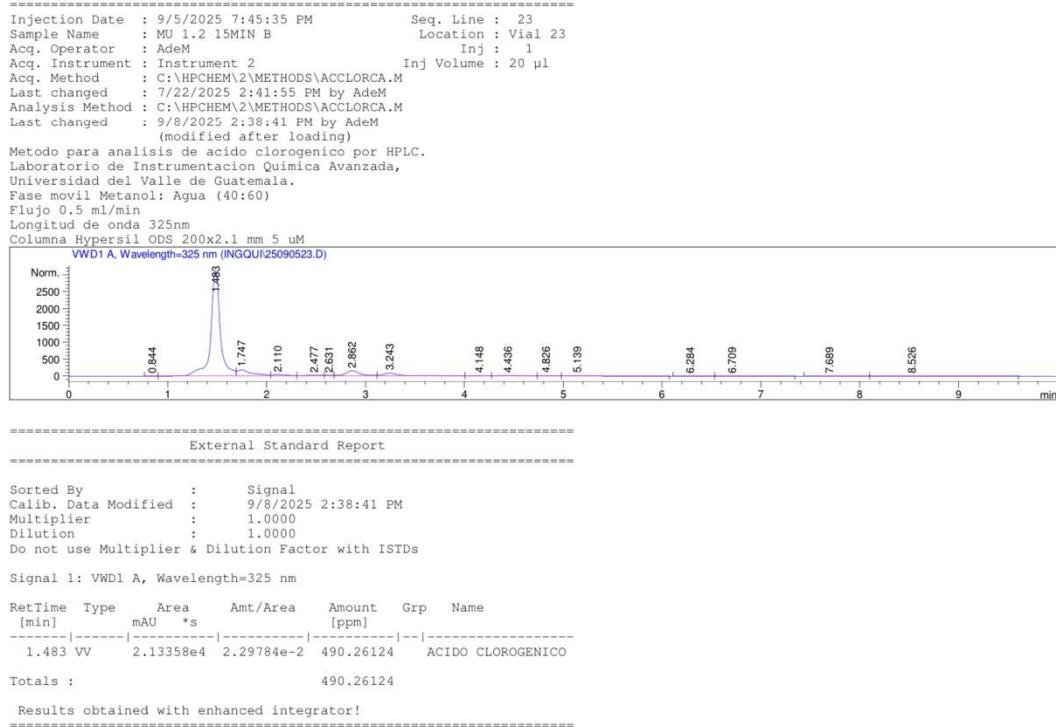


Figura 20. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida

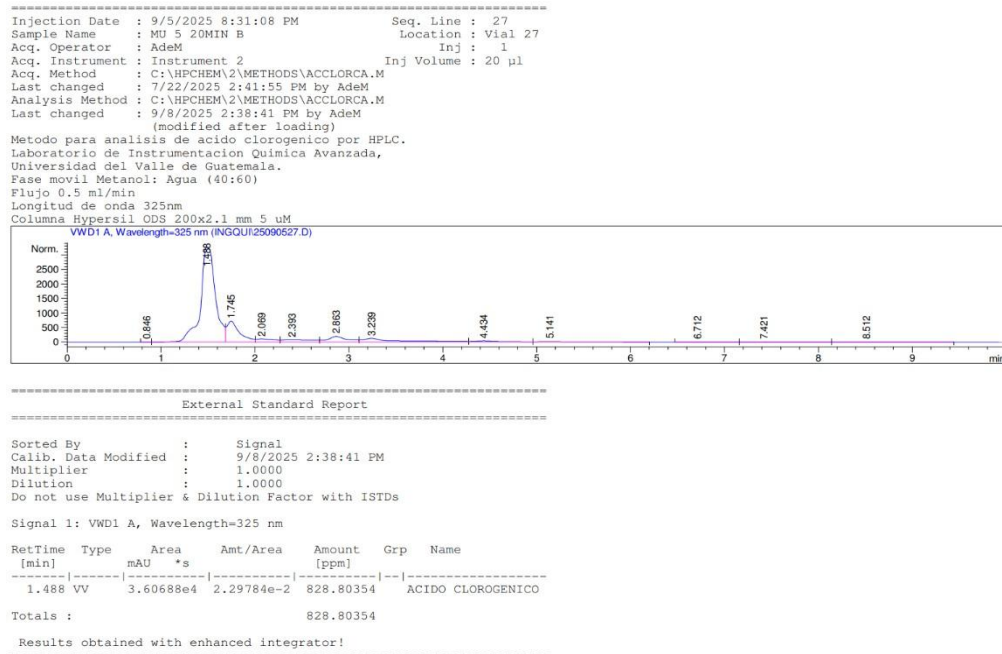


Figura 21. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida

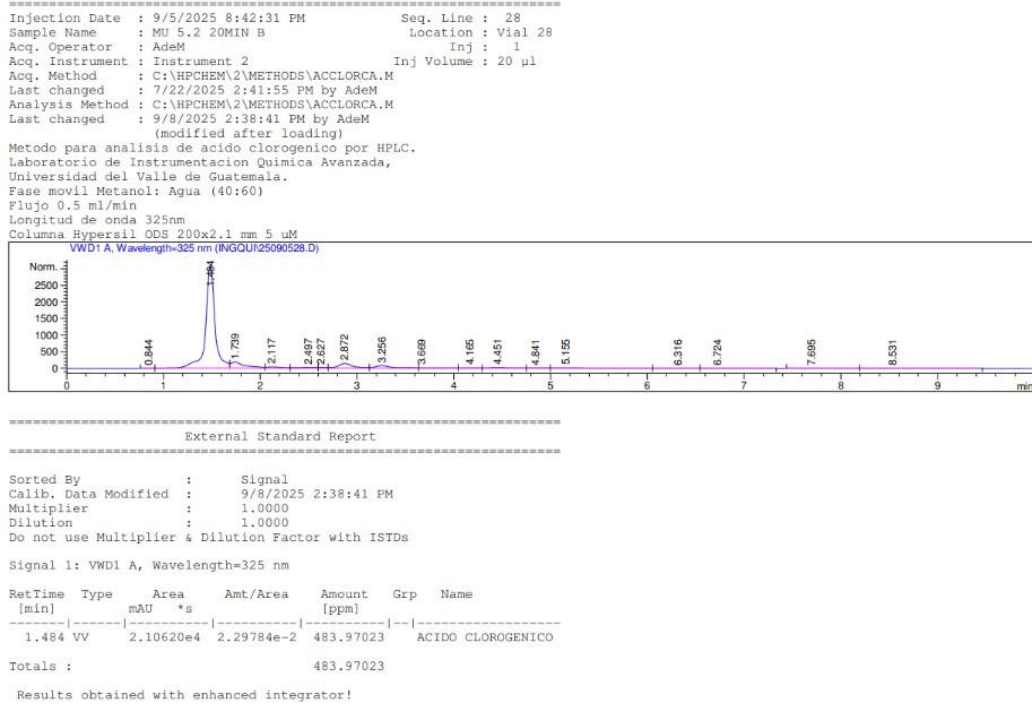


Figura 22. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando agua como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 3ra corrida

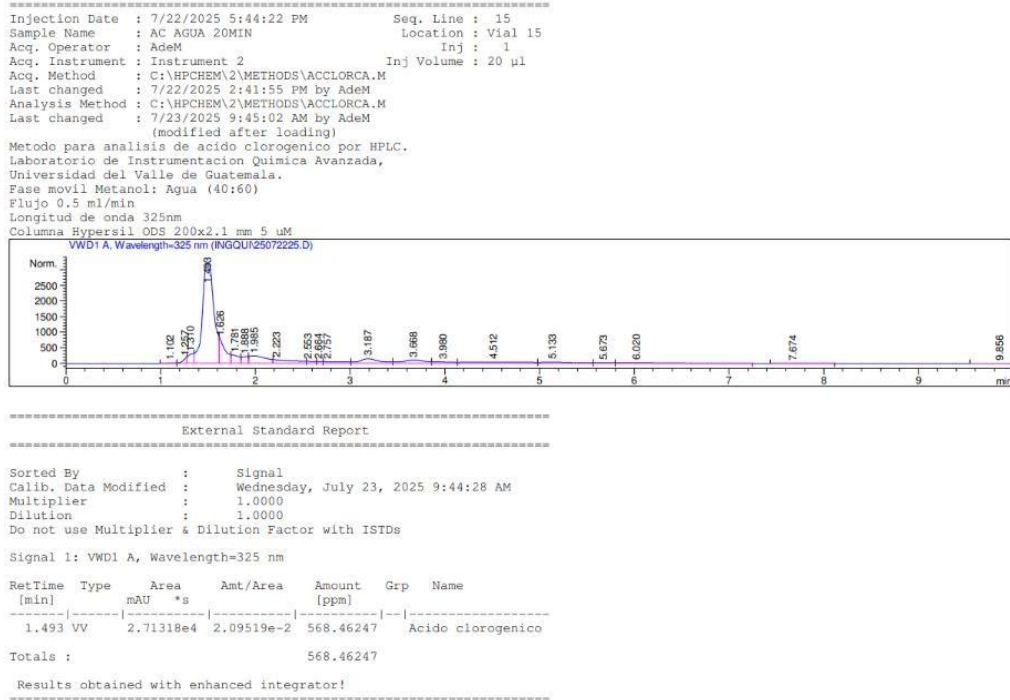


Figura 22. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos 1ra corrida

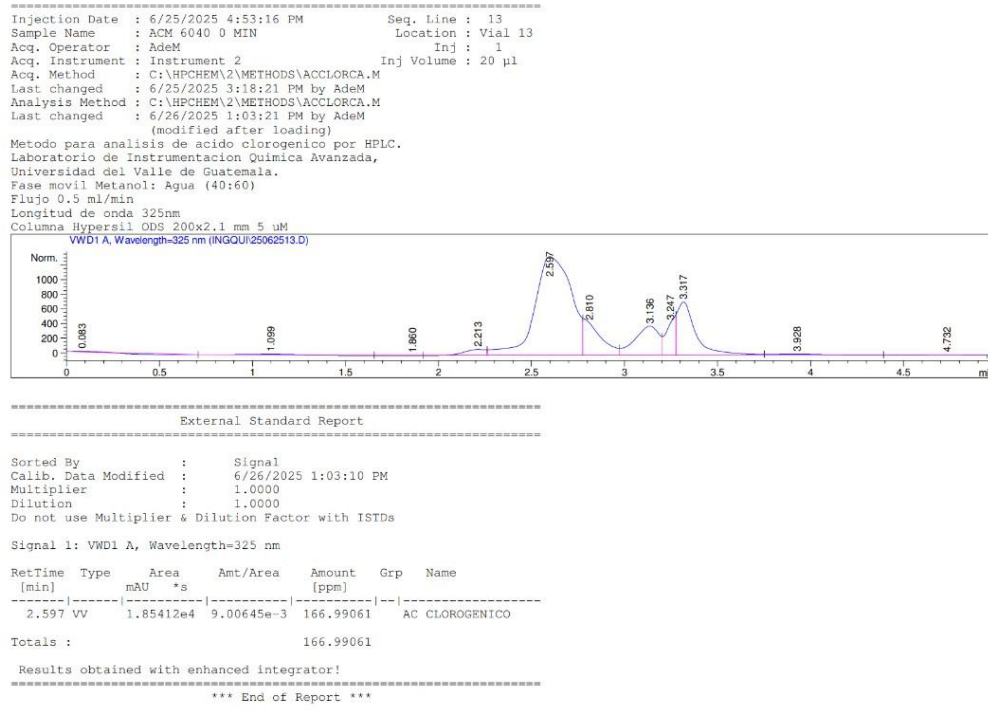


Figura 23. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 2da corrida

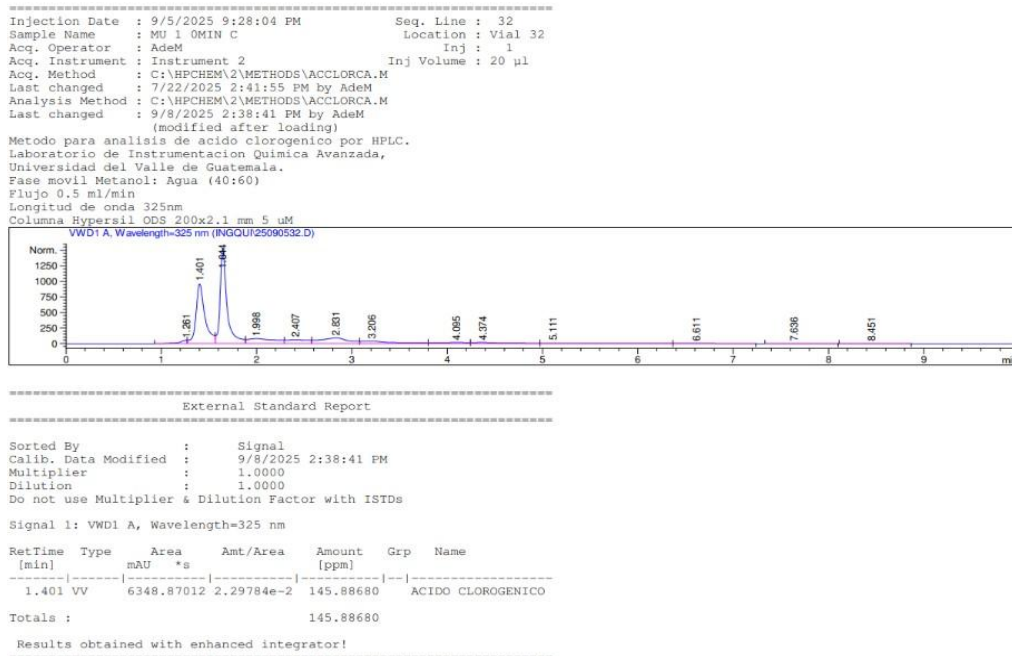
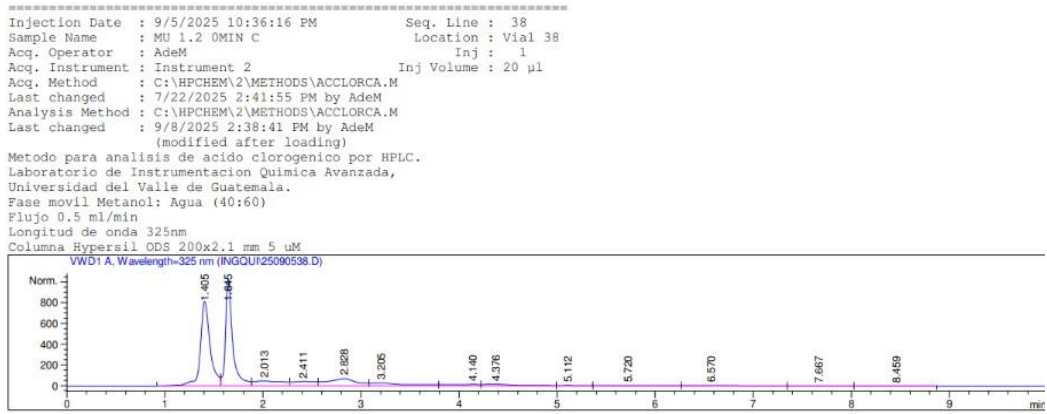


Figura 24. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 3ra corrida



```

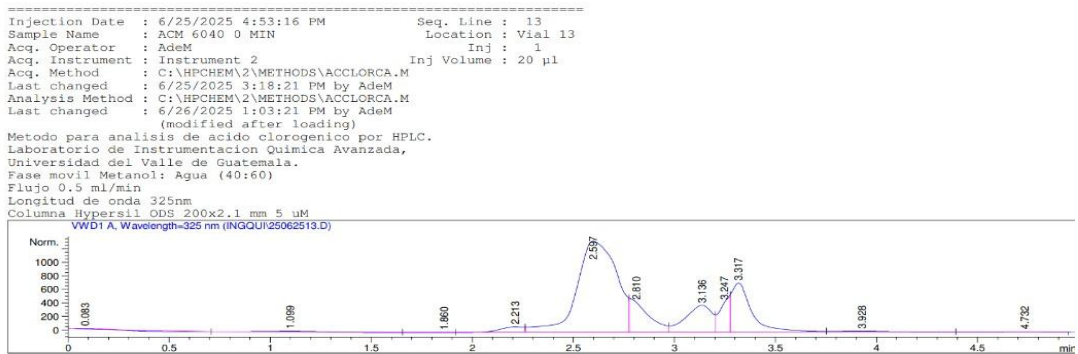
=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 9/8/2025 2:38:41 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[min] [mAU] [s] [ppm]
-----|-----|-----|-----|-----|-----
1.405 PV 5713.91797 2.29784e-2 131.29663 ACIDO CLOROGENICO

Totals : 131.29663
    
```

Figura 25. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1ra corrida



```

=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 6/26/2025 1:03:10 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[min] [mAU] [s] [ppm]
-----|-----|-----|-----|-----|-----
2.597 VV 1.85412e4 9.00645e-3 166.99061 AC CLOROGENICO

Totals : 166.99061

Results obtained with enhanced integrator!
*** End of Report ***
    
```

Figura 26. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida

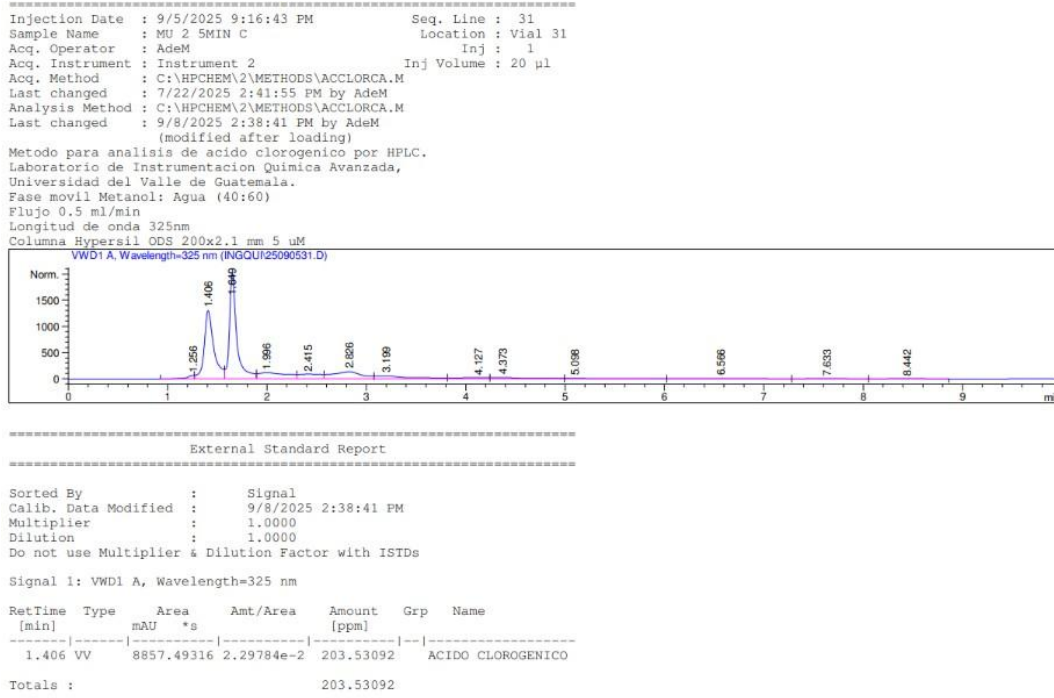


Figura 27. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida

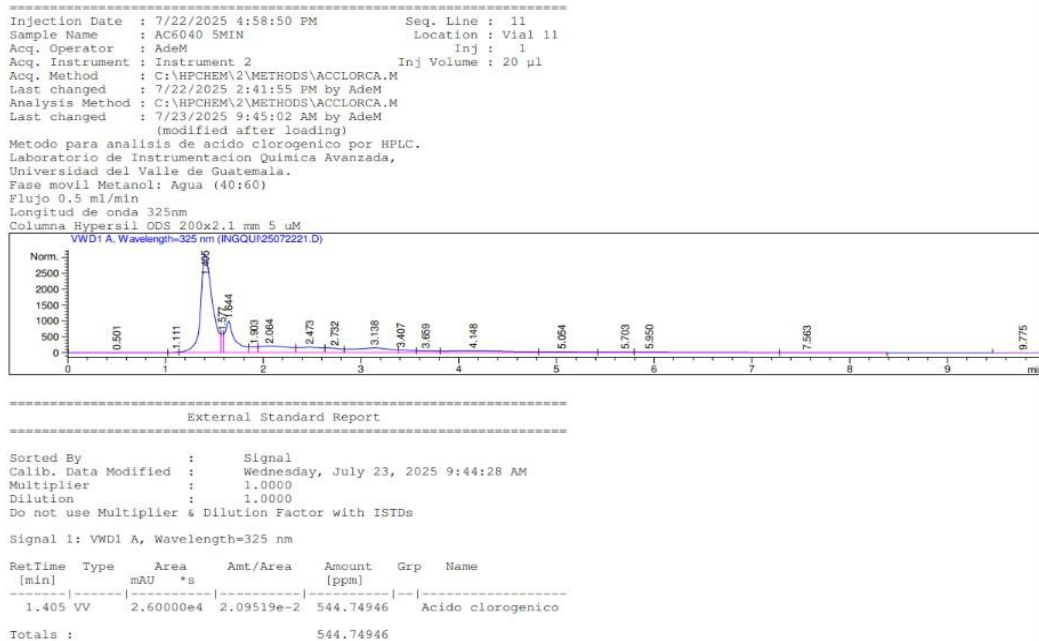
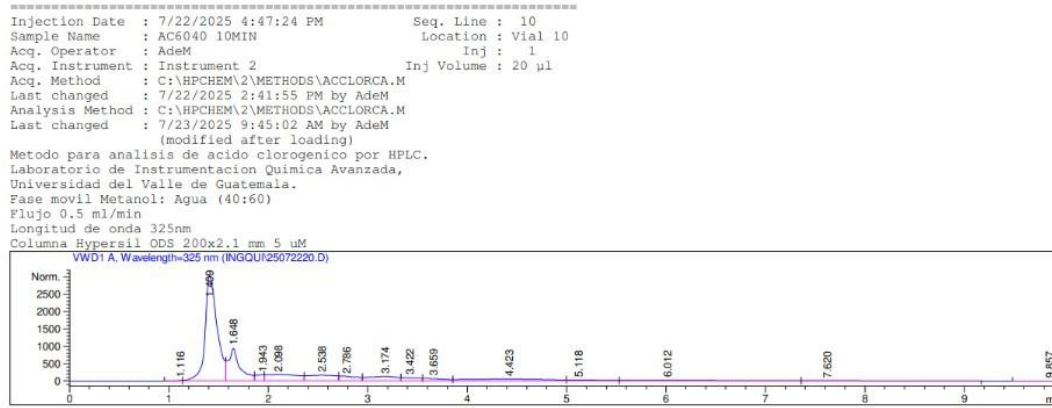


Figura 28. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida



```

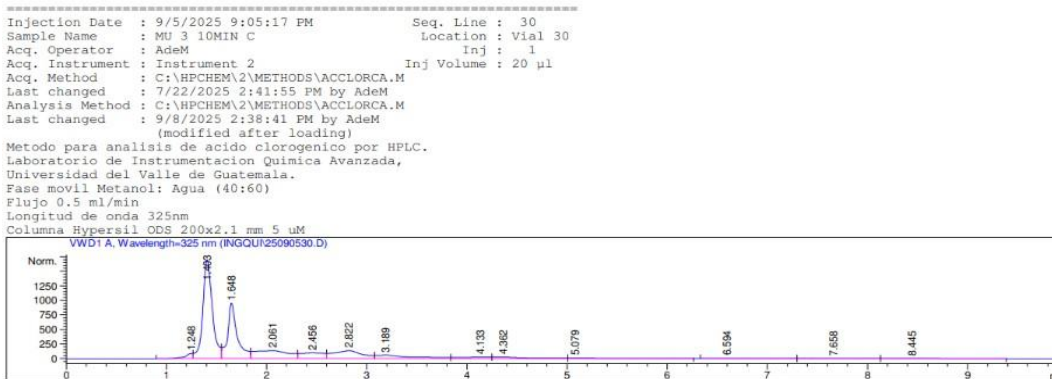
=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : Wednesday, July 23, 2025 9:44:28 AM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[min] [mAU *s] [ppm]
-----|-----|-----|-----|-----|-----
1.409 VV 2.56027e4 2.09519e-2 536.42542 Acido clorogenico
Totals : 536.42542
=====

```

Figura 29. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida



```

=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 9/8/2025 2:38:41 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[min] [mAU *s] [ppm]
-----|-----|-----|-----|-----|-----
1.403 VV 1.12820e4 2.29784e-2 259.24117 ACIDO CLOGROGENICO
Totals : 259.24117
=====

```

Figura 30. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 3ra corrida

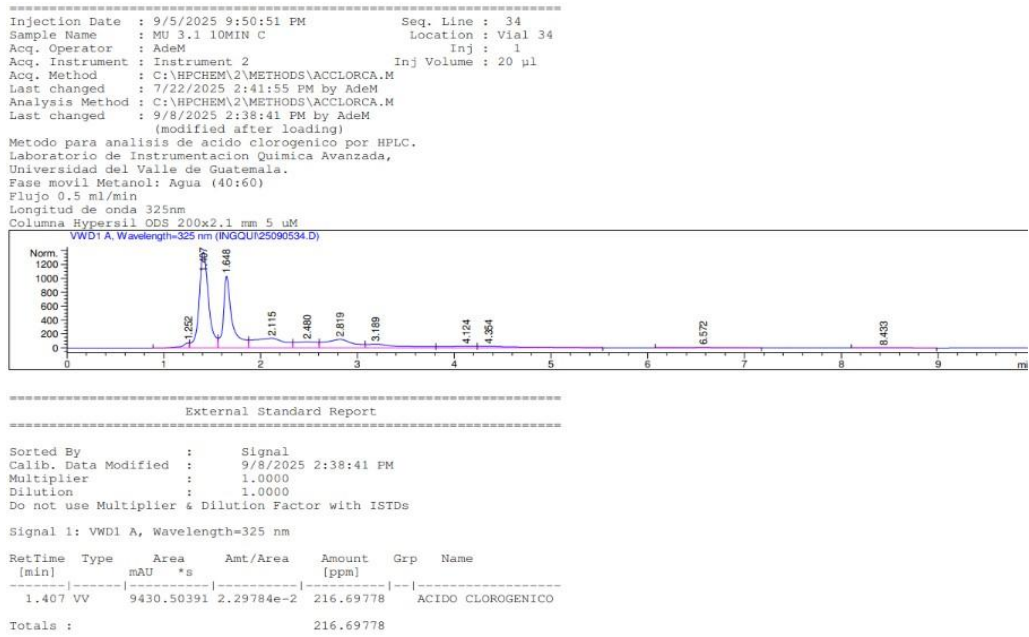


Figura 31. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida

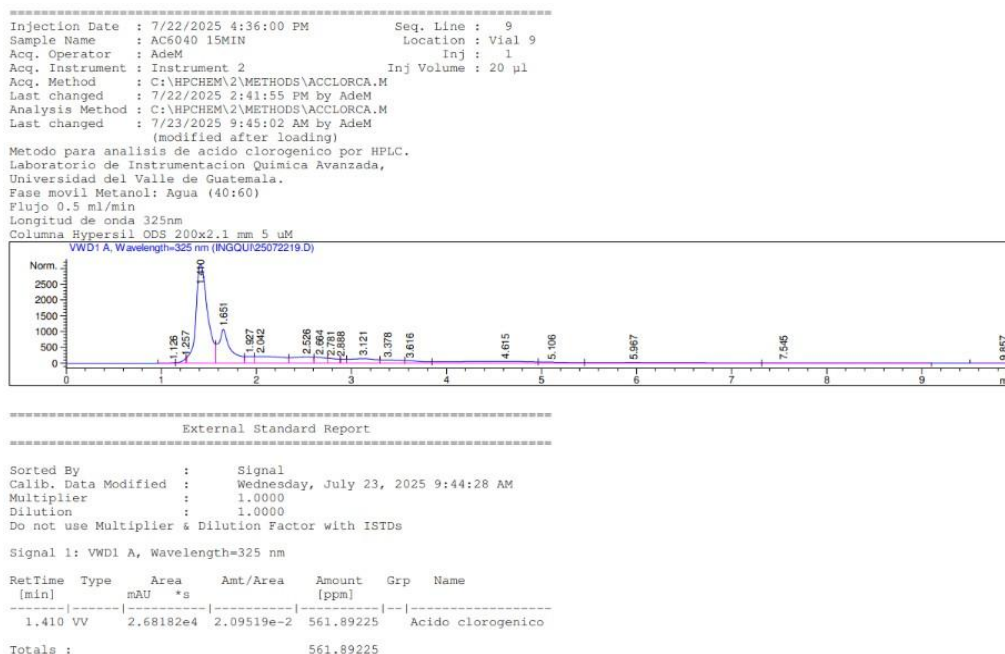


Figura 32. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida

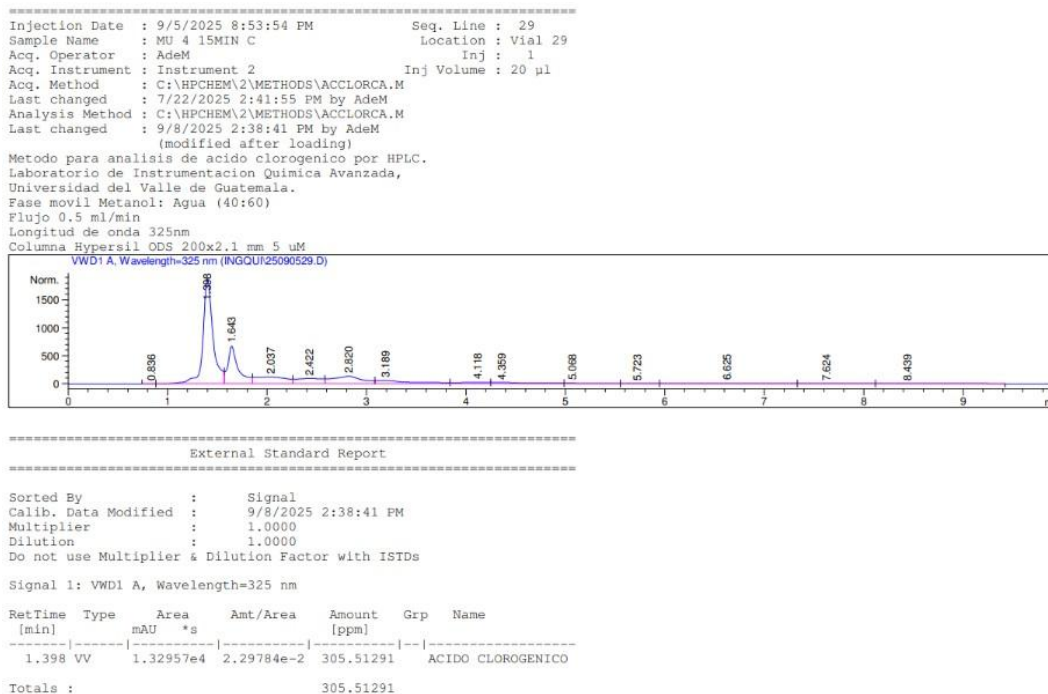


Figura 33. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 3ra corrida

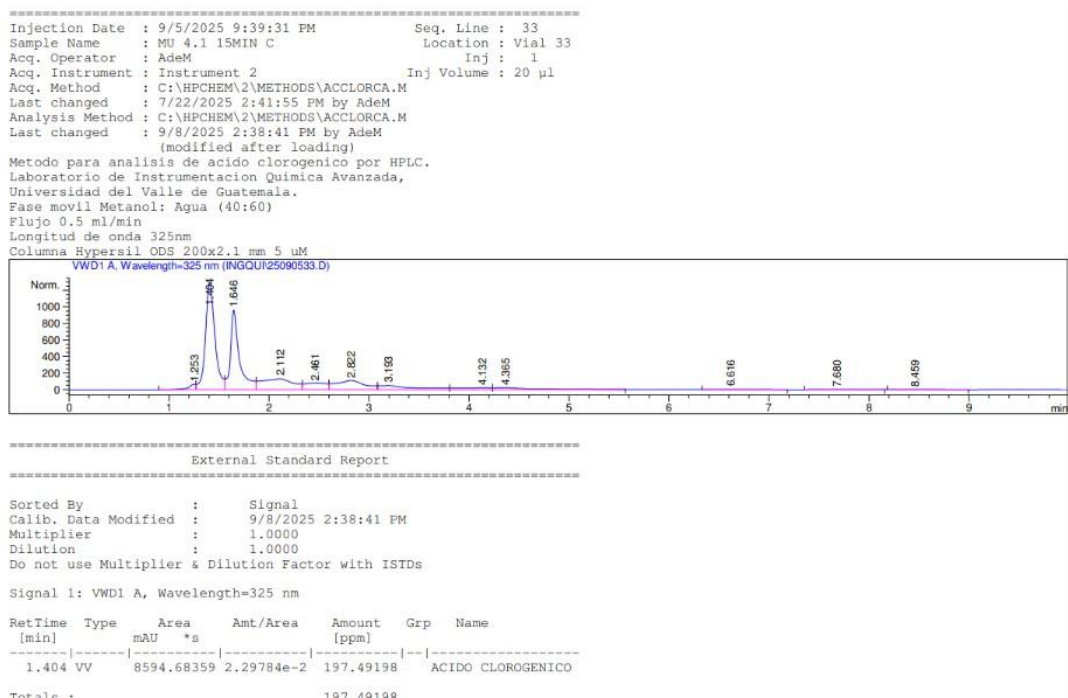


Figura 34. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida

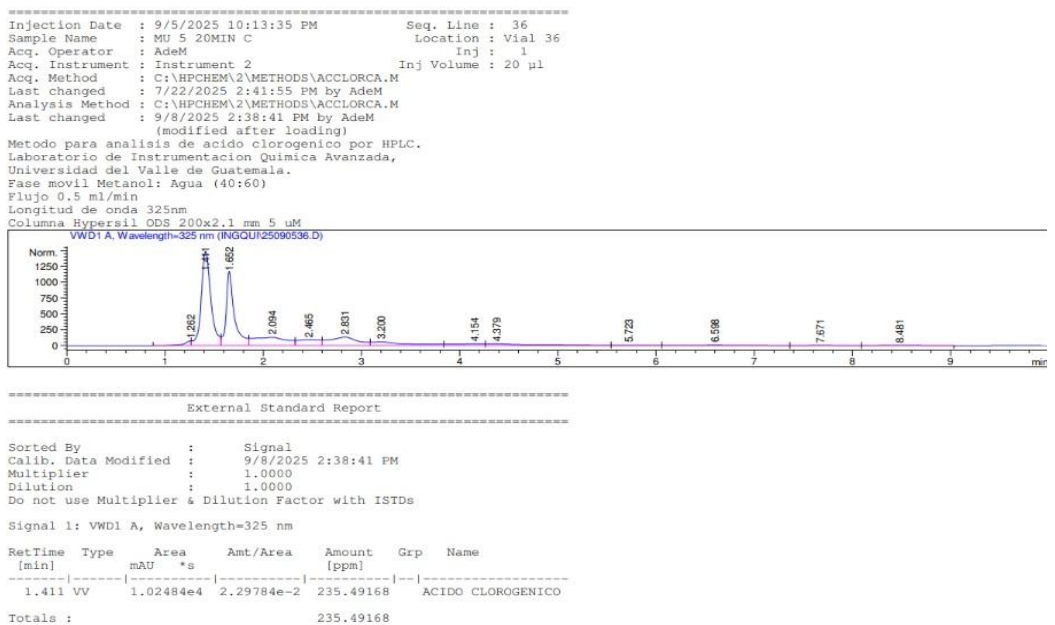


Figura 35. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida

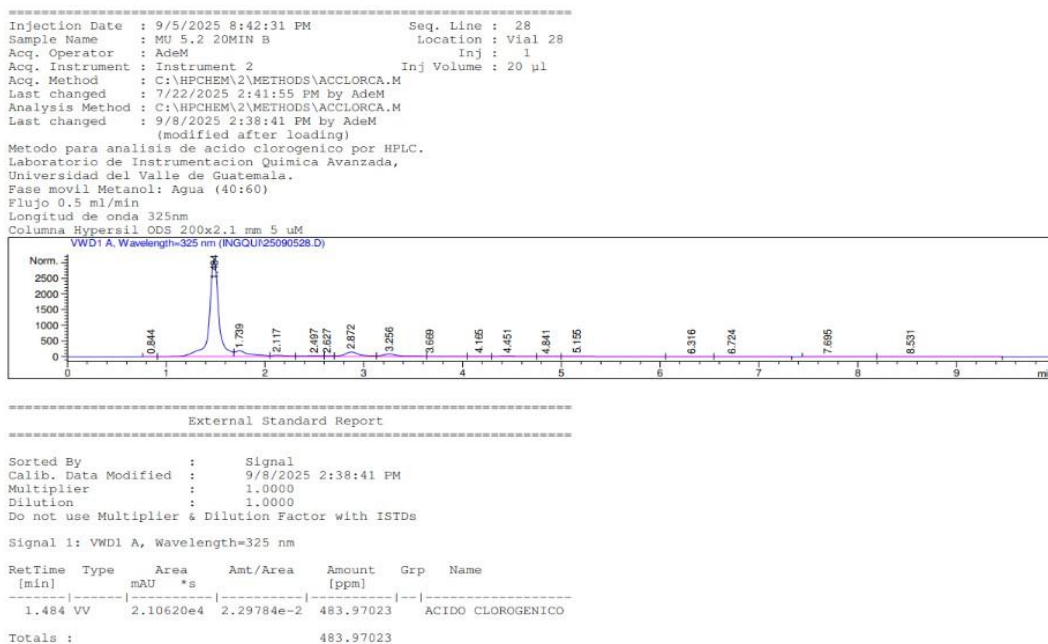


Figura 36. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 60:40 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 3ra corrida

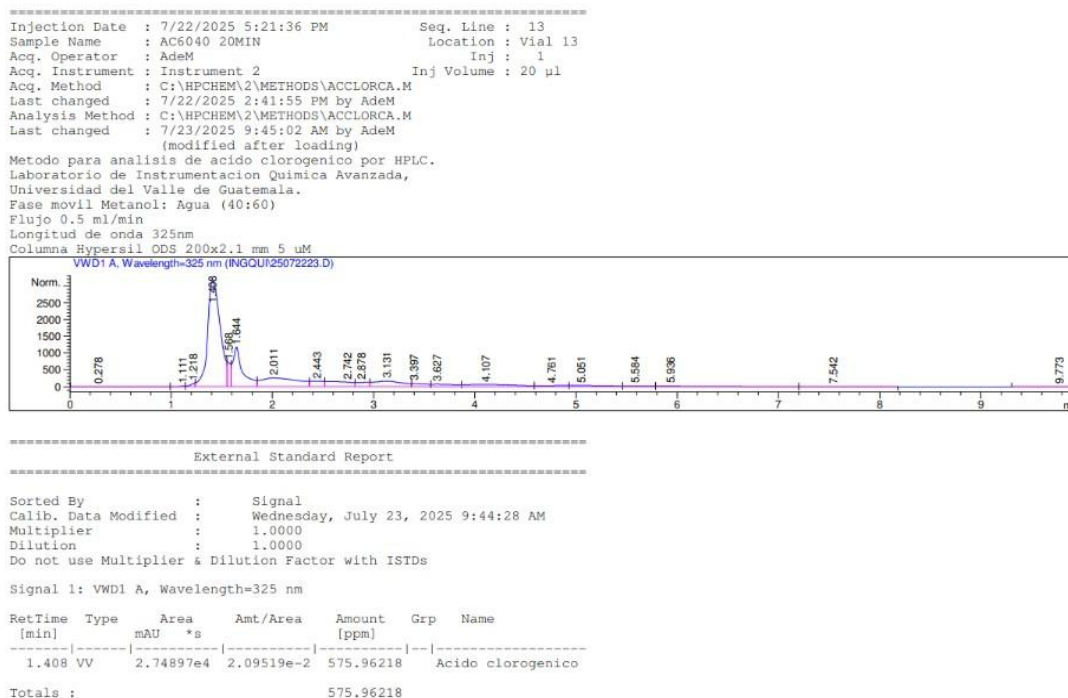
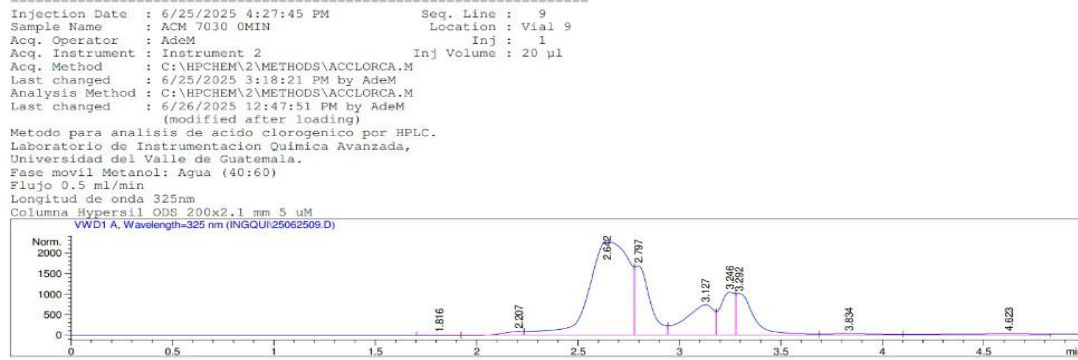


Figura 37. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 1ra corrida



```

=====
External Standard Report
=====
Sorted By      :      Signal
Calib. Data Modified : Thursday, June 26, 2025 12:47:03 PM
Multiplier    :      1.0000
Dilution      :      1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime  Type  Area  Amt/Area  Amount  Grp  Name
[ min ]  [ mAU ]  [ s ]  [      ]  [ ppm ]  [   ]  [   ]
-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----
2.642  VV    3.11956e4  9.00645e-3  280.96185  AC  CLOROGENICO

Totals :                               280.96185

Results obtained with enhanced integrator!
=====
*** End of Report ***
  
```

Figura 38. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1ra corrida

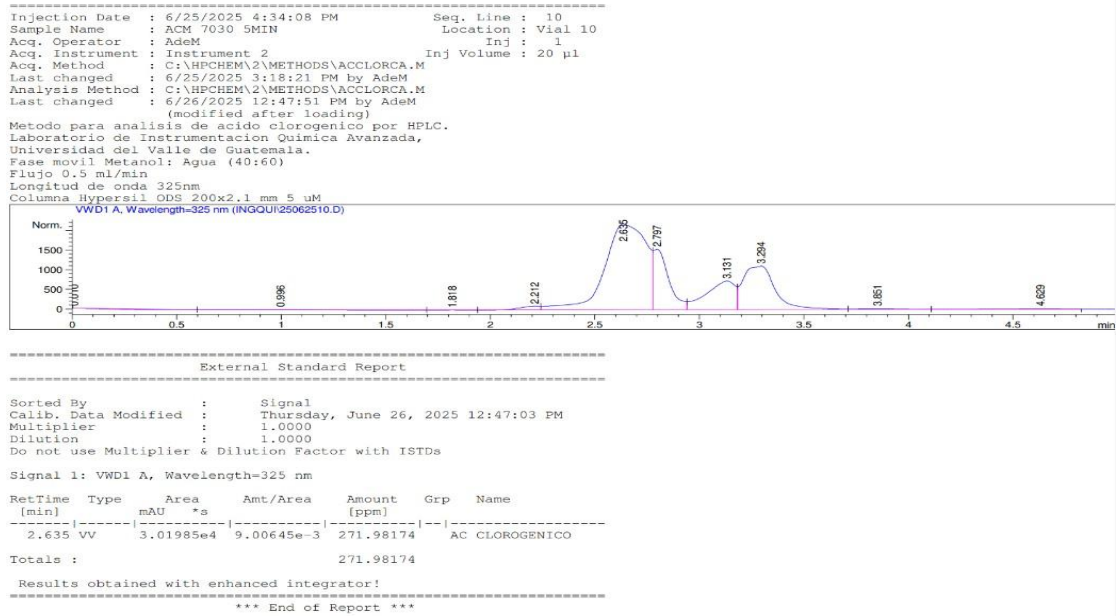


Figura 39. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida

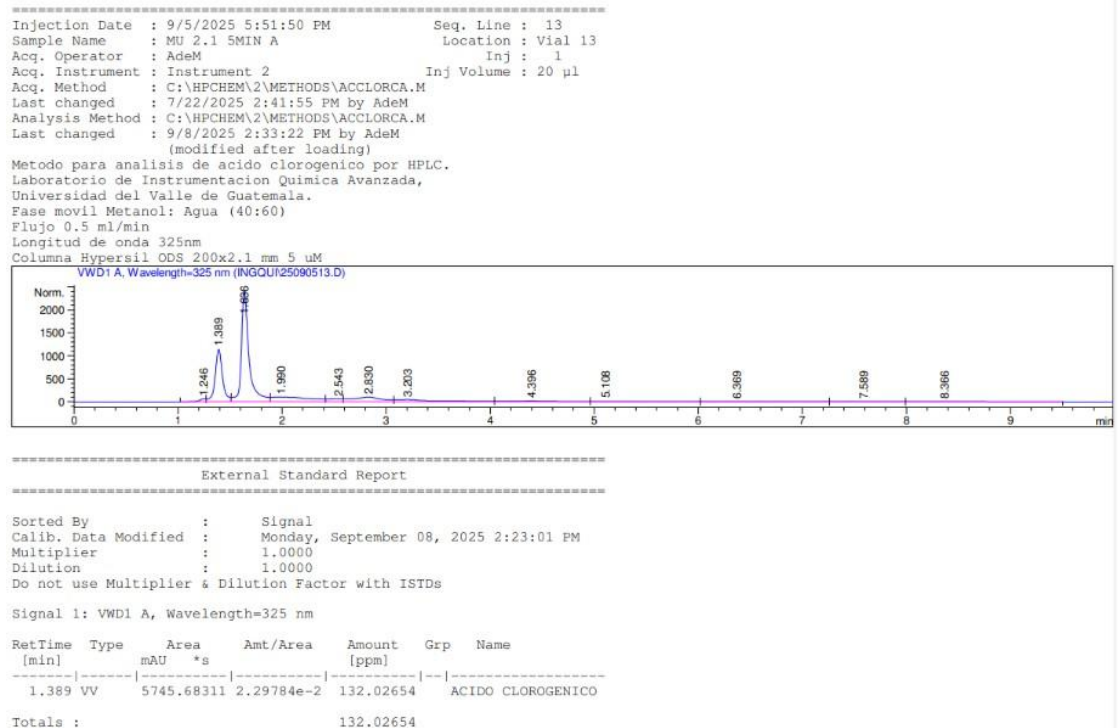


Figura 40. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida

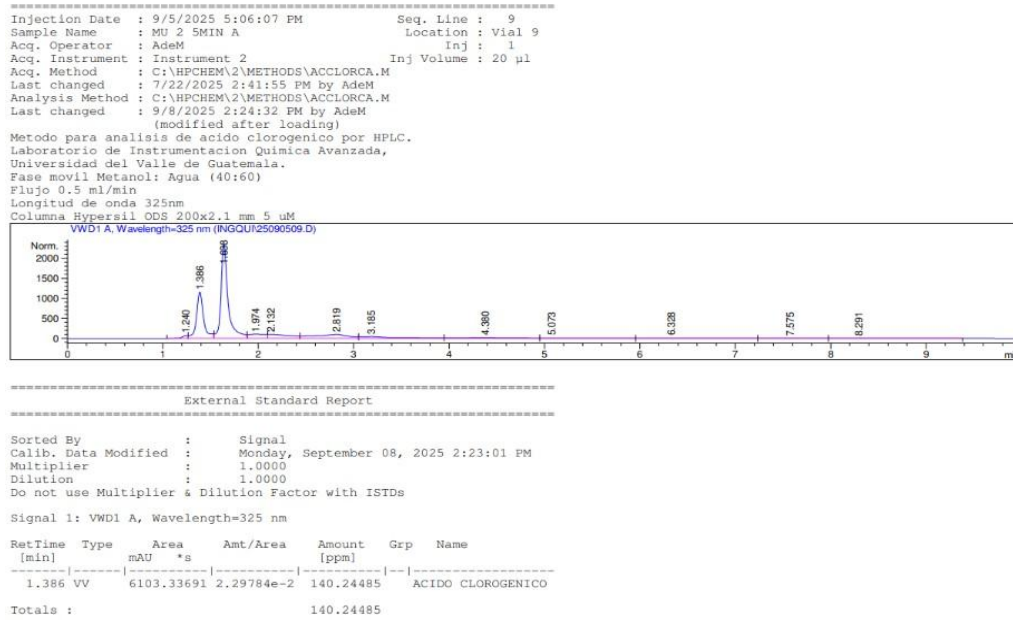


Figura 41. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida

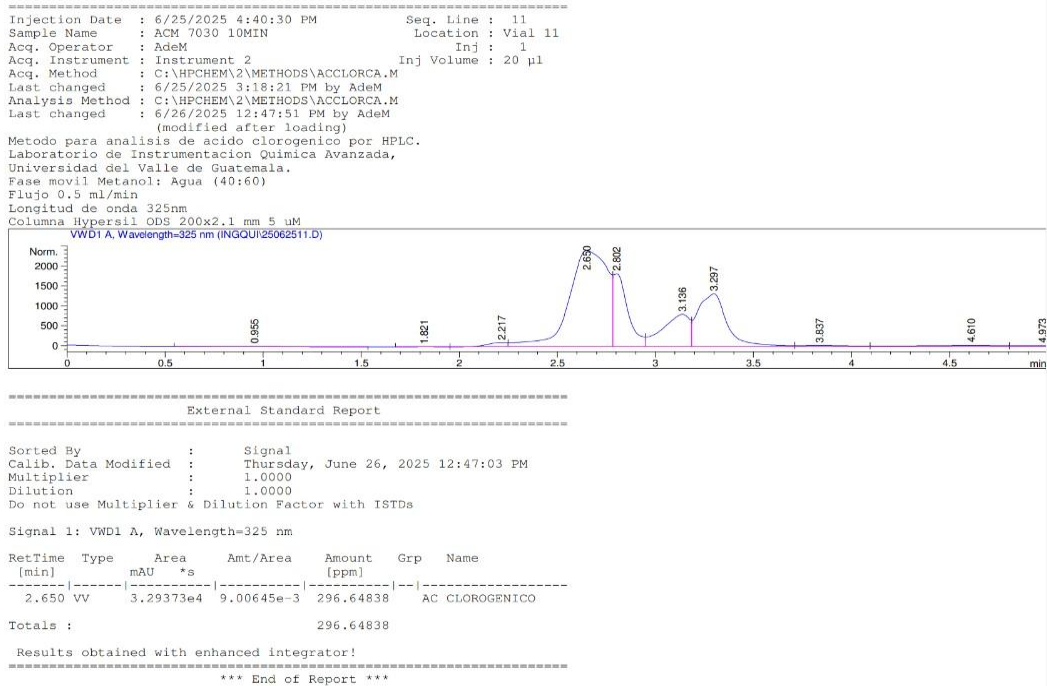


Figura 42. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida

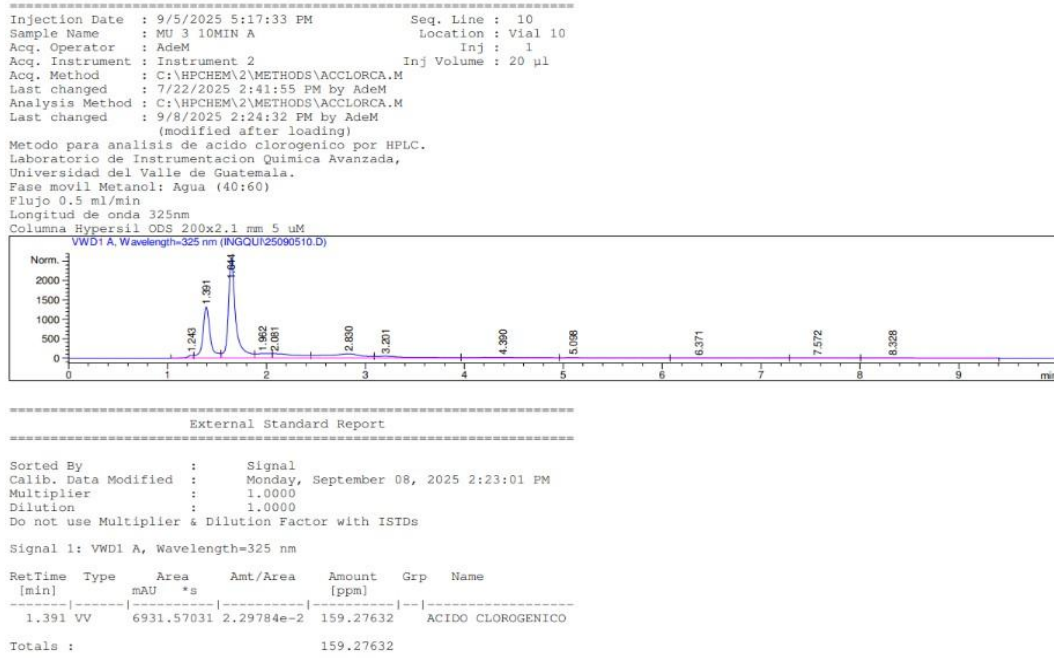


Figura 43. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 3ra corrida

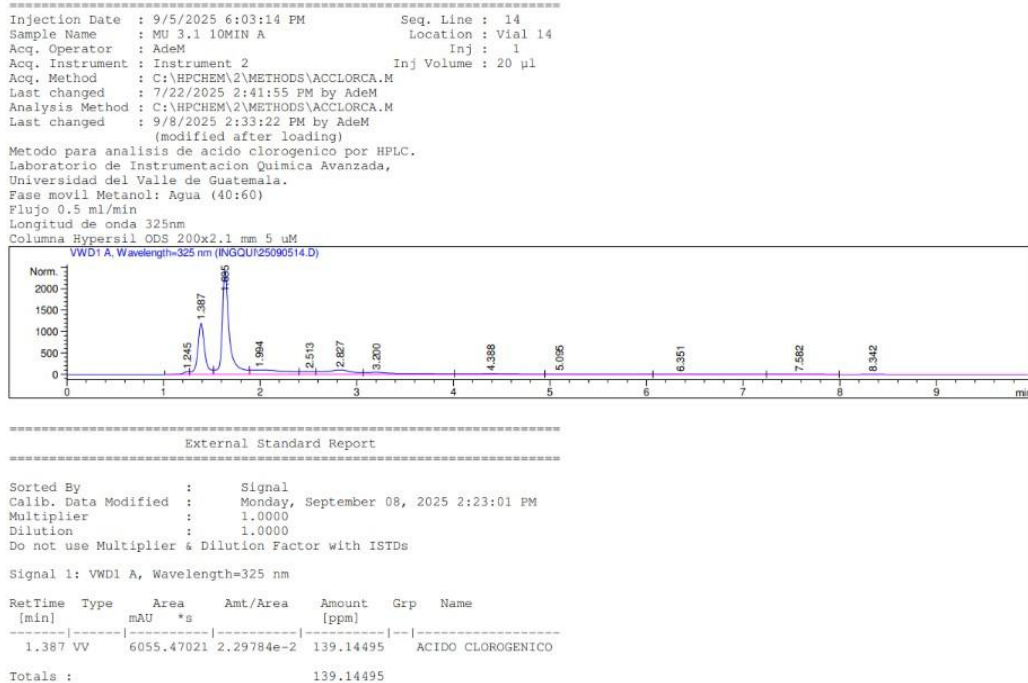
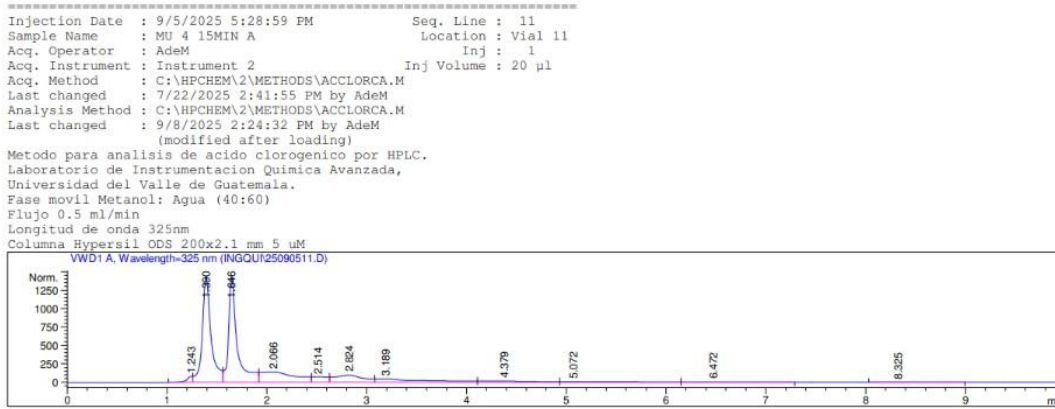


Figura 44. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida



```

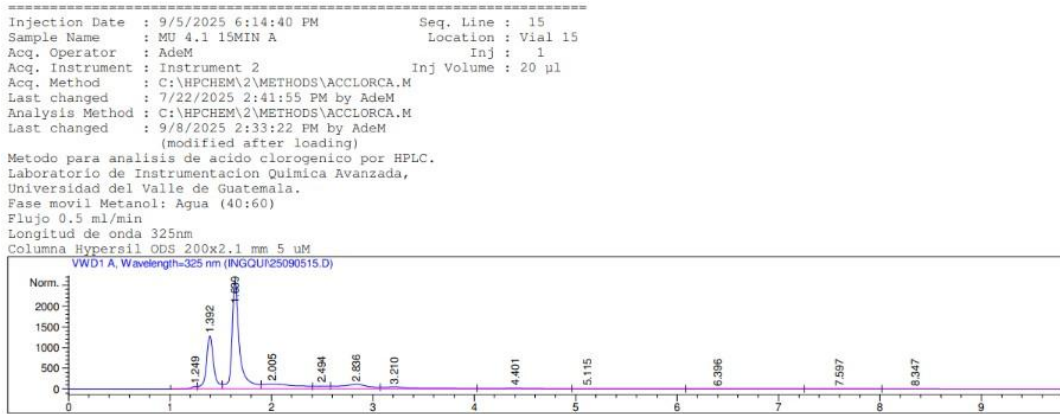
=====
External Standard Report
=====
Sorted By      :      Signal
Calib. Data Modified :      Monday, September 08, 2025 2:23:01 PM
Multiplier    :      1.0000
Dilution      :      1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type   Area   Amt/Area   Amount   Grp   Name
[ min ]      mAU   *s          [ppm]
-----
1.390 VV      8891.98438 2.29784e-2 204.32347 ACIDO CLOROGENICO

Totals :                               204.32347
    
```

Figura 45. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida



```

=====
External Standard Report
=====
Sorted By      :      Signal
Calib. Data Modified :      Monday, September 08, 2025 2:23:01 PM
Multiplier    :      1.0000
Dilution      :      1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type   Area   Amt/Area   Amount   Grp   Name
[ min ]      mAU   *s          [ppm]
-----
1.392 VV      6478.48438 2.29784e-2 148.86513 ACIDO CLOROGENICO

Totals :                               148.86513
    
```

Figura 46. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 3ra corrida

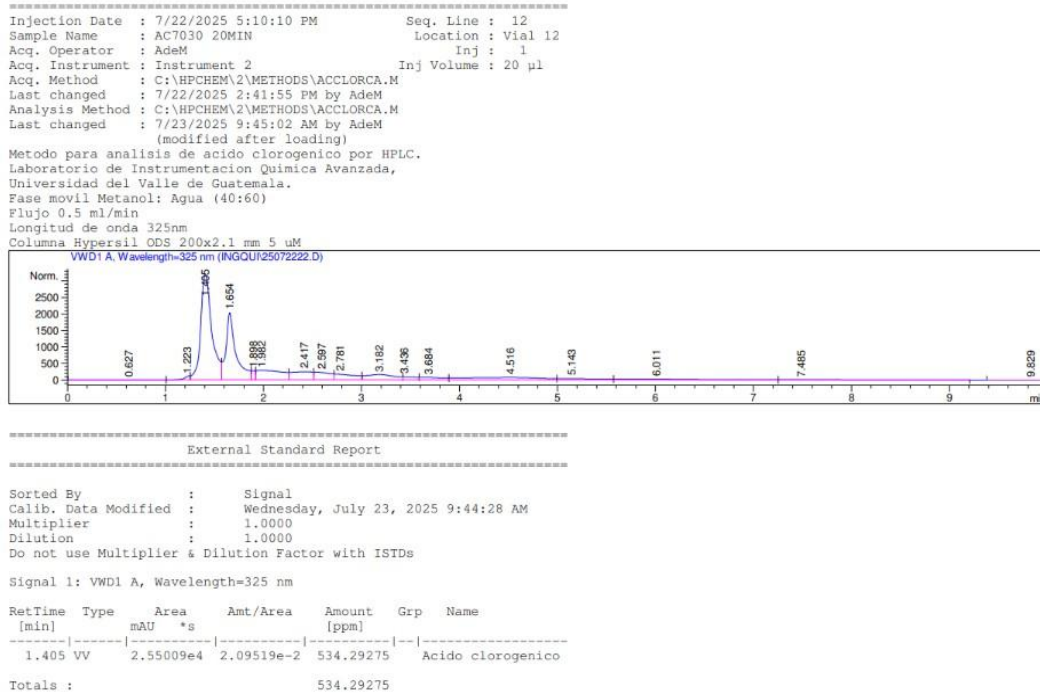


Figura 47. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida

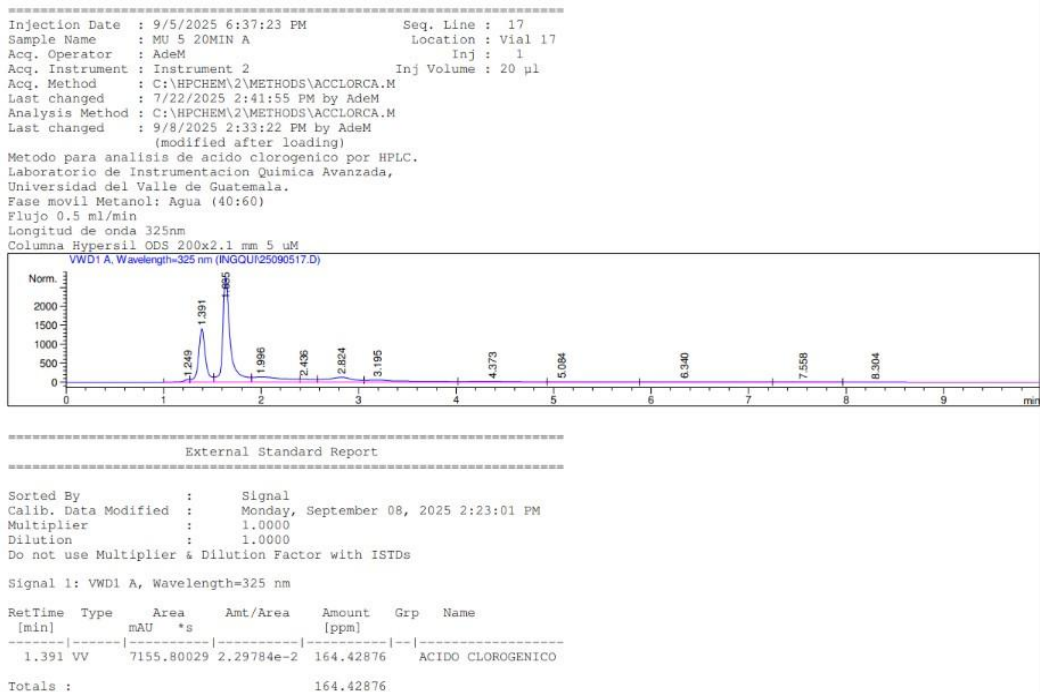


Figura 48. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 70:30 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida

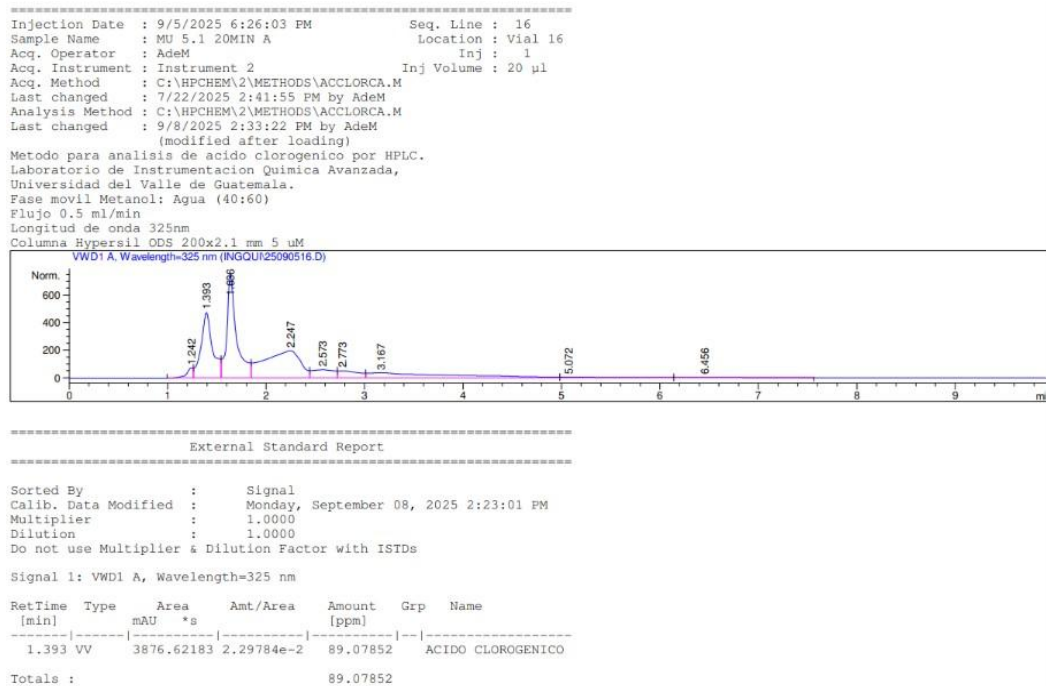


Figura 49. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 1ra corrida

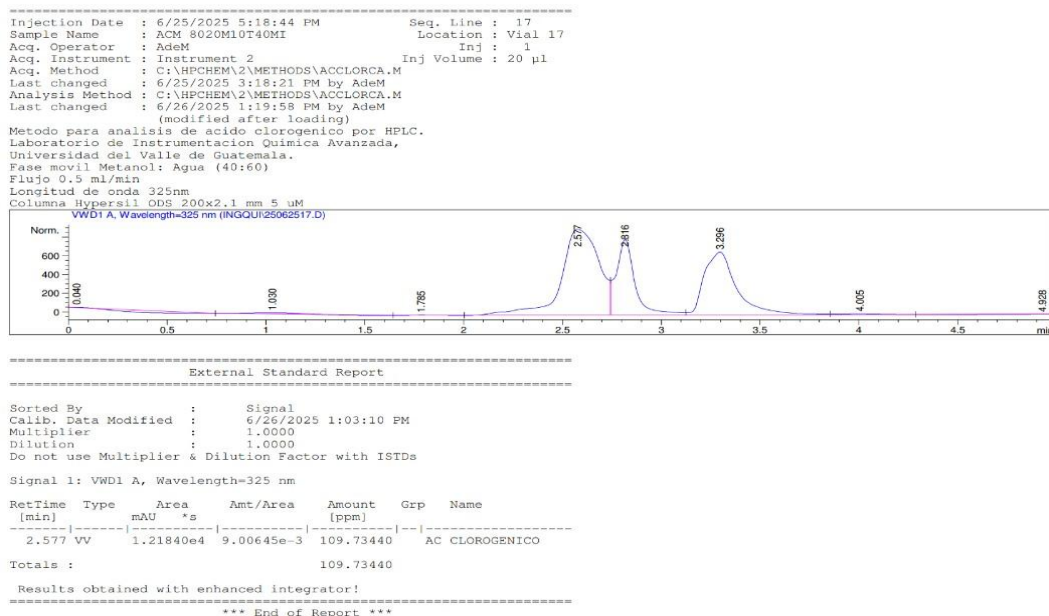


Figura 50. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 2da corrida

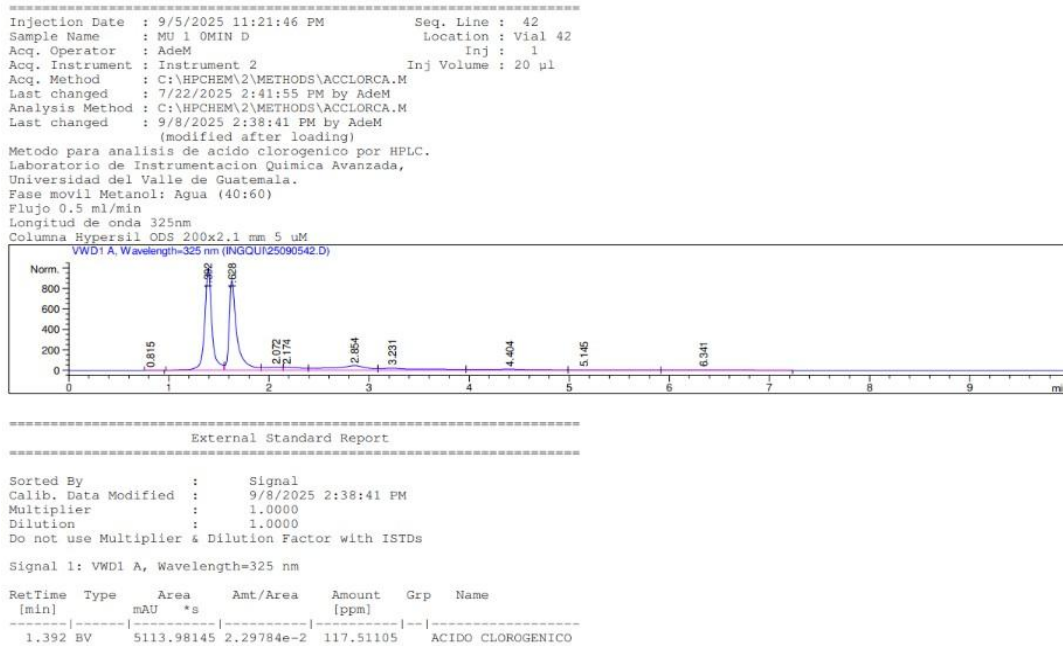


Figura 51. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 0 minutos, 3ra corrida

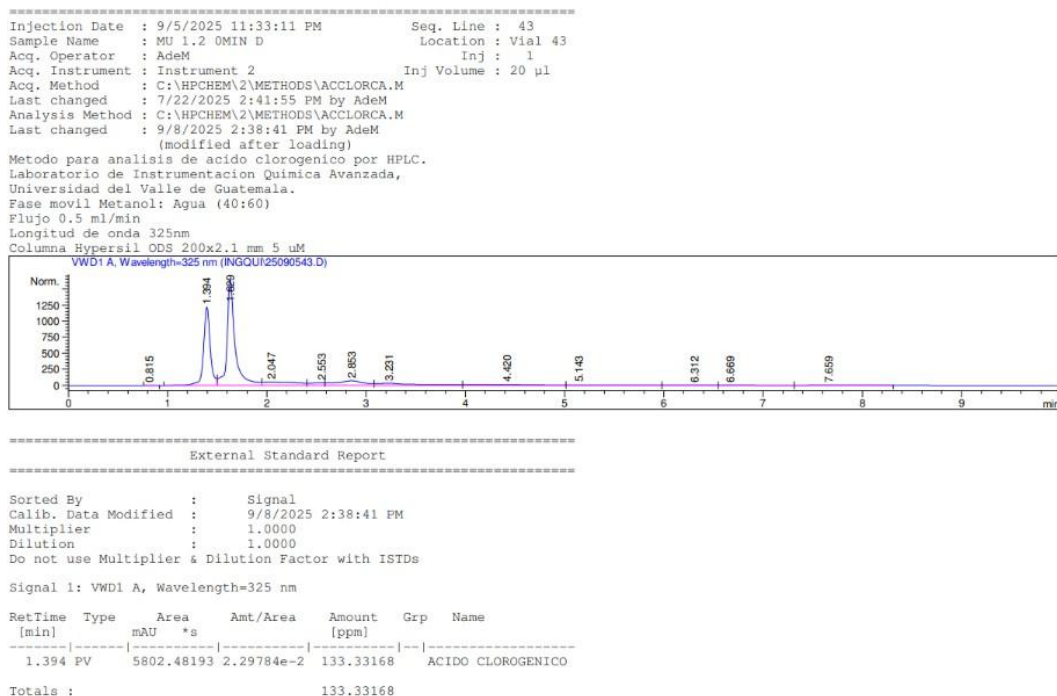


Figura 52. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 1ra corrida

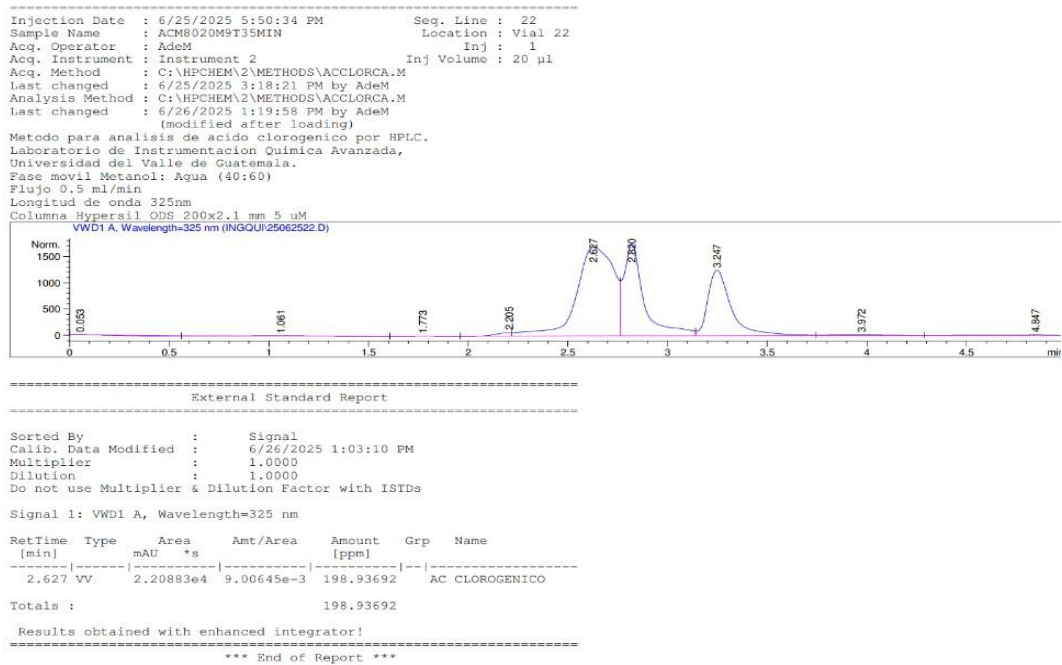


Figura 53. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 2da corrida

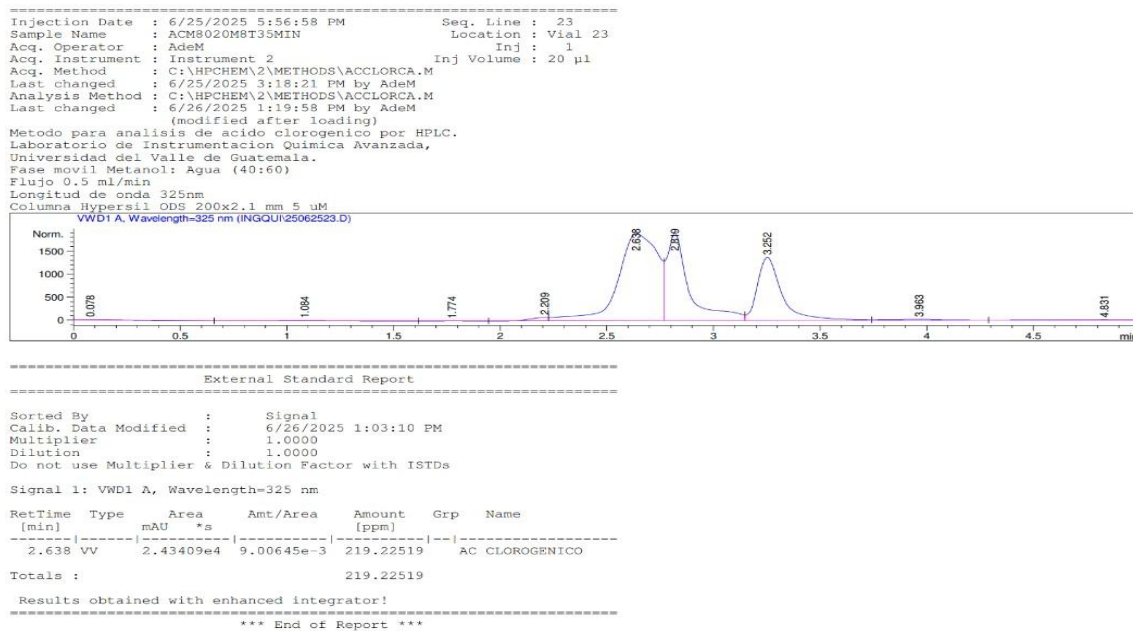


Figura 54. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 5 minutos, 3ra corrida

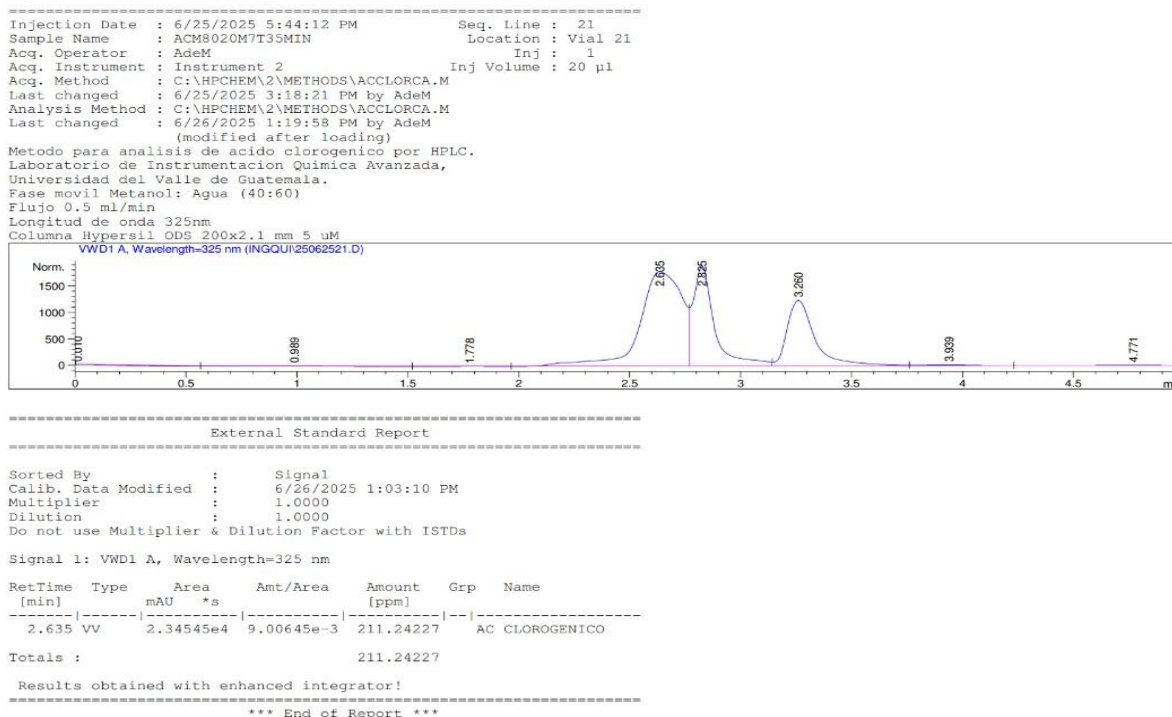


Figura 55. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 1ra corrida

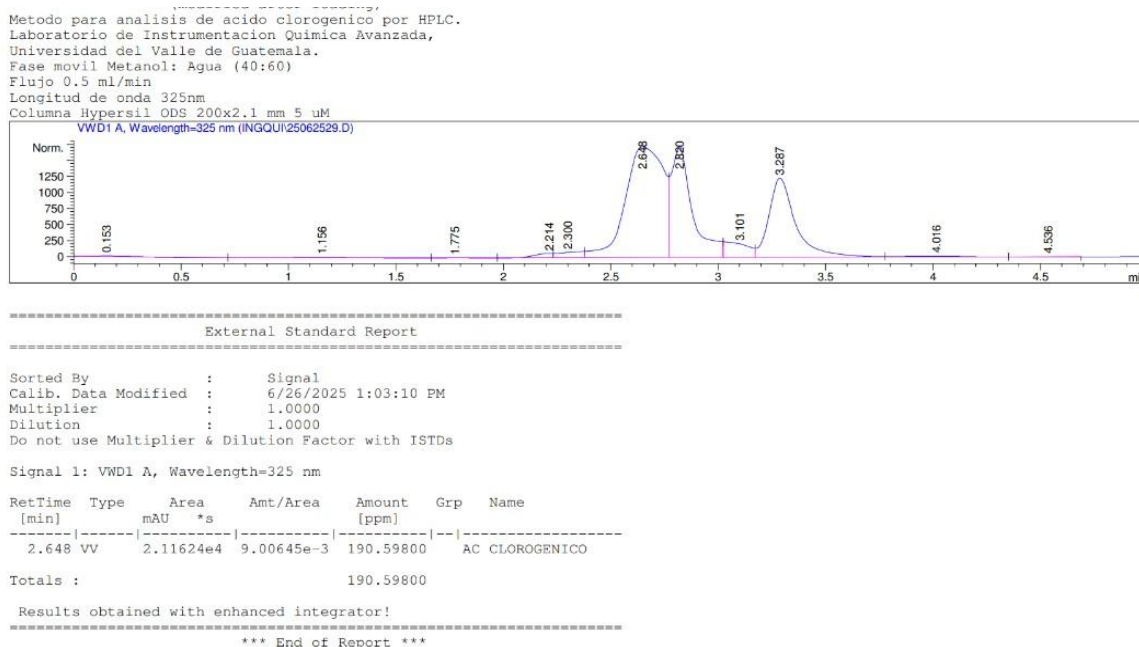


Figura 56. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 10 minutos, 2da corrida

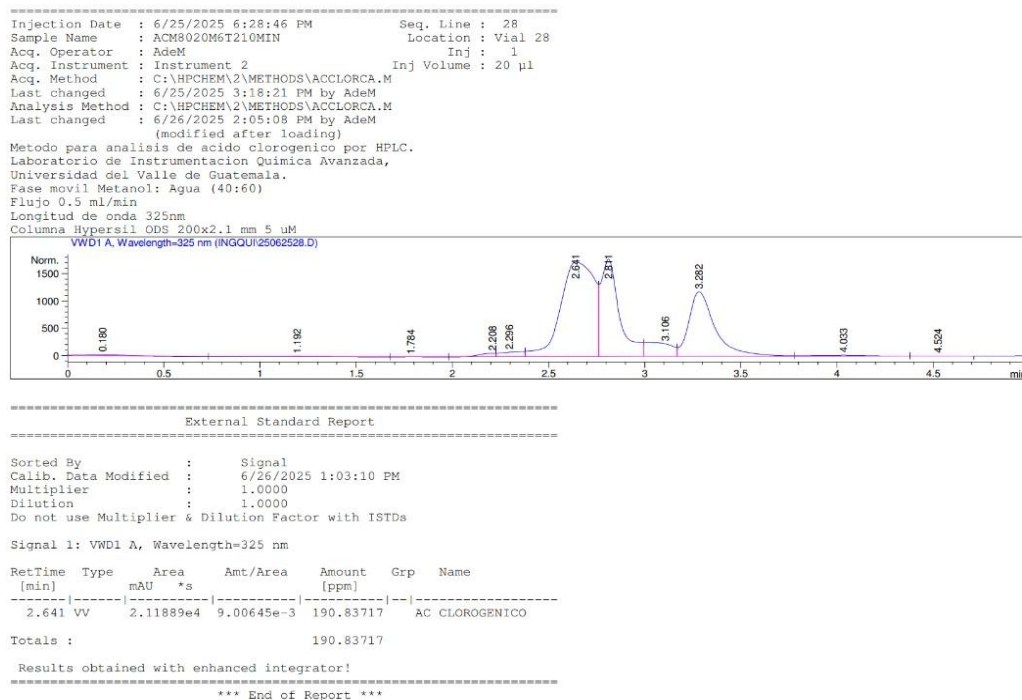


Figura 57. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 1ra corrida

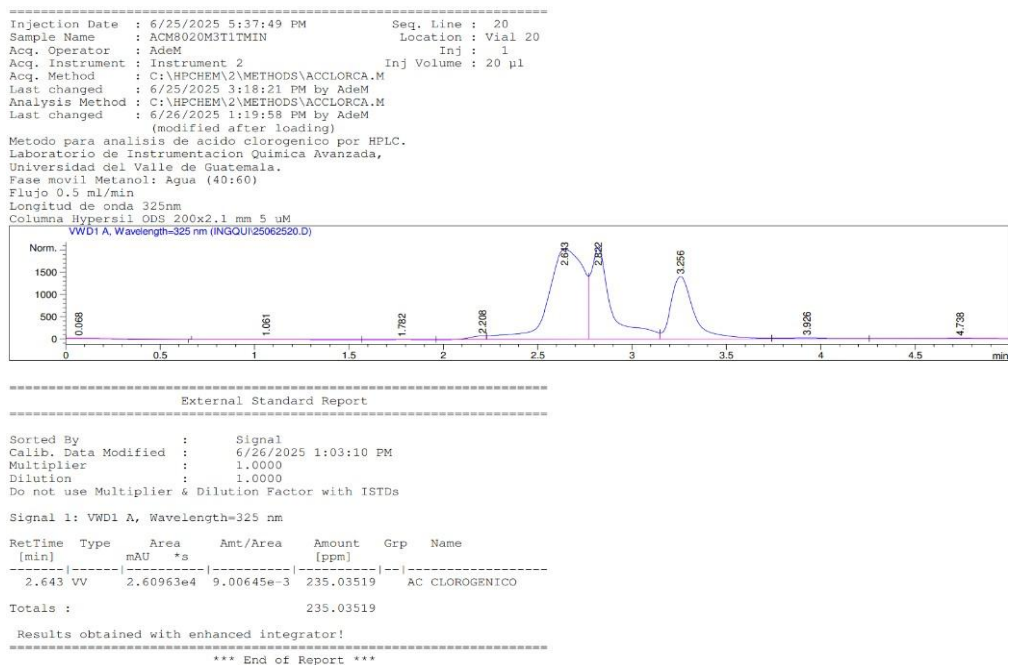
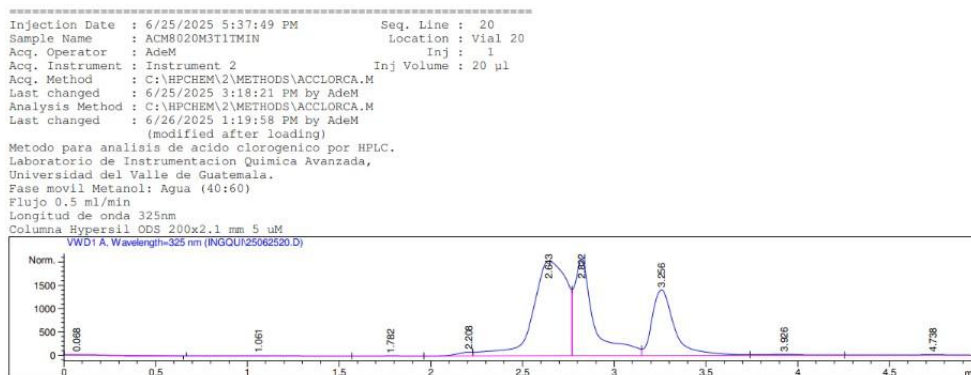


Figura 58. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida



```

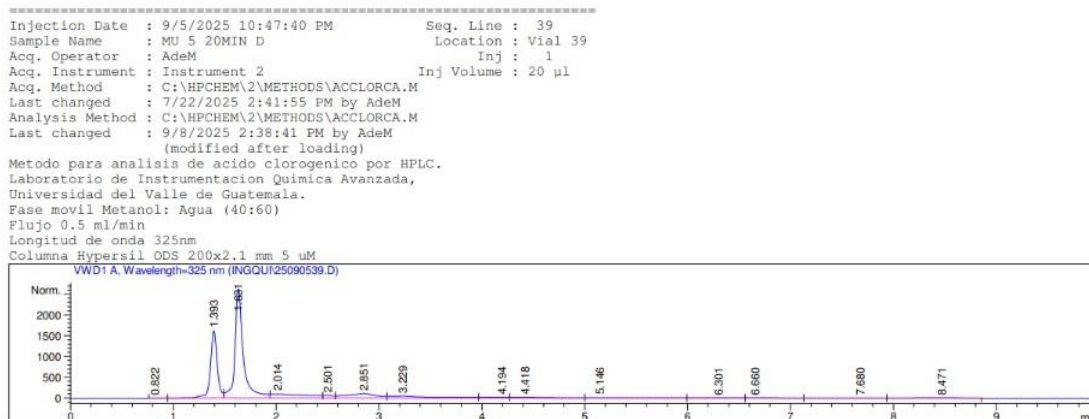
=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 6/26/2025 1:03:10 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[min] [mAU] [s] [ppm] [ppm]
-----|-----|-----|-----|-----|-----
2.643 VV 2.60963e4 9.00645e-3 235.03519 AC CLOGROGENICO
Totals : 235.03519
=====

```

Figura 59. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 15 minutos, 2da corrida



```

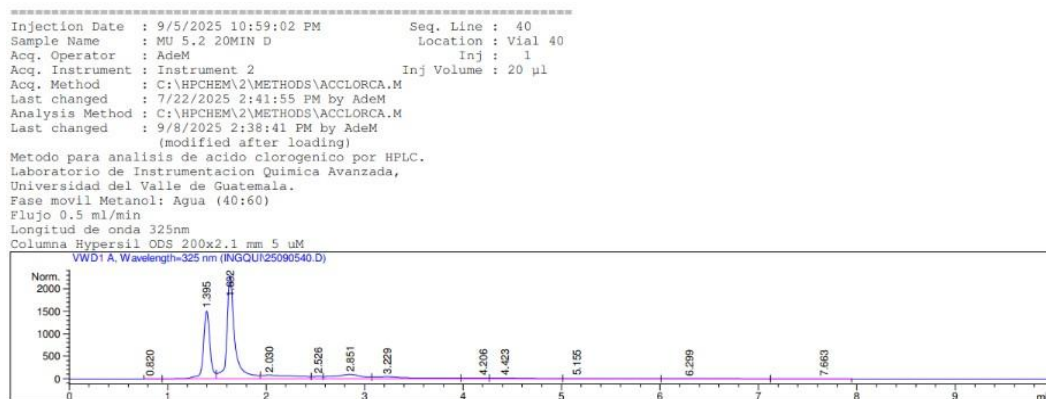
=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 9/8/2025 2:38:41 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm

RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[min] [mAU] [s] [ppm] [ppm]
-----|-----|-----|-----|-----|-----
1.393 VV 7601.83350 2.29784e-2 174.67788 ACIDO CLOGROGENICO
Totals : 174.67788
=====

```

Figura 60. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 1ra corrida

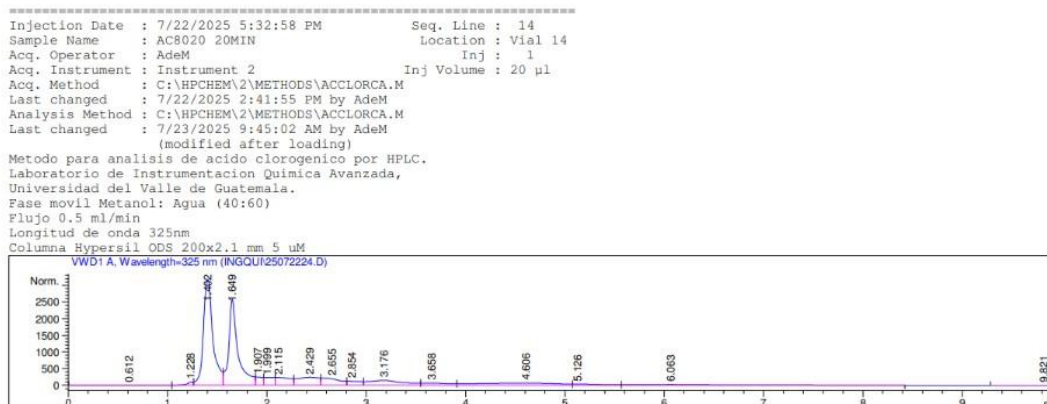


```

=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : 9/8/2025 2:38:41 PM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm
RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[ min ] [ mAU ] [ s ] [ ] [ ppm ] [ ]
-----
1.395 VV 7096.86133 2.29784e-2 163.07444 ACIDO CLOROGENICO
Totals : 163.07444
    
```

Figura 61. Cromatograma HPLC del extracto de posos de café utilizando mezcla hidroalcohólica 80:20 (etanol-agua) como solvente y un tiempo de extracción de 20 minutos, 2da corrida



```

=====
External Standard Report
=====
Sorted By      : Signal
Calib. Data Modified : Wednesday, July 23, 2025 9:44:28 AM
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Do not use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs

Signal 1: VWD1 A, Wavelength=325 nm
RetTime Type Area Amt/Area Amount Grp Name
[ min ] [ mAU ] [ s ] [ ] [ ppm ] [ ]
-----
1.402 VV 2.14460e4 2.09519e-2 449.33347 Acido clorogenico
Totals : 449.33347
    
```

XV. GLOSARIO

- **Ácido clorogénico (AC):** éster formado por la combinación del ácido caféico y el ácido quínico. Es un compuesto fenólico mayoritario en el café, con propiedades antioxidantes, hipoglucemiantes y hepatoprotectoras. Su concentración depende del tipo de café, método de extracción y grado de tostado.
- **Actividad antioxidante:** capacidad de una sustancia para neutralizar radicales libres y especies reactivas del oxígeno (ROS), evitando el daño oxidativo en tejidos o compuestos orgánicos.
- **Agitación ultrasónica:** técnica que utiliza ondas ultrasónicas de alta frecuencia para generar cavitación y facilitar la ruptura de estructuras vegetales, aumentando la transferencia de masa y la liberación de compuestos bioactivos.
- **Análisis de varianza (ANOVA):** método estadístico empleado para determinar si existen diferencias significativas entre medias de grupos experimentales, útil en la comparación de rendimientos de extracción.
- **Arábica (*Coffea arabica*):** especie de café de mayor calidad sensorial, representa aproximadamente el 60 % de la producción mundial. Predomina en Guatemala por su perfil de taza y adaptabilidad a zonas altas.
- ***Coffea canephora* (Robusta):** especie de café de mayor rendimiento y resistencia a plagas, aunque con menor calidad sensorial. Se usa en Guatemala principalmente como portainjerto o para mezclas comerciales.
- **Economía circular:** modelo económico que busca mantener el valor de los recursos mediante la reutilización, reciclaje o valorización de residuos. En esta tesis se aplica al aprovechamiento del poso de café como fuente de compuestos bioactivos.

- **Método Chemex / Método V60:** técnicas manuales de filtrado utilizadas para la preparación de café. Ambas influyen en la composición química de los posos, afectando la cantidad de compuestos fenólicos disponibles para extracción.
- **Poso de café:** residuo sólido generado tras la preparación de la bebida. Contiene lípidos, azúcares, proteínas y polifenoles como los ácidos clorogénicos, lo que lo convierte en una materia prima valiosa para su revalorización.
- **Sonda ultrasónica (sonotrodo):** herramienta metálica que transmite energía ultrasónica al medio líquido. Su diámetro y potencia influyen directamente en la intensidad de cavitación y en la eficiencia de extracción.
- **Ultrasonido:** técnica de extracción no térmica que emplea ondas acústicas de alta frecuencia para mejorar la penetración del solvente, reducir el tiempo de extracción y preservar compuestos termosensibles.