GRUPO BLR

FARMACOGNOSIA

ISBN:

Mercedes Campo Fernández

2026

FARMACOGNOSIA

Mercedes Campo Fernández

AUTOR



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Campo, M. (2026) Farmacognosia. Grupo Editorial BLR.

© Mercedes Campo Fernández

Farmacognosia.

ISBN: 978-9907-802-72-6

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIÓN DEL AUTOR

Mercedes Campo Fernández

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: mcampo@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9835-6886

PRÓLOGO

La Farmacognosia y la Química de Productos Naturales constituyen uno de los pilares más antiguos y, al mismo tiempo, más dinámicos de las Ciencias Farmacéuticas. Para quienes han elegido formarse en Ciencias Farmacéuticas, Bioquímica y Farmacia o carreras afines, estas disciplinas no representan únicamente una asignatura del pensum académico, sino una puerta de entrada a la comprensión profunda del medicamento desde su origen natural hasta su aplicación terapéutica basada en la evidencia científica.

Desde las primeras civilizaciones hasta la farmacoterapia moderna, los productos naturales han acompañado al ser humano en la búsqueda de alivio, prevención y cura de las enfermedades. Cada planta medicinal, cada metabolito especializado y cada droga natural encierra siglos de observación empírica y décadas, o incluso siglos, de validación científica. Estudiar Farmacognosia es, por tanto, asumir el compromiso de integrar tradición y ciencia, saber ancestral y metodología analítica rigurosa con carácter científico.

Para el estudiante universitario, esta rama del saber representa un desafío intelectual y, a la vez, una oportunidad formativa excepcional. En ellas convergen la botánica, la química, la farmacología, la biotecnología, las ciencias ambientales y la ética profesional. Su estudio desarrolla una mirada crítica sobre la calidad, seguridad y eficacia de los productos de origen natural, preparando al futuro profesional para responder con solvencia a un contexto sanitario donde los fitomedicamentos, nutracéuticos y productos naturales ocupan un

lugar cada vez más relevante.

Este texto ha sido concebido como una guía inicial y un estímulo académico. Invita al estudiante a comprender que detrás de cada extracto, cada principio activo natural y cada medicamento, existe un proceso científico complejo que requiere conocimiento, responsabilidad y compromiso social. La Farmacognosia no es una ciencia del pasado: es una disciplina viva, estratégica y esencial para el farmacéutico moderno, llamado a contribuir al desarrollo de terapias seguras, eficaces y sostenibles para la sociedad.

ÍNDICE

PRÓLOGO……i

ÍNDICE.....iii

ÍNDICE DE TABLAS xv

ÍNDICE DE FIGURAS xvi

CAPÍTULO I..... 21

1 INTRODUCCIÓN A LA FARMACOGNOSIA 21

1.1 Historia y evolución de la farmacognosia..... 22

1.2 Definiciones y alcance de la farmacognosia 32

1.3 Farmacognosia pura, científica o general..... 33

1.4 Farmacognosia especial o aplicada 34

1.5 Relación de la farmacognosia con otras ciencias 38

1.6 La Farmacognosia dentro del pensum académico de un Farmacéutico, Bioquímico-Farmacéutico o Químico Farmacéutico..... 40

CAPÍTULO II..... 43

2 LA BOTÁNICA APLICADA A LA FARMACOGNOSIA... 43

2.1 Introducción a la Botánica: Importancia de la botánica en el estudio de plantas medicinales 44

2.2 Clasificación y nomenclatura de plantas medicinales. Herramientas moleculares 48

2.2.1 Principios básicos de taxonomía y nomenclatura botánica 48

2.2.2 Aplicación de herramientas moleculares (DNA barcoding) 58

2.3 Códigos de barras de ADN del genoma nuclear 59

2.4 Locus único, locus múltiple y combinaciones de genes viables. 63

2.5 Supercódigo de barras 63

2.6 Código de barras específico 64

2.7 Minicódigo de barras 64

2.8 Metacódigo de barras 65

2.8.1 Bases de datos y software para la identificación de especies 66

2.8.2 Herbarios 72

2.9 Fitomorfología 78

2.10 Identificación de características macroscópicas de la raíz 79

2.10.1 Características generales y morfología externa 79

2.11 Modificaciones 83

2.12 Examen macroscópico 85

2.13 Identificación de características macroscópicas del tallo 86

2.14 Clasificación 89

2.15 Identificación de características macroscópicas de la hoja..... 95

2.16 Clasificación de las hojas según su morfología 98

2.17 Modificaciones de las hojas..... 107

2.18 Examen macroscópico 109

2.18.1 Identificación de características macroscópicas de la flor 110

2.19 Tipos de flores 113

2.19.1 Según las partes que las conforman (figura 23 A) 114

2.19.2 Según la presencia de órganos sexuales (Figura 23 B) 114

2.19.3 Según la forma de la corola (figura 24 A)..... 115

2.19.4 Según el número de carpelos (figura 24 B)..... 116

2.19.5 Según la forma de las inflorescencias 117

2.19.6 Identificación de características macroscópicas del fruto 121

2.20 Semilla..... 123

2.21 Identificación de características macroscópicas de la semilla .. 129

2.22 Examen macroscópico 132

2.23 Características microscópicas y su uso en el análisis de drogas crudas. Histoquímica..... 133

2.24 Técnicas histológicas 134

2.25 Técnica por inclusión..... 135

2.26 Tejidos vegetales 137

2.27 Micromorfología de los órganos vegetativos de una planta 153

2.28 Examen e identificación de drogas crudas 164

2.29 Histoquímica..... 171

2.30 Cultivo y recolección de plantas medicinales. Tratamiento postcosecha..... 174

2.30.1 Cultivo de plantas medicinales..... 175

2.30.2 Recolección de plantas medicinales 178

2.30.3 Selección, lavado y desinfección 182

2.30.4 Secado……183

2.30.5 Embalaje..... 187

2.30.6 Almacenamiento..... 189

2.31 Normativas para el control de calidad de las drogas vegetales. 190

2.32 Características sensoriales, análisis macroscópico y microscópico…….193

2.33 Parámetros físicos..... 194

2.33.1 Determinación de cenizas 194

2.33.2 Determinación de sustancias extraíbles..... 195

2.33.3 Determinación de agua (Humedad residual)..... 195

2.33.4 Parámetros químicos 196

2.33.5 Ensayos biológicos..... 197

2.33.6 Índice de amargor 198

2.33.7 Índice de hinchamiento 198

2.33.8 Índice de formación de espuma..... 199

2.33.9 Actividad hemolítica 199

2.33.10 Residuos de plaguicidas..... 200

2.33.11 Determinación de arsénico y metales pesados..... 200

2.33.12 Determinación de microorganismos 201

2.34 Elementos de cierre del capítulo 202

CAPÍTULO III 207

3 EXTRACCIÓN. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE EXTRACTOS 207

3.1 Extracción 208

3.1.1 Fundamentos teóricos 210

3.2 Tipos de extracción 212

3.2.1 Extracción mecánica 212

3.2.2 Extracción por destilación 213

3.2.3 Extracción mediante disolvente 216

3.3 Selección del disolvente a utilizar 220

3.4 Factores que influyen sobre el proceso de extracción sólido-líquido 225

3.5 Métodos de extracción tradicionales 228

3.5.1 Maceración 229

3.5.2 Digestión, decocción e infusión 233

3.5.3 Percolación 235

3.5.4 Extracción por Soxhlet 239

3.5.5 Extracción por reflujo 241

3.6 Métodos para concentrar extractos vegetales 243

3.7 Tipos de extractos 246

3.8 Control de calidad de los extractos 248

3.8.1 Ensayos organolépticos 248

3.8.2 Ensayos fisicoquímicos 248

3.8.3 Ensayos para compuestos activos (tamizaje fitoquímico) 253

3.9 Bioautografía en cromatografía en capa delgada (CCD) aplicada al tamizaje de metabolitos bioactivos 258

3.10 Elementos de cierre del capítulo 261

CAPÍTULO IV 266

4 EXTRACCIÓN POR MÉTODOS NO TRADICIONALES 266

4.1 Extracción asistida por microondas (EAM) 271

4.2 Principios físico-químicos: Mecanismos de calentamiento 272

4.3 Mecanismo de acción celular 273

4.4 Criterios para la selección y modulación de disolventes 276

4.5 Configuraciones instrumentales: sistemas cerrados y abiertos . 277

4.6 Modos de operación: discontinuo vs. continuo 279

4.7 Ventajas, desventajas y aplicaciones de la EAM 279

4.8 Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (EAU)..... 282

4.9 Clasificación 282

4.10 El fenómeno de la cavitación acústica..... 284

4.11 Mecanismo de extracción: interacción onda-célula..... 285

4.12 Influencia del tamaño de partícula..... 286

4.13 Equipos y configuraciones experimentales..... 287

4.14 Variables críticas del proceso 289

4.15 Ventajas, limitaciones y aplicaciones de la EAU 291

4.16 Extracción mediante fluido supercrítico (EFS) 293

4.17 Etapas de la extracción con fluidos supercríticos 295

4.18 Disolventes y muestra..... 298

4.19 Limitaciones 302

4.20 Aplicaciones en la industria..... 303

4.21 Extracción con disolventes presurizados 304

4.22 Proceso de extracción 307

4.23 Ventajas y limitaciones..... 308

4.24 Aplicaciones de la extracción con líquidos presurizados (PLE)…….311

4.25 Turboextracción..... 314

4.26 Adecuación de la materia vegetal 316

4.27 Selección de disolventes 317

4.28 Ventajas y limitaciones 318

4.29 Aplicaciones del método 320

4.30 Otras técnicas de extracción no tradicionales 322

4.30.1 Extracción eléctrica o asistida por alto voltaje (HVED) 322

4.31 Extracción asistida por enzimas 324

4.32 Elementos de cierre del capítulo 332

CAPÍTULO V 337

5 SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS EN LA EXTRACCIÓN DE METABOLITOS ESPECIALIZADOS 337

5.1 Fundamentos de disolventes eutécticos profundos (DES) 338

5.1.1 Síntesis y preparación de DES/NADES 343

5.1.2 Propiedades físicoquímicas de los DES/NADES 345

5.1.3 Temperatura de fusión (T_f) 347

5.1.4 Densidad 348

5.1.5 Viscosidad 349

5.1.6 Tensión superficial 351

5.1.7 Conductividad 351

5.1.8 Polaridad 352

5.2 Aplicaciones de los DES/NADES en la extracción de metabolitos especializados 352

5.2.1 Polifenoles totales 352

5.2.2 Flavonoides 354

5.2.3 Alcaloides 356

5.2.4 Aceites esenciales 361

5.2.5 Taninos 366

5.2.6 Antocianinas 368

5.3 Otras aplicaciones de DES en Química 369

5.3.1 Cromatografía 369

5.3.2 Macromoléculas 370

5.4 Elementos de cierre del capítulo 372

CAPÍTULO VI 375

6 MÉTODOS AVANZADOS DE SECADO DE EXTRACTOS 375

6.1 Secado por aspersión en la obtención de extractos vegetales .. 376

6.1.1 Definición y principios del secado por aspersión 377

6.2 Fundamento físico 379

6.2.1 Equipo y fases del proceso de secado por aspersión 380

6.3 Parámetros operativos críticos 387

6.4 Relación entre los parámetros de salida y de entrada 392

6.5 Influencia de los disolventes orgánicos en el secado por aspersión 393

6.6 Excipientes utilizados en el secado por aspersión 395

6.7 Ventajas y desventajas del secado por aspersión 399

6.8 Ejemplos de aplicaciones del secado por aspersión en extractos vegetales 401

6.9 Liofilización como opción de secado de extractos naturales ... 403

6.9.1 Generalidades 403

6.9.2 Fundamento del método 404

6.9.3 Excipientes utilizados para el secado por liofilización 406

6.9.4 Equipamiento 411

6.10 Etapas del proceso de liofilización 414

6.10.1 Congelación 415

6.10.2 Secado primario (sublimación) 415

6.10.3 Secado secundario (desorción) 416

6.11 Ventajas del secado por liofilización 416

6.12 Aplicaciones del secado por liofilización en extractos vegetales……...418

6.13 Elementos de cierre del capítulo 422

CONCLUSIONES 427

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 433

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales categorías taxonómicas. 55
Tabla 2. Algunas pruebas histoquímicas que se realizan a tejidos vegetales. 172
Tabla 3. Constante dieléctrica de los disolventes utilizados en procesos de extracción. 220
Tabla 4. Tipos de metabolitos a extraer según la polaridad del disolvente. 223
Tabla 5. Comparación de la eficiencia de extracción de eugenol del clavo de olor. 286
Tabla 6. Análisis comparativo de eficiencia de extracción: ultrasonido frente a métodos convencionales..... 292
Tabla 7. Principales disolventes usados en la extracción con fluidos supercríticos. 299
Tabla 8. Técnicas de extracción más utilizadas en investigaciones fitoquímicas. 328
Tabla 9. Técnicas de extracción más utilizadas en investigaciones fitoquímicas. 331
Tabla 10. Fórmulas generales para la clasificación de DES. 341
Tabla 11. Lista de los cinco HDES utilizados en la extracción de aceites esenciales acoplada a CG-FID..... 363
Tabla 12. Ventajas, desventajas y limitaciones de los DES. 371
Tabla 13. Excipientes para la liofilización de matrices naturales. 410

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Farmacognosia: el puente entre la naturaleza y la medicina científica. 22
Figura 2. Subdivisión de la Farmacognosia en once disciplinas. .. 34
Figura 3. Botánica aplicada a la farmacología del campo al control de calidad. 44
Figura 4. Clasificación de las plantas. 49
Figura 5. Imágenes de material montado para herbario A: Ocimum tenuiflorum, B: Lippia alba (Miller) N. E. Brown 74
Figura 6. Macromorfología de una raíz típica. 80
Figura 7. Tipos de raíces de acuerdo a la forma externa (A) y su consistencia (B). 83
Figura 8. Modificaciones de la raíz. 84
Figura 9. Morfología externa del tallo aéreo. 87
Figura 10. Tipos de tallos según el lugar donde viven. 91
Figura 11. Tipos de tallos según su consistencia. 93
Figura 12. Modificaciones de tallos. 94
Figura 13. Macromorfología de una hoja. 96
Figura 14. Algunos tipos de hojas atendiendo al pecíolo. 97
Figura 15. Disposición de las hojas en el tallo. 99
Figura 16. Tipos de hojas atendiendo a las nerviaciones. 100
Figura 17. Tipos de hojas atendiendo al contorno o forma del limbo. 101
Figura 18. Tipos de hojas atendiendo al borde del limbo. 103
Figura 19. Tipos de hojas de acuerdo al ápice. 104
Figura 20. Tipos de hojas atendiendo a la base. 106

Figura 21. Tipos de hojas compuestas. 107
Figura 22. Principales modificaciones de las hojas. 108
Figura 23. Tipos de pelos de las hojas..... 109
Figura 24. Macromorfología de una flor. 111
Figura 25. Tipos de flores según la disposición del ovario. 113
Figura 26. Tipos de flor según las partes que las conforman (A) y atendiendo a la presencia de órganos sexuales (B). 115
Figura 27. Tipos de flores atendiendo a la forma de corola (A) y según el número de carpelos (B)..... 116
Figura 28. Tipos de inflorescencias racimosas. 119
Figura 29. Tipos de inflorescencias cimosas..... 121
Figura 30. Macromorfología de un fruto..... 122
Figura 31. Frutos secos indehiscentes. 124
Figura 32. Frutos secos dehiscentes. 125
Figura 33. Frutos carnosos. Leyenda: A: baya; B: pepónide; C: Hesperidio; D: Pomo o melónide; E: Balausta; F: Conocarpo; G: Drupa. 127
Figura 34. Frutos politalámicos..... 128
Figura 35. Macromorfología de la semilla..... 129
Figura 36. Semillas según su forma y tamaño. 132
Figura 37. Métodos de separación de muestras histológicas. 134
Figura 38. Tipos de meristemos según su origen. 139
Figura 39. Epidermis (A), estructura general de un estoma (B), tipos de estomas (C). 141
Figura 40. Tipos de tricomas o pelos foliares. 142
Figura 41. Células del tejido suberoso. 143
Figura 42. Tipos de tejidos parenquimáticos. 146

Figura 43. Tipos de células colenquimáticas. 147
Figura 44. Tipos de células esclerénquima. 149
Figura 45. Tejidos de conducción xilema y floema. 150
Figura 46. Principales elementos celulares del xilema y floema.. 151
Figura 47. Tipos de bolsas segregadoras. 153
Figura 48. Estructura interna de una raíz. 154
Figura 49. Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores. 155
Figura 50. Estructura interna de la hoja. 156
Figura 51. Detalles micromorfológicos de los sépalos y pétalos de una flor de dicotiledónea. 157
Figura 52. Micromorfología de frutos secos. 159
Figura 53. Micromorfología de frutos carnosos. 161
Figura 54. Variaciones en el episperma de semillas de Angiospermas. 162
Figura 55. Granos de almidón según su forma. 166
Figura 56. Cristales de oxalato de calcio según su forma. 167
Figura 57. Cálculo del índice de estomas. 169
Figura 58. Cálculo del índice de empalizada. 170
Figura 59. Ejemplo de observaciones histoquímicas. 174
Figura 60. Extractos reproducibles. 208
Figura 61. Extracción mediante maceración estática y dinámica. 231
Figura 62. Extracción acuosa mediante infusión (1), digestión (2) y decocción (3). 233
Figura 63. Método de extracción por percolación. 237
Figura 64. Método de extracción mediante Soxhlet. 240

Figura 65. Método de extracción mediante reflujo. 242
Figura 66. Diagrama general para desarrollar el tamizaje fitoquímico de una droga vegetal sometida a un fraccionamiento con disolventes de polaridad creciente. 255
Figura 67. Reacciones químicas a realizar en el extracto de etéreo. 256
Figura 68. Reacciones químicas a realizar en el extracto alcohólico. 256
Figura 69. Reacciones químicas a realizar en el extracto acuoso. 257
Figura 70. La disrupción celular mecánica y térmica es la clave de la eficiencia moderna. 268
Figura 71. Sistema de extracción por microondas (EAM) con aplicación para la obtención de aceites esenciales. 278
Figura 72. Sistema de extracción mediante ultrasonido. A. Extracción indirecta. B. Extracción directa. 288
Figura 73. Diagrama de fases de fluidos. 294
Figura 74. Diagrama de extracción con fluidos supercríticos (EFS). 297
Figura 75. Sistema de extracción con líquido presurizado. 304
Figura 76. Esquema de turboextracción con homogeneizador de alto cizallamiento. 315
Figura 77. Sistema de extracción asistida por alto voltaje (HVED). 322
Figura 78. Sistema de extracción asistida por enzimas y ultrasonido. 326
Figura 79. Disolventes eutécticos profundos (DES). 338

Figura 80. A) Dependencia del punto de congelación con la proporción molar para diferentes mezclas eutécticas de cloruro de colina con urea. 339
Figura 81. Estructuras de las sales de halogenuro (HBAs) y donadores de hidrógeno (HBDs) utilizados en la síntesis de DES. 344
Figura 82. Extracción de alcaloides de Evodia lepta utilizando un sistema bifásico DES ácido levulinico–glicerol–K2HPO4 y acetato de etilo. 358
Figura 83. Sistema de extracción de alcaloides basado en un disolvente eutéctico ternario (TDES) impregnado en una matriz polimérica magnética. 359
Figura 84. Micrografías SEM de la morfología del micelio de Aspergillus flavus..... 365
Figura 85. Métodos avanzados de secado en farmacognosia..... 376
Figura 86. Partes de un equipo de secado por aspersión. 377
Figura 87. Etapas del secado por aspersión. 382
Figura 88. Diagrama de estado físico del agua. Pc y Tc: Presión y temperatura crítica. PT y TT: Presión y temperatura del punto triple. 405
Figura 89. Esquema general de un equipo de liofilización. 411
Figura 90. Etapas del proceso de liofilización. 415

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN A LA FARMACOGNOSIA

La Farmacognosia es una disciplina esencial dentro de las Ciencias Farmacéuticas, destacando su evolución desde un conocimiento empírico ancestral hasta su consolidación como una ciencia moderna sustentada en bases químicas, biológicas y farmacológicas. A lo largo del texto se evidencia que el estudio de los productos naturales ha acompañado históricamente al ser humano en la búsqueda de alternativas terapéuticas para la prevención y el tratamiento de enfermedades, manteniendo su vigencia en la práctica farmacéutica contemporánea. El enfoque de la Farmacognosia no se limita al análisis químico de los metabolitos especializados, sino que incorpora dimensiones económicas, sociales, culturales y ambientales, lo que le confiere un carácter multidisciplinario y estratégico. En este sentido, la disciplina actúa como un nexo entre el conocimiento tradicional y la medicina basada en la evidencia científica.

El capítulo resalta el renovado interés por los productos naturales, impulsado por la necesidad de desarrollar terapias más seguras y sostenibles, la búsqueda de nuevas estructuras químicas bioactivas y la validación científica de usos tradicionales. Este contexto posiciona a la farmacognosia moderna como una herramienta clave para la investigación, el desarrollo y la regulación de medicamentos de origen natural, fitoterapéuticos y nutracéuticos.

Se enfatiza la estrecha relación de la Farmacognosia con otras áreas del conocimiento, como la botánica, la química, la farmacología, las

ciencias biomédicas y las ciencias ambientales, lo que permite una comprensión integral del medicamento desde su fuente natural hasta su aplicación clínica. Finalmente, el capítulo subraya la importancia de esta asignatura en la formación académica del farmacéutico, bioquímico-farmacéutico y químico farmacéutico, destacando su contribución al desarrollo de competencias científicas, éticas y profesionales. En conjunto, el texto invita al estudiante a valorar la Farmacognosia como una disciplina clave para una práctica farmacéutica sólida, crítica y comprometida con la salud y la sociedad.



Figura 1. Farmacognosia: el puente entre la naturaleza y la medicina científica.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1.1 Historia y evolución de la farmacognosia

La farmacognosia se originó en las civilizaciones más antiguas, emergiendo de los rituales místicos de las tribus y sobreviviendo a los secretos de los curanderos. Ha evolucionado desde una época de empirismo hasta convertirse en una ciencia especializada en la actualidad. A pesar de sus orígenes ligados a la brujería y el

misticismo, hoy es una ciencia rigurosa.

Desde el principio de su existencia, el ser humano ha tenido que obtener alimentos y medicamentos, probablemente inspirado por el comportamiento de los animales al elegir plantas. Probando diferentes especies y experimentando sus efectos, tanto positivos como negativos, el hombre fue aprendiendo a distinguir entre plantas útiles y venenosas. Cuando una planta mostraba efectos beneficiosos, se probaba en otros individuos, y si el resultado era consistente, se generalizaba su uso. Este conocimiento fue transmitido de generación en generación, ampliándose con el tiempo.

La tradición asiática en el uso de plantas medicinales tiene raíces profundas que se extienden a lo largo de milenios, con sistemas médicos bien establecidos que se han transmitido de generación en generación. Dos de las tradiciones más prominentes en Asia son la Medicina Tradicional China (MTC) y el Ayurveda de la India, ambas con enfoques muy ricos en el uso de plantas medicinales.

La MTC se remonta a más de 5,000 años, basándose en principios filosóficos como el yin y el yang y los cinco elementos (agua, madera, fuego, tierra y metal). Estos principios guían la interacción de las fuerzas vitales en el cuerpo y la naturaleza. Los médicos chinos utilizaban las plantas medicinales para equilibrar las energías dentro del cuerpo, manipulando las interacciones entre el yin (energía pasiva) y el yang (energía activa).

Un ejemplo central es el uso de plantas como el *Panax ginseng* (ginseng), conocido por su capacidad para restaurar el equilibrio y

fortalecer el "qi", o energía vital. Además, textos antiguos como el Shennong Bencao Jing (Clásico de la Materia Médica del Divino Granjero) recopilaban el conocimiento sobre las propiedades curativas de cientos de hierbas, muchas de las cuales siguen siendo fundamentales en la práctica de la MTC actual.

El Ayurveda, un sistema de salud originario de la India que tiene más de 3,000 años de antigüedad, también pone un fuerte énfasis en el uso de plantas medicinales para equilibrar los doshas (*vata, pitta y kapha*), que son energías que gobiernan la fisiología humana. La terapia con drogas vegetales es una parte crucial del Ayurveda, con más de 8,000 recetas documentadas para combinaciones de plantas medicinales.

Entre las plantas destacadas del Ayurveda se encuentra la *Withania somnifera* (Ashwagandha), conocida por sus propiedades adaptógenas, y la Tulsi o *Ocimum sanctum* (albahaca sagrada), usada como tónico para fortalecer el sistema inmunológico y equilibrar los sistemas corporales.

Las civilizaciones egipcias, asirio-babilónica y griega jugaron un papel crucial en el desarrollo temprano del uso de plantas medicinales, sentando las bases para las prácticas médicas que influenciaron el mundo antiguo y moderno.

En el antiguo Egipto, el uso de plantas medicinales estaba profundamente ligado a la religión y la medicina. Los sacerdotes-médicos egipcios acumulaban conocimientos sobre plantas a través de la observación y la experimentación, registrándolos en documentos conocidos como papiros médicos. El más famoso de estos textos es el

Papiro de Ebers (c. 1550 a.C.), un extenso documento que detalla más de 700 medicamentos, muchos de ellos derivados de plantas. Entre los ejemplos notables se encuentran: *Aloe vera* (sábila), utilizado por sus propiedades curativas para heridas y quemaduras; *Coriandrum sativum* (coriandro), empleado tanto en la alimentación como en remedios digestivos; *Cannabis sativa* (cannabis), citado en el Papiro de Ebers por sus propiedades antiinflamatorias. Los egipcios también embalsamaban a sus muertos utilizando productos derivados de plantas como resinas y aceites esenciales, lo que refleja su profundo conocimiento sobre la preservación de materiales biológicos.

La civilización asirio-babilónica también dejó un legado importante en cuanto al uso de plantas medicinales. Los babilonios registraban sus conocimientos médicos en tabletas de arcilla que mencionaban el uso de hierbas para tratar diferentes dolencias. Un texto relevante es el Código de Hammurabi (c. 1754 a.C.), que, aunque era un conjunto de leyes, mencionaba la medicina y la necesidad de separar los tratamientos médicos de la religión, lo que sugiere un enfoque más secular hacia el uso de las plantas medicinales. Entre las plantas utilizadas por los babilonios se encuentra: la *Menta spp* (menta), empleada para aliviar problemas digestivos; la *Artemisia absinthium* (ajenjo), usado como tónico y en el tratamiento para enfermedades estomacales. Además, el uso de plantas como el comino y el ajo en sus formulaciones médicas reflejaba un conocimiento considerable de los efectos terapéuticos de las plantas.

La medicina tradicional europea tiene sus raíces en las civilizaciones egipcia y asirio-babilónica. La civilización griega fue crucial en la

sistematización del conocimiento sobre plantas medicinales. Los antiguos griegos heredaron y ampliaron los saberes de los egipcios y babilonios, pero fue con figuras como Hipócrates (considerado el "Padre de la Medicina") y Teofrasto (el "Padre de la Botánica") que se consolidó una tradición científica en torno al uso de plantas para la medicina. Hipócrates (c. 460–370 a.C.) utilizó alrededor de 400 plantas medicinales en sus tratamientos. Por ejemplo, recomendaba el *Salix alba* (sauce), que contiene salicina, un precursor de la aspirina moderna, para tratar el dolor y la fiebre.

Teofrasto (c. 371–287 a.C.), alumno de Aristóteles, escribió extensamente sobre las plantas en su obra Historia “Plantarum”, donde detallaba el uso de plantas como: *Crocus sativus* (azafrán) para trastornos respiratorios y plantas del género *Mentha* para aliviar dolores de cabeza y problemas digestivos, entre otras.

El trabajo más influyente en el ámbito de la farmacología griega provino de Dioscórides (c. 40–90 d.C.), quien escribió “De Materia Medica”, un tratado en cinco volúmenes que recopilaba información sobre más de 600 plantas medicinales, muchas de las cuales aún se utilizan hoy. En su obra mencionaba: al *Papaver somniferum* (amapola), fuente del opio, para tratar dolores intensos y la *Achillea millefolium* (milenrama), usada para curar heridas y detener hemorragias.

La tradición romana en el uso de plantas medicinales se desarrolló a partir de los conocimientos de las civilizaciones anteriores, especialmente la egipcia y la griega, pero los romanos lograron

sistematizar y difundir estos conocimientos, sentando las bases de la medicina y la farmacología occidental. Los romanos hicieron importantes contribuciones a la farmacología, en parte a través de la recopilación y organización de conocimientos previos. En Roma, los médicos eran tanto prácticos como teóricos, y se dedicaban al estudio de las propiedades medicinales de las plantas y su aplicación en la cura de enfermedades.

Plinio el Viejo (23-79 d.C.) fue uno de los más influyentes naturalistas y médicos romanos. En su obra *Historia Natural*, describió más de 1,000 plantas, muchas de las cuales tenían aplicaciones medicinales. Entre ellas se encuentran la *Salvia officinalis* (salvia), utilizada para problemas digestivos y como antiséptico y la *Pimpinella anisum* (anís), recomendado para aliviar problemas respiratorios y mejorar la digestión.

Galeno (131-210 d.C.) es otro médico romano notable, considerado el "Padre de la Farmacia". Esta denominación deriva de su aporte con un enfoque mucho más científico y experimental al uso de los recursos naturales, en comparación con el empirismo de épocas anteriores, convirtiéndose en una referencia médica fundamental que perduró durante siglos. En una época donde no existía un conocimiento preciso sobre la composición química de las plantas, él se centró en diseñar fórmulas rudimentarias pero estructuradas, combinando los ingredientes vegetales con excipientes como aceites, miel y vino para crear infusiones, decocciones, ungüentos y emplastos orientados a aliviar enfermedades. Fue precisamente esta pionera labor de mezclar y dosificar de forma natural lo que dio origen a las preparaciones

tradicionales conocidas popularmente como "galénicas", un legado que dio origen a las formas farmacéuticas actuales, consagrando su nombre para siempre en la historia de las Ciencias Farmacéuticas. Sus obras se basaron en la investigación y la experimentación. Describió el uso de del *Humulus lupulus* (lúpulo), utilizado como sedante y en el tratamiento de insomnio, también del *Petroselinum crispum* (perejil), que se empleaba tanto en la alimentación como en medicina para su efecto diurético.

Los romanos fueron pioneros en el desarrollo de la botica como un establecimiento especializado en la venta de medicamentos. Se producían fórmulas que combinaban diferentes plantas para tratar enfermedades específicas, lo que refleja un enfoque más científico en comparación con los curanderos de épocas anteriores. Un ejemplo de esta práctica es la creación de ungüentos a partir de mezclas de hierbas, como el ungüento de mirra, usado para tratar heridas y lesiones.

La influencia romana en el uso de plantas medicinales fue tan significativa que muchas de sus prácticas perduraron a lo largo de los siglos, incluso en la Edad Media y el Renacimiento. Los textos de Plinio y Galeno fueron referencias fundamentales para los médicos durante este período.

Las culturas americanas, especialmente las de Mesoamérica (aztecas y mayas) y América del Sur, desarrollaron una rica tradición en el uso de plantas medicinales, basadas en un profundo conocimiento de la flora local y en prácticas de sanación que han perdurado a lo largo de los siglos. Los pueblos indígenas utilizaron estas plantas no solo para

tratar enfermedades, sino también en ceremonias espirituales y rituales.

La civilización Azteca documentó el uso de más de 1,200 especies de plantas medicinales en el "Códice de la Cruz Badiano", que data de 1552. Algunas de las plantas utilizadas incluyen: Té de hierba buena (*Mentha spp*.), para aliviar problemas digestivos y la flor de cempasúchil (*Tagetes erecta*), empleada para tratar infecciones y en ceremonias funerarias.

Los Mayas tenían un sistema de medicina tradicional que incluía el uso de hierbas, rituales y masajes. Refieren el uso del *Croton lechleri* (sangre de drago), utilizado como antiinflamatorio y cicatrizante y la *Cichorium intybus* (achicoria) de utilidad para problemas digestivos y hepáticos.

Las civilizaciones andinas, como los incas, también tenían un vasto conocimiento de las plantas medicinales; utilizaban plantas como *Erythroxylum coca* (coca) para aliviar el cansancio y como analgésico, la que sí bien su uso está envuelto en la controversia moderna, para los incas era una planta sagrada y un elemento vital en su cultura. También se evidenció en uno del *Chenopodium quinoa* (quinua), no solo un alimento, sino también por su bondades nutricionales y medicinales.

Los pueblos indígenas de América del Norte también tenían una rica tradición en el uso de plantas medicinales, a menudo integrando la espiritualidad en su práctica de curación. Destaca el uso de *Artemisia tridentata* (artemisa) en ceremonias de purificación y como remedio para afecciones respiratorias; *Eucalyptus* spp (eucalipto) para tratar problemas respiratorios y como antiséptico; *Salvia apiana* (salvia)

utilizada en rituales de limpieza, aunque también se le atribuía efectividad contra los dolores de cabeza y problemas digestivos *Panax quinquefolius* o también conocido como Ginseng americano era aprovechado por varias tribus nativas para aumentar la energía y mejorar la resistencia.

A lo largo de la historia, el uso de plantas medicinales ha estado limitado por la falta de conocimiento científico, lo que permitía la explotación y el fraude en su comercialización. No obstante, a partir del siglo XVII, la farmacognosia experimentó un gran desarrollo, impulsado por los avances en química y la creación de normas para regular la calidad de las drogas vegetales.

A pesar del auge de los medicamentos sintéticos en el siglo XX, la medicina herbaria mantiene su vigencia y este auge se atribuye a una combinación de factores culturales, económicos, sociales y científicos. La búsqueda de alternativas a medicamentos sintéticos obedece a varias razones, las que comentan a continuación.

1. Muchos medicamentos sintéticos pueden tener efectos secundarios adversos, lo que ha llevado a pacientes a buscar alternativas naturales y menos invasivas.

2. La creciente preocupación por la resistencia a antibióticos y otros medicamentos ha impulsado el interés por tratamientos a base de plantas que pueden ofrecer eficacia sin fomentar esta resistencia.

3. La medicina natural a menudo se asocia con enfoques holísticos que consideran no solo los síntomas físicos, sino también el

bienestar emocional y espiritual del paciente. Se enfoca en la prevención de enfermedades y el mantenimiento de la salud, lo que atrae a personas que buscan mejorar su calidad de vida.

4. La validación científica de los usos tradicionales de ciertas plantas, lo que ha aumentado su aceptación en la medicina moderna.

5. El acceso a la información a través de plataformas digitales sobre medicina natural y plantas medicinales ha crecido exponencialmente, permitiendo a las personas educarse sobre estas opciones de tratamiento. En tal sentido se debe considerar aquella información que proviene de fuentes fiables, científicamente validadas como serían las publicaciones científicas en revistas indexadas con el correspondiente arbitraje realizado por especialistas.

6. En materia económica, en muchas partes del mundo, los tratamientos a base de hierbas son más accesibles y menos costosos que los medicamentos de origen sintético, lo que los convierte en una opción factible para personas con recursos limitados.

7. La posibilidad de cultivar y utilizar plantas medicinales en casa también ha promovido su uso, empoderando a las personas a cuidar su propia salud, lo que se relaciona con automedicación

8. La medicina a base de plantas es a menudo vista como una alternativa más sostenible en comparación con la farmacéutica

industrial, que puede tener un impacto ambiental negativo.

9. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reconocido la importancia de la medicina tradicional y la fitoterapia en la atención de salud global, promoviendo su integración en los sistemas de salud, sobre todo en la atención primaria.

Estos factores se entrelazan para crear un entorno favorable para el crecimiento de la medicina natural basada en plantas. Las personas están cada vez más dispuestas a explorar y adoptar tratamientos a base de hierbas como parte de su enfoque de atención de la salud, buscando opciones que sean más seguras, efectivas y alineadas con sus valores personales y culturales.

El interés renovado en los productos naturales se debe, en parte, a la búsqueda de nuevas estructuras químicas con mecanismos de acción eficaces y aplicaciones clínicas significativas. Las investigaciones que se han venido desarrollando reflejan un esfuerzo continuo por integrar el conocimiento tradicional con metodologías científicas modernas, con el objetivo de desarrollar nuevos fármacos y terapias más efectivas y seguras.

1.2 Definiciones y alcance de la farmacognosia

El término "Farmacognosia" fue introducido en 1815 por Aenotheus Seydler en su tesis doctoral *Analecta pharmakognostica*. Más adelante, Theodor Martius (1832) desempeñó un papel clave en la difusión de esta denominación a través de su obra clásica *Grundriss der Pharmakognosie des Pflanzenreiches* y de sus clases en la Universidad

de Erlangen (Alemania). Con el tiempo, el término "Farmacognosia" fue adoptado progresivamente por la comunidad científica, imponiéndose sobre otras denominaciones, en particular sobre "Farmacografía" (Dezani, 1920; Astrada, 1924; Ganzinger, 1979).

Los términos "Farmacografía" y "Farmacognosia" ya se utilizaban antes de las fechas mencionadas, aunque de manera informal. No obstante, ambos estuvieron siempre vinculados a la Materia Médica, ya que su propósito ha sido, desde sus inicios, el estudio de los vegetales, animales y minerales empleados en la elaboración de medicamentos o en su preparación (Ganzinger, 1979).

La "**Farmacognosia"** se define actualmente como la ciencia que estudia las características biológicas, bioquímicas, económicas y sociales de las drogas naturales y sus constituyentes. En este sentido, incluye tanto en el estudio de las drogas crudas de origen vegetal o animal, como de sus derivados naturales. Esta disciplina examina las sustancias naturales que se utilizan en la preparación de medicamentos, centrándose en su identificación, calidad, pureza, y los principios activos responsables de su acción terapéutica.

Según el *Handbuch der Pharmakognosie* (Manual de Farmacognosia), se clasifica la Farmacognosia en dos ramas: pura, científica o general y especial o aplicada

1.3 Farmacognosia pura, científica o general

Estudia en profundidad todos los aspectos relacionados con las drogas naturales desde diferentes enfoques, incluyendo cultivo y recolección,

importación y exportación de las drogas, su embalaje, morfología, anatomía y fisiología, los componentes y principios activos que la constituyen. Esta rama se subdivide, según Tschirch, en las disciplinas que se describen en la figura 2:

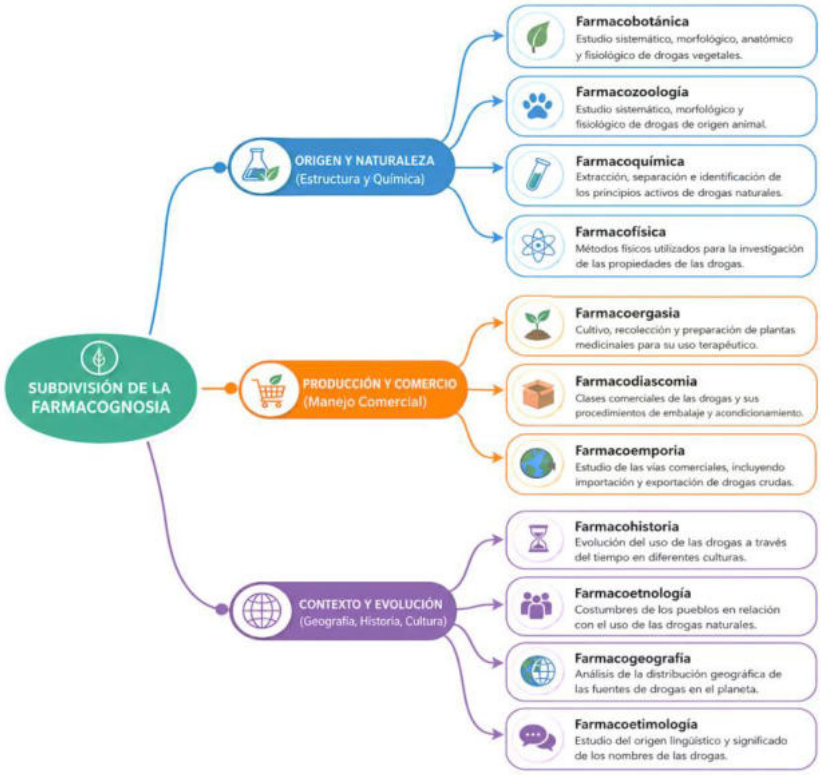


Figura 2. Subdivisión de la Farmacognosia en once disciplinas.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1.4 Farmacognosia especial o aplicada

En esta rama se estudian específicamente las drogas de forma individual, realizando una descripción completa que abarca su origen, composición química, propiedades farmacológicas, toxicología y sus

aplicaciones terapéuticas.

Droga: Se define como todo producto de origen natural que recolectado o separado de su medio tiene una composición y unas propiedades tales dentro de su complejidad que constituye la forma bruta de un medicamento. Tres ejemplos que ilustran esta definición serían:

Hojas de *Digitalis purpurea* (dedalera), este órgano de la planta se cosecha por el contenido de glucósidos cardiotónicos como la digoxina, los que aún hoy son utilizados en el tratamiento de insuficiencia cardíaca.

El rizoma de *Zingiber officinale* (jengibre) contiene compuestos bioactivos como los gingeroles y shogaoles, responsables de sus efectos antiinflamatorios y digestivos.

La corteza del árbol *Cinchona spp.* (quina) es rica en alcaloides como la quinina, la que históricamente se ha empleado en el tratamiento de la malaria.

Droga cruda: Se refiere a sustancias naturales que aún no han sido sometidas a procesos industriales o de refinamiento. Son los productos tal y como se encuentran en la naturaleza o después de un procesamiento mínimo (secado, triturado), para un correcto empaquetamiento y preservación hasta el preciso momento de utilización en la en investigación o fabricación de medicamentos o tratamientos tradicionales. Por ejemplo, hojas secas de plantas medicinales o cortezas de árboles. Se debe resaltar que no incluye ningún producto que haya sido mezclado artificialmente con otras

sustancias o cuya estructura molecular haya sido alterada. En este sentido se toma como ejemplo a las flores secas de *Matricaria chamomilla* (manzanilla). Las flores de la manzanilla, recolectadas y secadas sin alteraciones químicas, se consideran una droga cruda. Se utilizan en infusiones y como materia prima en la extracción de compuestos como los flavonoides y aceites esenciales con propiedades antiinflamatorias y digestivas.

Corteza seca de *Salix alba* (sauce blanco) contienen salicina, un precursor natural del ácido acetilsalicílico (aspirina). En su estado seco y triturado, sin haber sido sometida a procesos de extracción o síntesis química, se clasifica como droga cruda. Por otra parte, la raíz seca de *Valeriana officinalis* (valeriana) se emplea por su contenido en ácidos valerénicos y otros compuestos sedantes. Sin modificaciones químicas, en su estado seco y triturado para facilitar su uso en infusiones o extractos, es un claro ejemplo de droga cruda.

Materia Prima: Es toda droga o producto de origen natural destinada a la extracción de principios activos o a la elaboración de formulaciones para su administración. A menudo las drogas crudas se utilizan como agentes terapéuticos, pero en su mayoría se emplean para la obtención de sus principios activos.

En la Industria farmacéutica, el rizoma de *Dioscorea spp.* (ñame silvestre), se utiliza como materia prima para la extracción de diosgenina, un precursor de corticosteroides y hormonas sintéticas como la progesterona, empleadas en anticonceptivos y terapias hormonales.

Para la Industria cosmética las semillas de *Theobroma cacao* (cacao), son de gran utilidad ya que a partir de ellas se obtiene manteca de cacao, utilizada en cremas hidratantes, bálsamos labiales y productos dermatológicos, aprovechando sus propiedades emolientes y antioxidantes. En el campo de los alimentos funcionales y nutracéuticos, son muy apreciados los frutos de *Vaccinium myrtillus* (arándano negro), debido al contenido en antocianinas, metabolitos con propiedades antioxidantes, por lo que es materia prima para la salud ocular.

Fármaco: Es el componente químico, cualquiera que sea su fuente (natural o sintético), que ejerce la acción terapéutica deseada. El fármaco es responsable del efecto biológico o farmacológico en el organismo por lo que se le puede denominar también ingrediente farmacéutico activo, principio activo y en el ámbito fitoquímico, metabolito especializado o metabolito secundario. Estos compuestos químicos son los que se aíslan o sintetizan y se utilizan en la elaboración de medicamentos. Para ilustrar el término, la morfina es un alcaloide extraído del opio (látex que se extrae de los bulbos verdes del *Papaver somniferum*), es un principio activo utilizado para el alivio del dolor intenso y al que suele reconocérsele dentro del grupo de los alcaloides opiáceos. El ácido ursólico, **es** un compuesto triterpénico pentacíclico presente en plantas como *Salvia rosmarinus* (romero) y *Malus domestica* (manzana). Se ha estudiado por sus efectos antiinflamatorios, hepatoprotectores y su potencial en la lucha contra el cáncer. La curcumina es un polifenol extraído del rizoma de *Curcuma longa* (cúrcuma) con investigaciones asociadas a sus propiedades antiinflamatorias, antioxidantes y neuroprotectoras, de interés para

enfermedades como la artritis y el Alzheimer.

Medicamento: Es una preparación farmacéutica que contiene uno o más principios activos (fármacos) y excipientes, formulada para ser administrada de manera controlada en el organismo con el fin de prevenir, diagnosticar, aliviar o curar una enfermedad. El medicamento es el producto final que llega al paciente, y puede ser en forma de comprimidos, cápsulas, jarabes, inyecciones, entre otros.

1.5 Relación de la farmacognosia con otras ciencias

La farmacognosia tiene un enfoque multidisciplinario, ya que se interrelaciona con diversas ramas del conocimiento. Para desarrollar esta disciplina, es fundamental la interacción con áreas afines, tales como la Química Farmacéutica, las Ciencias Biomédicas y la Tecnología Farmacéutica.

Esta ciencia se encarga de estudiar el origen de las materias primas farmacéuticas de origen vegetal o animal, identificando la especie de donde provienen, su procedencia geográfica y sus rutas comerciales. Colateralmente, establece sus características anatómicas, químicas y fisicoquímicas, estableciendo su composición cualitativa y cuantitativa, sus posibles alteraciones, así como los métodos y épocas óptimas de recolección.

Algunas de las disciplinas con las que se correlaciona la Farmacognosia se describen a continuación.

Botánica: La farmacognosia depende en gran medida de la botánica para el estudio de las plantas medicinales. La identificación,

clasificación y caracterización de las especies vegetales es esencial para obtener información sobre su potencial terapéutico. La botánica farmacéutica o también llamada farmacobotánica, se centra en la identificación taxonómica de estas, las características morfológicas, su distribución en la naturaleza, los valores económicos y los usos tradicionales de las plantas medicinales.

Química: Esta disciplina se enfoca en el estudio de los compuestos bioactivos o metabolitos especializados presentes en las plantas, tales como alcaloides, flavonoides, terpenoides entre otros, responsables de sus efectos terapéuticos. Es imprescindible el conocimiento de las propiedades físico-químicas asociadas a cada molécula para garantizar la calidad, eficacia y seguridad de la materia prima natural y consecuentemente de las preparaciones farmacéuticas que se elaboren con estas.

Ciencias biomédicas: En este contexto se reúnen aquellas disciplinas científicas cuyo enfoque principal es la biología de la salud y las enfermedades. **S**e apoya de las ciencias básicas pertinentes como la anatomía y la fisiología, biología celular, la bioquímica, microbiología, la biología molecular, entre otras.

Farmacología: La farmacología estudia cómo los compuestos activos de las plantas afectan al cuerpo humano, lo que guarda relación con la farmacognosia. El estudio de los efectos biológicos de las plantas medicinales a nivel molecular, celular y sistémico es fundamental para entender su mecanismo de acción y su aplicabilidad en tratamientos médicos.

Ciencias ambientales: Dado que la farmacognosia involucra el estudio de recursos naturales, está vinculada con las ciencias ambientales. La sostenibilidad y conservación de las plantas medicinales, así como el impacto ecológico de su recolección y producción, son aspectos clave en esta correlación. Permite conocer las implicaciones éticas y ecológicas del uso de recursos naturales en la farmacoterapia.

1.6 La Farmacognosia dentro del pensum académico de un Farmacéutico, Bioquímico-Farmacéutico o Químico Farmacéutico

El estudio de la Farmacognosia es fundamental en la formación de los profesionales relacionados con el mundo de los medicamentos, debido a que muchos de ellos contienen como ingredientes activos sustancias de origen natural. Un farmacéutico debe prepararse en el campo de la farmacognosia y en particular de la fitoquímica porque estas disciplinas le proporcionan conocimientos esenciales sobre el origen, composición, propiedades y aplicaciones de los productos naturales o metabolitos especializados con actividad biológica. La fitoquímica proporciona herramientas para el análisis químico de metabolitos especializados en plantas medicinales, asegurando la calidad, seguridad y eficacia de los fitomedicamentos.

La Farmacognosia como asignatura en el plan de estudios proporciona una formación multidisciplinaria que capacita a los profesionales para desempeñarse en diversas áreas, tales como:

Farmacia comunitaria: Permite una adecuada dispensación y asesoría

sobre el uso de fitoterapéuticos o medicamentos que estén elaborados con algún principio activo de origen natural. Puede evaluar interacciones entre fitofármacos y medicamentos sintéticos, evitando efectos adversos.

Industria farmacéutica, alimentaria o cosmética: Facilita la investigación, diseño y desarrollo de nuevos productos a partir de fuentes naturales.

Análisis de medicamentos: Contribuye al control de calidad y estudios de estabilidad de productos farmacéuticos naturales.

Investigación y docencia: Fomenta la generación de nuevo conocimiento y la formación de futuros profesionales en el área.

El estudiante podrá adquirir habilidades en la identificación y caracterización de principios activos, proporcionándole destrezas para reconocer y analizar compuestos bioactivos en productos naturales, de esta manera ayudará en la comprensión de los medicamentos de origen natural. Aprenderá a desarrollar técnicas de extracción y purificación, que propicien la obtención de los metabolitos especializados de manera eficiente, garantizando la preservación de sus propiedades originales. Se familiarizará con los métodos que permitan el control de calidad ya sea de las drogas crudas o de los extractos, estableciendo criterios para asegurar la pureza y eficacia de los productos naturales utilizados fundamentalmente en terapéutica. Adicionalmente, un farmacéutico con formación en farmacognosia puede participar en la regulación y certificación de productos herbales. La farmacognosia moderna, combinada con técnicas de biotecnología y química analítica, facilita la

búsqueda de nuevas moléculas bioactivas.

En resumen, la formación en farmacognosia y fitoquímica es fundamental para que el farmacéutico pueda desempeñarse en investigación, desarrollo, regulación y asesoramiento sobre productos naturales, contribuyendo a la seguridad y eficacia en su aplicación terapéutica. La inclusión de la farmacognosia en la formación de farmacéuticos, bioquímico-farmacéuticos y químicos farmacéuticos es crucial para desarrollar competencias en el manejo de medicamentos de origen natural, desde su identificación y análisis hasta su aplicación terapéutica, contribuyendo así a una práctica profesional integral y basada en el conocimiento científico.

CAPÍTULO II

2 LA BOTÁNICA APLICADA A LA FARMACOGNOSIA

En este capítulo 2, se presentan los aspectos fundamentales de la botánica aplicados en los estudios farmacognósticos de las drogas vegetales. Como elemento introductorio se destaca el concepto de botánica, las principales áreas de estudio y su importancia en el campo de las plantas medicinales. Se hace referencia a la clasificación, nomenclatura, principios básicos de taxonomía y nomenclatura botánica, así como a la aplicación de herramientas moleculares, bases de datos y software que han permitido a los investigadores abordar los desafíos relacionados con la identificación de especies vegetales con mayor eficiencia y precisión. Además, se destaca el papel de los herbarios para la botánica y la sistemática en la identificación y conservación de especies. Por otra parte, se detallan las principales características macroscópicas y microscópicas de los diferentes órganos de una planta (raíz, tallo, hojas, flores, frutos y semillas) relevantes para la farmacognosia, el examen e identificación de drogas crudas y la histoquímica en la detección microscópica de compuestos químicos en las células y tejidos de especies vegetales. Se aborda el tema de Farmacoergasia dirigida hacia los métodos de recolección, cultivo, conservación (secado), embalaje y almacenamiento de plantas medicinales. Finalmente, se plantean las principales normativas para el control de las drogas vegetales, haciendo hincapié en los diferentes parámetros cualitativos y cuantitativos necesarios para garantizar la calidad, eficacia, seguridad, estabilidad y reproducibilidad de las drogas vegetales. El estudio de la botánica aplicada a la farmacognosia

implica una combinación de observación, experimentación, análisis de datos y colaboración interdisciplinaria, que permite investigar las plantas desde diferentes perspectivas. La correcta identificación de las plantas es vital para garantizar la eficacia y seguridad de los medicamentos derivados de ellas, y la clasificación taxonómica basada en metabolitos o especializados facilita el descubrimiento de nuevos compuestos bioactivos para el desarrollo de fármacos.



Figura 3. Botánica aplicada a la farmacología del campo al control de calidad.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

2.1 Introducción a la Botánica: Importancia de la botánica en el estudio de plantas medicinales

La botánica, como muchas otras ciencias, alcanzó la primera expresión definida de sus principios y problemas en la Grecia clásica y posteriormente, continuó su desarrollo durante la época del Imperio romano. Históricamente, es una rama de la biología que proviene del griego βοτάνη, 'hierba' que aborda el estudio de los organismos

vegetales en todas sus formas y complejidades.

La botánica abarca desde las células menos evolucionadas pertenecientes al dominio de los procariotas, como son las cianobacterias (algas verde azules), hasta aquellos pertenecientes al dominio Eucariota en los Reinos: Protozoa (hongos mixomicetos, algas del tipo *Euglena*), Chromista (como diatomeas, dinoflagelados, algas pardas, entre otros), Plantae [plantas terrestres: briófitos, helechos, plantas vasculares con semillas (gimnospermas y angiospermas), así como las algas verdes y algas rojas] y Fungi (hongos y hongos liquenizados). En este sentido, la botánica abarca el estudio científico de la fisiología vegetal, la diversidad, la estructura, la clasificación, la genética, la ecología, la distribución, la importancia económica y la biotecnología.

La Botánica comprende diversas áreas de estudio, entre las que se pueden citar:

- **Morfología:** se ocupa de la estructura y forma de las plantas e incluye subdivisiones como la *citología* (estudio de las células), *histología* (estudio de los tejidos), *anatomía* [estudio de la organización de los tejidos en los órganos de la planta; morfología reproductiva; el estudio de los ciclos de vida y la morfología experimental o morfogénesis (formación de un organismo mediante procesos embriológicos de diferenciación de células, tejidos y órganos, y el desarrollo de sistemas de órganos de acuerdo con el modelo genético del organismo potencial y las condiciones ambientales)] .

- **Fisiología vegetal:** estudia los mecanismos y procesos que ocurren en las plantas y la interpretación del comportamiento de los vegetales.

- **Ecología vegetal:** se refiere de las relaciones e interacciones mutuas entre los organismos y su entorno físico. Los factores físicos de la atmósfera, el clima y el suelo afectan las funciones fisiológicas de las plantas en todas sus manifestaciones.

- **Taxonomía o sistemática vegetal:** trata sobre de la identificación y jerarquización de todas las plantas. Incluye la clasificación y nomenclatura, y permite al botánico comprender la amplia gama de diversidad y evolución vegetal.

Las técnicas de secuenciación masiva de *genomas* (material genético en un organismo), *transcriptomas* [conjunto de ácidos ribonucleicos mensajeros (ARNm) presentes en la célula en un momento determinado] y *proteomas* (conjunto de proteínas que se expresan a partir del genoma de una célula, tejido u organismo, en un momento y condición determinada), y la disección de *metabolomas* (conjunto de pequeñas moléculas denominadas metabolitos que se pueden encontrar en una muestra biológica) y *fenomas* (conjunto de fenotipos en una célula, tejido, órgano, organismo o especie), colectivamente conocidas como *técnicas ómicas*, han acelerado el estudio de plantas medicinales. El gran avance ha dado paso a la obtención de ingentes bases de datos, a su procesamiento y estudio mediante el desarrollo de potentes métodos analíticos, empleando nuevos métodos informáticos y sistemas de programación estadística, dando paso a nuevas líneas de

investigación.

Las tecnologías ómicas, aprovechan la secuenciación de genoma completo, así como la secuenciación del ácido ribonucleico (ARN) y el análisis del transcriptoma para identificar marcadores moleculares de especies y genes funcionales que controlan rasgos biológicos clave. También pueden ser útiles para analizar la estructura química, la vía metabólica y el patrón de regulación genética de los metabolitos especializados, lo que proporciona a los investigadores la oportunidad de comprender mejor la biosíntesis de productos naturales en las plantas y proporcionar apoyo teórico y técnico para desarrollar y utilizar los recursos vegetales.

Las nuevas exploraciones genómicas de la botánica han tenido lugar, principalmente, en plantas cultivadas, debido a su indudable interés económico, y en las denominadas *plantas modelo*, plantas silvestres con unos especiales atributos biológicos y genómicos que las convierten en dianas perfectas para estos estudios avanzados. Entre las características principales de las plantas modelo están el ser plantas anuales (de ciclo vital muy corto), autocompatibles, fáciles de germinar, cultivar, multiplicar y transformar, poseedoras de genomas de muy pequeño tamaño y con muy escaso porcentaje de ADN repetitivo. También han sido seleccionadas por hallarse evolutivamente próximas a especies cultivadas, a las cuales pueden transferirse los resultados obtenidos en ellas (por ejemplo, respuestas a estrés biótico y abiótico, y sus mecanismos de regulación génica).

En términos generales se puede plantear que la botánica estudia las

plantas, en sentido amplio, incluyendo a las algas, hongos y organismos fotosintéticos no necesariamente clasificados como plantas. Incluye la descripción, clasificación, distribución, identificación, estudio de reproducción, fisiología, morfología, relaciones recíprocas, relaciones con otros seres vivos y efectos provocados sobre el medio en el que se encuentran.

Los caracteres morfológicos, conjuntamente con el uso de las ómicas de alto rendimiento, proporcionan información importante para una comprensión más profunda, completa y sistemática de las plantas medicinales, ofreciendo mayores posibilidades para la innovación y la mejora de las especies. Adicionalmente, la botánica desempeña un papel fundamental en la identificación de componentes químicos de las plantas, la discriminación de especies y el estudio de los cambios en los componentes tras el procesamiento.

La botánica tiene una gran importancia en el estudio de las plantas medicinales ya que mediante la taxonomía y la sistemática vegetal permite su identificación, clasificación y nomenclatura de forma adecuada. También es posible mediante el empleo de diversas fuentes de datos profundizar en el conocimiento de especies vegetales, desvelando en varias de ellas su composición genética, sus orígenes y relaciones evolutivas, sus características biológicas y sus adaptaciones ecológicas.

2.2 Clasificación y nomenclatura de plantas medicinales. Herramientas moleculares

2.2.1 Principios básicos de taxonomía y nomenclatura botánica

La clasificación de las plantas es fundamental para identificar, preservar y gestionar las especies. El Reino Plantae incluye a los diferentes grupos de plantas caracterizadas por presentar células eucariontas, ser exclusivamente pluricelulares y fotosintéticas.

El Reino Plantae (figura 4) se clasifica en plantas vasculares y no vasculares, lo cual hace referencia a la presencia o ausencia de los tejidos de conducción, respectivamente. Los tejidos de conducción reciben el nombre de xilema y floema, el primero se encarga de transportar en las plantas vasculares el agua y sales minerales (de forma ascendente), mientras que el floema transporta los azúcares o nutrientes (tanto de forma ascendente como descendente).

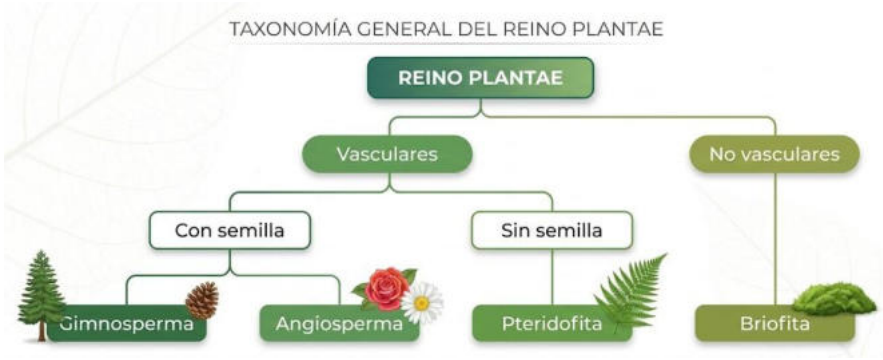


Figura 4. Clasificación de las plantas.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Las plantas vasculares se dividen en plantas con semillas y plantas sin semillas. Las plantas con semillas se dividen en gimnospermas y angiospermas, y las que no presentan semillas comprenden a las pteridofitas. En el grupo de las gimnospermas se encuentran el *Ginkgo biloba*, gnetales, cícadas y coníferas (pinos, ciprés, abetos, etc.), las

cuales se caracterizan, principalmente, por desarrollar, conos o estróbilos. Adicionalmente, comparten con las angiospermas el desarrollo de un crecimiento secundario y la reproducción por medio de semillas. Sin embargo, las gimnospermas se caracterizan por desarrollar "semillas desnudas" ubicadas entre las brácteas de los estróbilos. Mientras que en las angiospermas, las semillas son envueltas en un fruto carnoso. Las angiospermas son el único grupo que desarrollan flores verdaderas. Las pteridofitas están representadas por los helechos y licopodios, que comparten una reproducción por medio de esporas.

En el grupo de las plantas no vasculares se encuentran las briofitas y se clasifican en musgos, hepáticas (tienen forma parecida a un hígado) y antoceros (presentan una estructura alargada en forma de cuerno). Debido a que las briofitas carecen de tejidos de conducción, son plantas pequeñas y se localizan en lugares de gran humedad ambiental. También poseen conducción por capilaridad y se reproducen por medio de esporas.

El nombre de las plantas medicinales o plantas en general siguen el principio de la nomenclatura binomial, propuesta por Linneo en el año 1753, que constituye un sistema estándar utilizado para denominar las diferentes especies de organismos. Así, cada organismo identificado del planeta lleva un nombre científico formado por dos palabras. La primera palabra es el nombre del género y se escribe con letra inicial mayúscula y la segunda palabra es el nombre de la especie, se escribe en minúscula y se conoce como epíteto específico. Ambos nombres se escriben en latín y cursiva. De este modo, cada nombre binomial o

nombre científico solo puede representar a una especie. La ventaja de usar el latín es su reconocimiento universal.

En los nombres científicos de las especies, algunos de los epítetos revelan en ocasiones característica llamativa de la planta (Ej: *Solanum tuberosum*, papa, tubérculo; *Monotropha uniflora* L., cuyo nombre hace referencia a que la planta presenta una sola flor), dan información sobre el origen (geografía) (Ej: *Agapanthus africanus* (lirio africano), *africanus* (de África)), otros brindan información sobre el hábitat (Ej: *Acer campestre* (arce menor), *campestre* (de los campos)), el hábito (*Betula pendula* (abedul común), *pendula* (colgante)), las hojas (*Larix decidua* (alerce europeo), *decidua* (de hoja caduca)), las flores (Ej: *Malva parviflora* (malva), *parviflora* (flores pequeñas) e incluso los colores (*Populus alba* (álamo blanco), *alba* (blanco).

En los libros especializados, se añade a la denominación el nombre de la persona que lo describió por primera vez, generalmente en forma abreviada [Ej: *Tagetes lucida* Cav. (Cavanilles)]. Cuando se altera la categoría de un taxón o se transfiere a otra especie o género, se pone entre paréntesis el nombre del autor del "basónomo o basiónimo", seguido del nombre del autor de la nueva denominación. En el caso de una subespecie (subcategoría taxonómica de clasificación de los seres vivos con un rango inferior al de especie) la diferenciación puede estar marcada por cambios climáticos o físicos en el ambiente. Con la evolución, se pueden convertir en una nueva especie (Ej: *Iberis ciliata* subsp. *contracta*, conocida como carraspique). También se encuentra la variedad que es una planta que se da espontánea en la naturaleza y que presenta rasgos distintos de la especie típica, pero no se presentan

en poblaciones lo suficientemente grandes como para considerarlas especies (Ej: *Acer palmatum* var. *dissectum*).

Un nombre científico es una llave que te da acceso a un mundo de conocimiento, ya que al conocer el nombre de las plantas podemos encontrar un sinfín de información relacionada con ellas, por ejemplo, si contiene algún compuesto dañino o benéfico, si son comestibles o empleadas en la medicina tradicional, incluso si han sido plasmadas en alguna obra de arte.

Diversos autores a lo largo de la historia junto con la existencia de reuniones y congresos internacionales de Botánica han contribuido al establecimiento y aceptación de Códigos. En este sentido, se encuentra el **Código Internacional de Nomenclatura Botánica** que es un conjunto de reglas que rigen la asignación de nombres botánicos (nombres científicos) a las plantas. Dentro de los límites establecidos por ese código existe otro conjunto de reglas, el **Código Internacional de Nomenclatura para Plantas Cultivadas**, que se aplica a los cultivares de plantas que han sido deliberadamente alterados o seleccionados por los seres humanos (por ejemplo, jardines, granjas y plantas de interior).

Un cultivar es un miembro de una especie (Ejemplo: *Clematis alpina* 'Ruby': un cultivar dentro de una especie; el epíteto del cultivar está entre comillas simples y con letra inicial en mayúscula. Los cultivares se definen por sus características especiales (cierto color de la flor, forma de la hoja, sabor del fruto, entre otras) no por su origen.

El Código de Nomenclatura Botánica se aprueba en los congresos

internacionales periódicos de la *International Association for Plant Taxonomy* (Asociación Internacional de Taxonomía de Plantas). Las actualizaciones se llevan a cabo después de las reuniones de cada congreso, generalmente, indicando el código con el nombre de la ciudad sede del congreso. Así se tienen los códigos de parís, Berlín, Tokio, Missouri, entre otros.

El código vigente es el **Código Internacional de Nomenclatura para algas, hongos y plantas**, cuya edición se adoptó en Shenzhen, China en de 2018 y se nombra **Código de Shenzhen de 2018**. El más reciente se celebró en Madrid, España, en julio de 2024, denominado **Código de Madrid**. El código rige la nomenclatura de todos los organismos tradicionalmente tratados como algas, hongos o plantas, ya sean fósiles o no fósiles, incluyendo algas verdeazuladas (cianobacterias), quitridios, oomicetos, mohos mucilaginosos y protistas fotosintéticos con sus grupos no fotosintéticos taxonómicamente relacionados. Todos estos códigos establecen que cualquier nombre científico debe ser único e irrepetible, lo cual permitirá que se aplique por igual en cualquier país.

Cuando se habla de nomenclatura botánica hay que destacar también a la taxonomía vegetal, ambas están estrechamente relacionadas. La nomenclatura botánica es la denominación formal y científica de las plantas bajo ciertos códigos y reglas. La taxonomía vegetal es una disciplina que se ocupa de la identificación, denominación y categorización de las plantas y utiliza la clasificación jerárquica (categorías taxonómicas) para comprender y organizar la diversidad de organismos. Crea estas categorías analizando cómo se relacionan entre

sí, no solo morfológicamente, sino también genéticamente. Esto implica observar la morfología, la forma y la estructura de los organismos, y observar cuántas de estas características comparten los organismos de un grupo.

La especie es la unidad fundamental de la taxonomía biológica, sólo en relación con ella pueden definirse todas las demás categorías taxonómicas. También es muy importante la familia. Toda planta individual debe pertenecer a una **especie**, toda especie a un **género**, todo género a una **familia**, toda familia a un **orden**, este a una **clase**, esta a una **división** y a un **Reino**. Las categorías principales se pueden agrupar o dividir en otras intermedias o subordinadas, como subfilo (división de un filo), superfamilia (agrupación de familias), tribu (división entre subfamilia y género), subespecie (división de una especie), entre otras. En la Tabla 1 se muestran las principales categorías taxonómicas.

La taxonomía es crucial para la conservación de especies en peligro de extinción, ya que identificar y clasificar las especies con precisión es necesario para establecer prioridades de conservación y proteger la biodiversidad. Con la llegada de técnicas moleculares como el código de barras de ADN, la precisión y la velocidad de la identificación de plantas han mejorado enormemente, lo que permite una clasificación precisa e incluso el análisis de especies complejas y la identificación de especies crípticas (especies con una morfología aparente idéntica o casi idéntica, pero genéticamente distintas y reproductivamente aisladas).

Tabla 1. Principales categorías taxonómicas.

Categorías taxonómicas (castellano, latín, abreviatura)	**Terminación**	**Ejemplo** (ejemplo, sinónimo)
Reino (regnum)	-ota	Plantae
Subreino (subregnum)	-bionta	Cormobionta
División (phylum)	-phyta	Spermatophyta
Subdivisión (subphylum)	-phytina	Magnoliophytina (Angiospermae)
Clase (classis)	-atae (-phyceae, -mycetes, -opsida)	Liliopsida (Monocotiledóneas)
Subclase (subclassis)	-idea	Liliidae
Superorden (superordo)	-anae	Bromelianae
Orden (ordo)	-ales	Bromeliales
Familia (familia)	-aceae	Bromeliaceae

Subfamilia (subfamilia)	-oideae	Bromelioideae
Tribu (tribus)	-eae	
Género (genus)		*Ananas*
Sección (sectio, secc., sect.)		
Serie (series, ser.)		
Especie (species, esp., spec. o sp.)		*Ananas comosus* (L.) Merr.
Subespecie (subespecies, subsp. o ssp)		
Cultivar (c.v.)		*Ananas comosus 'Cayenne'*

En el campo de la taxonomía destaca la quimiotaxonomía, que utiliza las características químicas de una planta para clasificarlas, también distingue entre especies estrechamente relacionadas y diferencia taxones intraespecíficos como subespecies y variedades, lo que respalda el uso seguro y eficaz de las plantas en la medicina herbaria. Los metabolitos especializados clave utilizados en la identificación quimiotaxonómica incluyen alcaloides, fenoles (flavonoides, taninos), terpenoides, péptidos vegetales, entre otros.

El fenómeno de exclusión metabólica entre antocianinas y betalaínas es un principio fundamental en quimiotaxonomía que demuestra cómo la fitoquímica refleja la evolución genómica. Aunque ambos pigmentos comparten roles ecológicos como la fotoprotección y la atracción de polinizadores, sus rutas biosintéticas son divergentes. En la naturaleza, ninguna especie sintetiza simultáneamente estos metabolitos; las antocianinas derivan de la vía de los flavonoides, mientras que las betalaínas son compuestos nitrogenados derivados de la tirosina. Este fenómeno es indispensable para la sistemática vegetal, ya que permite delimitar con precisión el orden Caryophyllales. De este modo, la presencia de betalaínas actúa como un marcador inequívoco para familias como Cactaceae y Amaranthaceae, diferenciándolas de las Caryophyllaceae, que se distinguen por sintetizar antocianinas. Esto confirma que el perfil de metabolitos especializados es una herramienta importante para la clasificación cuando la morfología resulta insuficiente.

La taxonomía clásica de plantas enfatiza el uso de rasgos morfológicos estables, mínimamente influenciados por factores ambientales, excluyendo los caracteres con alta plasticidad fenotípica. Sin embargo, en la práctica, especialmente al tratar con materiales vegetales comercializados, a menudo presentados como formas molidas o fragmentadas que carecen de órganos diagnósticos clave, la identificación fiable mediante morfología macroscópica se vuelve difícil. En estos casos, las características anatómicas microscópicas, los marcadores moleculares (métodos basados en ADN) y el perfil químico pueden proporcionar métodos de identificación más robustos y precisos, en particular para plantas medicinales, donde la

autenticación precisa es crucial.

2.2.2 Aplicación de herramientas moleculares (DNA barcoding)

En los últimos años, se ha desarrollado un enfoque novedoso basado en el uso de herramientas moleculares para la identificación de plantas. En este sentido, el código de barras de ADN proporciona un método fiable y rápido para estos fines. Dado que el ADN no se ve afectado por factores externos ni ambientales, es estable y se puede encontrar en todos los tejidos, por lo que este método puede ser muy útil. Los códigos de barras de ADN son secuencias estandarizadas, idealmente únicas, codificantes o no codificantes, ya sea del genoma del organismo o de sus orgánulos, que se utilizan para identificar/clasificar un grupo de organismos.

En resumen, el método incluye la amplificación del código de barras de ADN, la secuenciación y la comparación con una base de datos de referencia que contiene las secuencias relevantes de diferentes especies. Lo anterior, permite una identificación precisa a nivel de especie, de aquellas morfológicamente similares o cuando solo se dispone de especímenes de plantas incompletos, incluso en casos donde las características morfológicas están ausentes o son ambiguas.

Al facilitar la catalogación de especies, los códigos de barras de ADN contribuyen a la conservación de la biodiversidad vegetal, especialmente, en regiones con una flora rica pero poco estudiada. La codificación de barras, junto con las herramientas computacionales y las bases de datos genómicas globales surgidas a raíz de ello, ha permitido a los investigadores abordar los desafíos relacionados con la

identificación de especies con mayor eficiencia y precisión, impulsando avances significativos en la biología vegetal y la investigación botánica.

Entre los principales códigos de barra de ADN utilizados en plantas se encuentran:

2.3 Códigos de barras de ADN del genoma nuclear

ITS *(Espaciador Transcrito Interno)* se define como el ADN espaciador no codificante ubicado entre los ARN ribosómicos de subunidad pequeña y subunidad grande, que consta de las subregiones ITS1 e ITS2, las cuales se diferencian en el sitio de ubicación dentro del ARN. La región ITS2 es más fácil de amplificar; está conservada, por lo que facilita el diseño de cebadores universales; es más corta, por lo tanto, más fácil de secuenciar; y, debido a su alta diversidad, puede utilizarse para distinguir especies estrechamente relacionadas.

La secuencia ITS es la región del ARNr de más rápida evolución en muchos organismos; es uno de los marcadores más empleados en diferentes organismos para análisis filogenético e identificación de especies (hongos y plantas); muestran una mejor resolución para la diferenciación de especies que otros códigos de barras; es un marcador nuclear universal y no necesita ser clonado. Es lo suficientemente variable para identificar familias, géneros, especies y grandes poblaciones de plantas.

En plantas medicinales (*Mimusops coriacea*, *Malva sylvestris*, *Malva pseudolavatera* y *Smilax purhampuy*), las secuencias ITS (ITS1 y/o

ITS2) mostraron una mejor resolución para la identificación o diferenciación de especies que otros códigos de barras, como rbcL o matK. Códigos de barras del ADN del cloroplasto

Los códigos de barras del ADN de los genes del cloroplasto se utilizan ampliamente en estudios filogenéticos de plantas. El diseño de cebadores es sencillo, el orden de los genes en el genoma del orgánulo se conserva y la amplificación es mucho más sencilla debido al alto número de copias por célula. Sin embargo, en comparación con los genes del genoma nuclear del cloroplasto, se caracterizan por una baja tasa evolutiva. Entre los marcadores de cloroplastos, se han utilizado con éxito los siguientes:

matK *(maturasa K)* es uno de los genes de cloroplastos de más rápida evolución, que se ha utilizado para la identificación a nivel de familia, género y especie. Este código presenta divergencia interespecífica y una baja tasa de transición/transversión. Sin embargo, su uso como código de barras universal de ADN se ve obstaculizado por problemas técnicos, principalmente el diseño de los conjuntos de cebadores universales, debido a la alta tasa de sustitución. No obstante, matK constituye un marcador adecuado para la identificación de angiospermas, plantas con flores, briofitas, licofitas, gimnospermas y monilofitas.

rbcL *(subunidad grande de la ribulosa bisfosfato carboxilasa/oxigenasa)* ha sido uno de los más estudiados en el genoma de plástidos, con una amplia representación de todos los grupos principales y numerosas secuencias disponibles en GenBank.

Fue el primer gen secuenciado del genoma del cloroplasto vegetal y codifica la subunidad grande de la rubilosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa, una enzima fotosintética crucial. Este marcador es fácil de amplificar y secuenciar, pero presenta una tasa evolutiva lenta. Es un locus candidato para la comparación a nivel de familia y género; sin embargo, no es adecuado para la tipificación de especies debido a su modesto poder discriminatorio También se utiliza ampliamente para la identificación de algas, peptidofitas y angiospermas.

trnH-psbA es uno de los loci plastídicos no codificantes más variables, con un espaciador intergénico adecuado para ofrecer un alto nivel de discriminación de especies. Se amplifica fácilmente con cebadores universales, pero debido a sus altas tasas de inserción (agrega uno o más nucleótidos al gen)/deleción (elimina al menos un nucleótido del gen), la alineación puede ser difícil. Además, su longitud varía entre las diferentes familias. La mayoría de los investigadores han propuesto que trnH-psbA se utilice en combinación con uno o más loci (posición de un gen o de un marcador genético) para proporcionar una resolución. No obstante, se ha demostrado que es un marcador adecuado para plantas con flores y peptidofitas.

rpoB *(subunidad B de la ARN polimerasa) y rpoC1 (subunidad C1 de la ARN polimerasa)* son genes que codifican subunidades de la ARN polimerasa de plástidos y se han utilizado para la identificación a nivel de familia. Sin embargo, debido a su lenta evolución, no pueden utilizarse para la discriminación de especies en muchas familias de plantas. Ambos pueden amplificarse eficientemente con un rango

limitado de condiciones de PCR (reacción en cadena de la polimerasa) y conjuntos de cebadores. Son marcadores adecuados para la tipificación de briofitas.

trnL-trnF *(Espaciador Genético, Intrón e Intergénico)* se encuentra en la gran región de copia única del genoma del cloroplasto y se ha propuesto como un amplicón (fragmento de ADN amplificado por PCR) universal de plástidos. A pesar de su lenta evolución molecular, trnL del plástido se sugiere como un posible marcador debido a sus sitios conservados; por lo tanto, podría ser una herramienta útil para estudios evolutivos a niveles taxonómicos superiores.

psbK-psbI *(Espaciador Intergénico)* codifican dos polipéptidos de bajo peso molecular, K e I, del fotosistema 2. El espaciador intergénico psbK-psbI, no codificante, se conserva y puede amplificarse fácilmente mediante PCR, secuenciarse y alinearse. Además, presenta un alto poder discriminatorio, pero baja calidad y universalidad de secuencia. No obstante, constituye un marcador adecuado para la identificación de briofitas, licofitas y monilofitas.

atpF-atpH *(Espaciador Intergénico)* podría utilizarse como marcador universal de código de barras de ADN para la identificación a nivel de especie, pero su poder discriminatorio es medio. La longitud de las secuencias atpF-atpH es variable y su alineamiento es difícil a pesar de la fácil amplificación por PCR. Por esta razón, podría ser útil únicamente como marcador complementario en el código de barras de ADN de plantas, proporcionando una mejor resolución en proyectos específicos y grupos taxonómicos.

2.4 Locus único, locus múltiple y combinaciones de genes viables

La idea principal del código de barras de ADN es utilizar una secuencia de ADN presente idealmente en cada organismo para identificarlo. Un requisito previo para este enfoque es la generación de una base de datos de referencia que contenga las secuencias relevantes de diferentes especies. Ningún locus cumple con los estándares y directrices de datos del Consorcio para el Código de Barras de la Vida (CBOL), una iniciativa internacional dedicada al desarrollo del código de barras de ADN como estándar global para la identificación de especies biológicas.

Según el Grupo de Trabajo de Plantas del CBOL, para identificar muestras desconocidas, las combinaciones de marcadores más comunes son las secuencias matK, rbcL, rpoB, rpoC1, atpF-atpH, psbK-psbI y trnH-psbA. Se recomienda el uso de estos marcadores, ya que pueden amplificarse con conjuntos de cebadores universales y contienen suficiente información sobre la diversidad de secuencias, tanto individualmente como en combinación, para discriminar entre especies. Además de estos genes, se han propuesto otros candidatos, como ITS, ITS2, trnL y combinaciones de ellos, que pueden mejorar considerablemente la discriminación de especies.

2.5 Supercódigo de barras

La secuencia completa del genoma de cloroplasto se ha propuesto como un supercódigo de barras para resolver problemas filogenéticos. Al ofrecer mayor diversidad, permite la discriminación entre plantas estrechamente relacionadas, aunque las secuencias de uno o varios

genes nucleares y de cloroplasto han demostrado ser útiles para ello. La creación de una base de datos completa del genoma de cloroplasto, la reducción del coste de secuenciación y la obtención de una mejor calidad y cantidad de ADN son la clave del supercódigo de barras.

2.6 Código de barras específico

Un código de barras específico es un fragmento de una secuencia de ADN con una tasa de mutación lo suficientemente alta como para permitir la identificación de especies dentro de una categoría taxonómica específica. El inconveniente es los códigos de barras de un solo locus no ofrecen suficientes variantes, por lo que los investigadores propusieron su combinación con los supercódigos de barras, para resolver el problema mencionado. Los códigos de barras específicos se seleccionan directamente de las secuencias genómicas de plástidos de la familia o género objetivo, lo que elimina problemas técnicos como la baja eficiencia de la PCR o una optimización exhaustiva que puede consumir mucho tiempo y recursos.

2.7 Minicódigo de barras

El minicódigo de barras de ADN utiliza una secuencia de ADN más corta que los códigos de barras convencionales, se puede amplificar fácil y rápidamente. El objetivo principal es identificar especies específicas de plantas herbáceas para evitar la adulteración de productos herbáceos naturales. Sin embargo, en el caso de mezclas herbáceas complejas, por ejemplo, a partir de diez especies diferentes, el minicódigo de barras es un desafío. Es fundamental considerar la posición y la longitud de la secuencia específica del minicódigo de

barras para distinguir entre varias especies, ya que ciertas secuencias de ADN pueden contener sitios de mutación inestables.

2.8 Metacódigo de barras

Es un método para identificar numerosas especies en una sola muestra ambiental. El uso de cebadores de PCR universales permite amplificar simultáneamente múltiples códigos de barras de ADN. A diferencia del código de barras de ADN tradicional, que intenta identificar especímenes intactos hasta el nivel de especie, el metacódigo de barras busca identificar en diversas muestras o en muestras de ADN degradado, como muestras ambientales (eADN), hasta el nivel de familia o superior. El metacódigo de barras representa un enfoque versátil y preciso para analizar matrices alimentarias y detectar adulterantes o contaminantes en análisis forenses y ecológicos.

A modo de resumen se puede plantear que los códigos de barras de ADN son secuencias estandarizadas, idealmente únicas, codificantes o no codificantes, ya sea del genoma del organismo o de sus orgánulos. Estos códigos se utilizan para identificar/clasificar un grupo de organismos mediante la comparación con una base de datos de referencia que contiene las secuencias relevantes de diferentes especies.

En plantas, hasta ahora no se ha logrado el uso de un código de barras de ADN universal. Los estudios se realizan a partir de genomas de cloroplastos y nucleares (ITS, rbcL, trnH-psbA, rpoB, rpoC1, trnL-trnF, psbK psbI y atpF-atp) con buenos resultados, principalmente, la combinación entre ellos, para grupos de organismos específicos. El

futuro de los códigos de barras de ADN en plantas reside en la secuenciación mediante la generación de secuencias muy largas. Los supercódigos de barras, como el genoma del cloroplasto, se están utilizando con éxito, especialmente para distinguir entre especies cercanas. Estos avances prometen una adopción generalizada, mejorando la precisión de la codificación de barras del ADN vegetal en la discriminación de especies y las evaluaciones de la biodiversidad.

2.8.1 Bases de datos y software para la identificación de especies

Un recurso valioso que ayuda a la identificación de las plantas medicinales son las bases de datos en este campo, las cuales aportan información sobre sus especificaciones, taxonomía, nombres comunes, ubicación, usos medicinales y partes utilizadas. También brindan información científica moderna, incluyendo propiedades fisicoquímicas, ingredientes, información genómica y mecanismos de acción. Todos los datos se almacenan en formato de texto y/o imágenes.

Las bases de datos de plantas se clasifican según características específicas, como el tipo de contenido, las instalaciones/características y el estado de la URL (localizador uniforme de recursos, direcciones únicas de las páginas web):

1- Bases de datos fitoquímicas: brindan información sobre estructuras/propiedades moleculares. Las características e ingredientes relacionados con la absorción, distribución, metabolismo, excreción y toxicidad se han recopilado en estas bases de datos, así como aspectos etnobotánicos y taxonómicos de las plantas. Por ejemplo:

Phytochemical and Ethnobotanical Databases (PEB), Indian Medicinal Plants, Phytochemistry and Therapeutics

2.0 (IMPPAT 2.0), Phytochemical and Drug Target DataBase (PDTDB), Phytochemica (una plataforma para explorar fitoquímicos de plantas medicinales), Online Structural and Analytic based Database for Herbs of India (OSADHI), entre otras.

2- Bases de datos farmacológicas: brindan información sobre los efectos farmacológicos y la utilidad tradicional de las plantas medicinales. Ejemplo de ellas se tienen: HerbMed, Herb Database (Herbal Medicine Resource), entre otras.

3- Bases de datos etnobotánicas: ayudan al conocimiento tradicional, a escala internacional o local, y facilitan la gestión de datos y el intercambio de información con otros investigadores. Ejemplos: African Ethnobotany Database (AEDB), Medicinal Plant Database (MPDB), Global Plant Council's Ethnobotany Database, entre otras.

4- Bases de datos clínicas: brindan información sobre plantas con propiedades medicinales, como DIMPSAR: Conjuntos de datos para el análisis de especies de plantas medicinales de la India, PubMed, entre otras. Estas bases de datos ofrecen conocimiento sobre diversas características de las plantas medicinales, incluyendo sus nombres botánicos, nombres vernáculos, usos medicinales y más.

5- Bases de datos globales: ofrecen información sobre diversas especies vegetales de todo el mundo. Ejemplo: The Plant List, Global

Biodiversity Information Facility (GBIF), entre otras.

6- Bases de datos regionales: es una recopilación de información sobre las plantas que crecen en un área geográfica específica. Estas bases de datos cumplen diversos objetivos, como la investigación científica, las iniciativas de conservación y la comprensión de la diversidad de especies vegetales, como el Índice de Nombres de Plantas de Australia (APNI) y el Instituto Nacional de Biodiversidad de Sudáfrica (SANBI) (Base de datos de plantas africanas).

7- Bases de datos de familias botánicas: proporcionan información sobre nombres científicos, familias, nombres vernáculos, usos medicinales, ubicación de las especies e imágenes de especímenes de herbario, como las del Instituto Nacional de Biodiversidad de Sudáfrica (SANBI), The Plant List, Australian Plant Name Index (APNI), Flora of China, Flora of North America (FNA) y JSTOR Global Plants.

8- Bases de datos de plantas en línea: desempeñan un papel esencial en la conservación y el intercambio de conocimientos sobre las especies vegetales. Permite a los usuarios referirse a plantas mediante imágenes de hojas, flores o frutos, y proporciona datos sobre especies vegetales reconocidas, como Plants of the World Online (POWO), The Plant List, International Plant Names Index (IPNI), Flora of North America (FNA) y The Arabidopsis Information Resource (TAIR).

Las aplicaciones de escritorio de bases de datos de plantas se utilizan garantizar los recursos fitogenéticos, ofrecen herramientas para la

entrada, el análisis y la visualización de datos. Por ejemplo, la aplicación *MyHerbarium* se emplea exitosamente para administrar colecciones de herbario, ver datos de especímenes de plantas, imágenes y datos relacionados. Otra aplicación es *PGR Studio*, que se utiliza para gestionar los recursos genéticos de las plantas, proporciona herramientas para la entrada, el análisis y visualización de datos.

El reconocimiento automático de imágenes de plantas es, sin duda, la solución más probable para la brecha taxonómica botánica, que ha atraído la atención tanto del mundo informático como de la comunidad botánica. Modelos más complejos y sofisticados para la identificación automática de imágenes de plantas han surgido junto con el continuo desarrollo de la tecnología de aprendizaje automático. Todos estos programas toman fotografías y las transmiten en línea a un servidor para su análisis, que realiza la identificación.

En este sentido, existen softwares para móviles, donde se ofrecen aplicaciones que permiten a los usuarios identificar plantas mediante imágenes de hojas, flores o frutos. La forma, el color, la textura, las venas y la composición química de las hojas, flores, frutos y otros órganos se consideran elementos esenciales para identificar plantas en botánica, lo que permite a los investigadores estudiar y distinguir entre una especie y otra. Las imágenes capturadas en entornos sin restricciones, variaciones de escala, diferentes condiciones de iluminación, orientación de las hojas, fondos complicados y estructura de los folíolos hacen que el reconocimiento de especies de plantas sea riguroso y requiera mucho tiempo.

Las aplicaciones para teléfonos móviles ofrecen potencialmente un método más fácil y rápido para identificar especies que el uso de guías de campo y claves de identificación tradicionales; pueden organizarse de forma similar a una clave taxonómica tradicional, con opciones seleccionadas por el usuario que restringen las posibles coincidencias de especies dentro de un marco de búsqueda. Sin embargo, las aplicaciones o complementos utilizan análisis automatizado de imágenes o escaneo de audio basado en aprendizaje automático para proporcionar sugerencias de identificación rápidas y fáciles de usar en las especies objetivo.

Entre las principales aplicaciones altamente reconocidas para identificación de plantas se encuentran:

1- PlantNet: permite a los usuarios referirse a las plantas mediante reconocimiento visual. Contiene la categoría flora mundial, que abarca plantas útiles, plantas invasoras y malezas de Europa Occidental, Estados Unidos, Canadá, Centroamérica, islas del Caribe, Amazonas y Polinesia Francesa. La aplicación presenta fotos organizadas por familias y puede identificar alrededor de 21.920 especies de plantas.

2- Flora Incognita: la aplicación ha logrado buena identificación a nivel de género y familia de plantas. Antes del análisis, el usuario elige el tipo de planta (flor, árbol, hierba). El proceso de análisis solicita fotografías de diferentes partes de la planta. Tras determinar la especie, se enlaza a Wikipedia y al sitio web www.plantarium.

3- iNaturalist: permite el registro, reconocimiento e identificación de plantas y animales.

4- PlantSnap: proporciona datos sobre especies de plantas reconocidas, mediante imágenes de hojas, flores o frutos. Según el desarrollador, esta aplicación puede identificar 585.000 especies de plantas.

5- LeafSnap: el usuario toma una foto de la planta, indicando de qué parte se trata. Luego, elige la que se parezca más a la foto. La descripción botánica de la planta se proporciona debajo del nombre de la especie.

6- PictureThis: esta aplicación puede identificar 10.000 especies de plantas. Durante la autorización, se solicita al usuario que introduzca su tarjeta bancaria inmediatamente; si no lo hace, se ofrece una versión gratuita. El usuario enfoca la cámara y el programa determina la especie, y debajo del nombre de la misma se proporciona una descripción botánica con un dato interesante sobre la planta.

7- Seek: esta aplicación utiliza la base de datos de iNaturalist. El usuario solo tiene que apuntar la cámara a la planta y la aplicación realiza una evaluación en tiempo real a partir de la transmisión de video en vivo, mejorando rápidamente la clasificación por clase, orden, familia, género e incluso especie a medida que cambia la vista. Además, y de forma crucial, es la única aplicación que no requiere acceso a internet para funcionar.

8- Google Lens: aplicación de inteligencia artificial multimodal (integra datos de diferentes modalidades) con reconocimiento de imágenes, textos, audios y videos. También es usada para el reconocimiento de plantas, animales y más. Ofrece un alcance mucho

mayor que una aplicación de identificación de plantas solamente, ya que intenta identificar prácticamente cualquier cosa.

9- Garden Tags: es una aplicación que ayuda a organizar plantas y asociarse con una comunidad de jardinería.

10- Flora capture: recopila un herbario digital y comparte observaciones multimodales estructuradas de plantas. La aplicación ofrece una herramienta práctica para que los usuarios aumenten su conocimiento sobre la diversidad vegetal de su entorno y aumenten su conocimiento sobre las plantas. También permite mejorar la calidad de la identificación automatizada de especies mediante la creación de un conjunto de datos de imágenes de alta calidad.

En términos generales se puede plantear que las aplicaciones para móviles relacionadas con la identificación de plantas pueden incluir aquellas que analizan fotos, las dedicadas a la identificación manual y las dedicadas a la monitorización del cuidado de las plantas. También proporcionan identificaciones precisas a un nivel taxonómico aceptable. Con el tiempo, la precisión seguirá mejorando, gracias a un mayor número de imágenes de referencia, algoritmos y un aprendizaje automático mejorado. Se ha demostrado que **LeafSnap**, **Flora Incognita**, **PlanNet** y **Google Lens** son las aplicaciones de identificación de plantas más empleadas.

2.8.2 Herbarios

El herbario puede considerarse como una colección de especímenes vegetales preservados, esenciales para el campo de la botánica,

especialmente, en la sistemática. Constituyen, por tanto, un registro tangible y confiable de plantas de una localidad o de varias regiones del mundo. Su función es servir de base para el estudio de la flora y la vegetación; es importante para la identificación de plantas, como referencia para el nombre correcto y como banco de datos.

Las colecciones de herbario proporcionan un registro único de nuestra biodiversidad global e historia natural, acumulado a lo largo de siglos. Ofrecen una fuente verificable de especímenes para una gran variedad de preguntas de investigación, desde la taxonomía hasta la evolución y el cambio a lo largo del tiempo.

El establecimiento de un herbario requiere la colecta de los especímenes en la localidad de origen. Tras el proceso de colecta, el prensado es el siguiente paso, donde el material vegetal pierde gradualmente su humedad y la presión ejercida por la prensa lo aplana. Otro paso es el secado, se recomienda una temperatura de alrededor de 45 ºC que permita la desecación del material, conservando la estructura natural lo más fiel posible. Posteriormente, se procede al montaje en un papel grueso.

Los ejemplares de herbario, una vez montados se acompañan de una etiqueta que contiene información sobre el nombre de la especie (nombre científico y común), familia botánica a la que pertenece, lugar y fecha de recolección, colector y observaciones en caso necesario (olor, color, hábito de crecimiento, insectos relacionados, entre otros). En la figura 5 se ilustran dos ejemplares de material montado para herbario (especies *Ocimum tenuiflorum* y *Lippia alba* (Miller) N. E.

Brown).

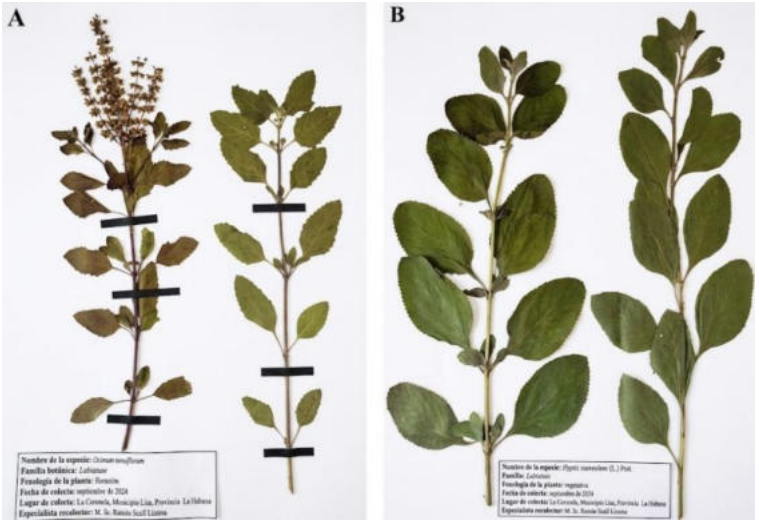


Figura 5. Imágenes de material montado para herbario A: Ocimum tenuiflorum, B: Lippia alba (Miller) N. E. Brown

Se pueden identificar diferentes tipos de herbarios:

- Herbarios internacionales: conservan especímenes de todo el mundo.

- Herbarios nacionales: conservan especímenes de todas las regiones de un país específico.

- Herbarios regionales: conservan especímenes de una región o provincia específica de un país.

- Herbarios locales: conservan especímenes de una pequeña zona de una región o provincia.

- Herbarios docentes o académicos: están adscritos a un instituto de formación y, por lo general, son el lugar donde los estudiantes depositan sus colecciones.

- Herbarios privados: son mantenidos por particulares o están adscritos a terrenos privados, como granjas o reservas naturales privadas.

- Herbarios de investigación: suelen albergar ejemplares representativos que representan uno de los siguientes:

Un campo de investigación específico, por ejemplo, plantas medicinales, malezas o plantas útiles.

Una familia distinta, por ejemplo, Fabaceae o Asteraceae.

Un grupo de plantas especializadas, por ejemplo, plantas acuáticas o briofitas.

También pueden existir colecciones específicas dentro del herbario:

- Históricas: colecciones muy antiguas que se conservan separadas y en su estado original, por ejemplo, la colección del Museo Sudafricano (SAM) en el Herbario Compton (NBG), Ciudad del Cabo. Los armarios y las cubiertas se mantienen intactos y, a menudo, no se conservan y no se incorporan los cambios de nombre.

- Testigos: especímenes testigo para estudios ecológicos, anatómicos, citológicos, químicos o moleculares.

- Interés especial: grupos de plantas con una cualidad de enlace, por ejemplo, plantas medicinales.

Dentro de estas colecciones es posible encontrar las semillas de las plantas, frutos, madera, pétalos y fotografías de las plantas en su estado natural o dentro de colecciones vivas o jardines botánicos. A continuación, se nombran algunas de las colecciones de herbario:

- Colección principal: está compuesta por angiospermas y pteridofitas, puede incluir o no plantas cultivadas y gimnospermas; en algunos herbarios, una o ambas se conservan por separado.

- Colección carpológica: consta de conos, frutos o semillas y se conserva por separado.

- Colección xilario: comprende únicamente especímenes de madera.

- Colección de Briofitas y líquenes: no se montan en láminas de cartón como otras plantas, sino que se conservan en sobres plegados.

- Colección de espíritus: las estructuras muy carnosas o delicadas, o las flores complejas, como las de Asclepiadoideae, se almacenan en productos químicos líquidos o "alcoholes".

El herbario está estrechamente relacionado con los jardines botánicos, instituciones cruciales para la preservación y el estudio de las especies

vegetales, desempeñando un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad. Con el creciente reconocimiento mundial de la importancia de los recursos vegetales, en particular las plantas medicinales, los jardines botánicos se han convertido en actores clave para salvaguardar la diversidad de estas plantas invaluables.

Sin embargo, debido a factores como la destrucción del hábitat, la sobreexplotación, el cambio climático y la pérdida de conocimientos tradicionales, muchas plantas medicinales se encuentran en peligro de extinción. En este contexto, los jardines botánicos proporcionan una plataforma esencial para la conservación de la diversidad de plantas medicinales, garantizando su preservación para las generaciones futuras.

La conservación de especies de plantas medicinales en jardines botánicos no solo es vital para mantener la diversidad genética de las plantas, sino también para apoyar la investigación, la educación y el uso sostenible. Los jardines botánicos ofrecen un entorno controlado donde las plantas medicinales pueden cultivarse, estudiarse y propagarse sin las presiones que sufren en sus hábitats naturales.

Los jardines botánicos sirven como valiosos centros de investigación al identificar especies vegetales y preservar materiales de herbarios. También se dedican al cultivo y la propagación de plantas medicinales que requieren condiciones de cultivo específicas, incluyendo tipos de suelo, rangos de temperatura y niveles de humedad específicos. Algunas pueden ser de crecimiento lento o difíciles de propagar, lo que complica los esfuerzos para cultivarlas fuera de sus hábitats naturales.

En este contexto, los jardines botánicos desempeñan un papel clave en la conservación del material genético de las plantas medicinales mediante la recolección de semillas, muestras de tejido y esquejes de plantas de poblaciones silvestres. Estos materiales pueden almacenarse en bancos de semillas o instalaciones de criopreservación, donde pueden permanecer viables durante largos períodos.

2.9 Fitomorfología

La morfología vegetal estudia la estructura externa e interna general de los órganos vegetales. Se integra en cierta medida con la anatomía vegetal, que estudia la estructura tisular y celular de las plantas. La morfología constituye la base de las descripciones taxonómicas, y por lo general, representa la información más importante para delimitar y circunscribir taxones.

Los aspectos macroscópicos brindan detalles concernientes a la descripción, biometría y organolepsia de la planta. La inspección visual es el medio más simple y rápido por medio del cual se puede establecer la identidad, pureza y calidad posibles. Se basa en la forma, tamaño, color, características de la superficie, textura, características de la fractura y apariencia de la superficie de fractura, entre otros aspectos. Estos rasgos sirven como indicadores preliminares para la clasificación de una planta.

Una droga cruda de origen vegetal puede estar constituida por la planta completa, por sus partes anatómicas frescas o secas y debidamente conservadas, por secreciones, extractos, jugos, etc. En tal sentido, el estudio farmacognóstico de una planta, o de sus órganos en forma de

droga cruda, comprende entre otros aspectos la descripción de sus caracteres morfológicos, tanto macroscópicos como microscópicos, para lo cual es necesario conocer las principales características de cada órgano vegetativo.

2.10 Identificación de características macroscópicas de la raíz

2.10.1 Características generales y morfología externa

La raíz es el órgano de la planta que se caracteriza por su crecimiento indefinido, se origina en la radícula del embrión (primera parte de una plántula que emerge de la semilla durante la germinación), no presenta yemas ni apéndices foliares, suele tener forma alargada y geotropismo positivo. Permite el anclaje o fijación de la planta al suelo; absorbe nutrientes en estado de disolución y los transporta al resto del cuerpo de la planta; acumulan reservas (plantas bienales como la zanahoria, *Daucus carota*); intervienen en la modificación del suelo en que habitan; sustentan asociaciones simbióticas de microorganismos. También evita intoxicaciones de la planta al ejercer la permeabilidad selectiva por medio de la endodermis.

Las raíces tienen una amplia variación morfológica y presentan diferencias estructurales y de desarrollo con relación a sus especializaciones fisiológicas. En la mayoría de las dicotiledóneas, se muestra un sistema radical establecido por una raíz principal con sus ramificaciones de diferentes órdenes. En una raíz que haya alcanzado cierto grado de desarrollo o diferenciación se puede apreciar una morfología externa formada por las partes siguientes (figura 6):

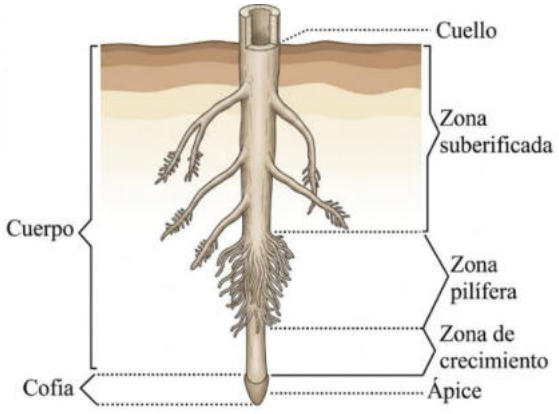


Figura 6. Macromorfología de una raíz típica.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1- Cofia, pilorriza o caliptra: se ubica en el ápice radical protegiendo al meristemo apical. Es la parte que está recubriendo a las células embrionales del punto vegetativo a modo de un dedal, constituido por células de membranas duras y resistentes que protegen al extremo de la raíz cuando ésta crece abriéndose paso en el suelo.

2- Cuerpo: está conformado por:

- **Zona de crecimiento o alargamiento:** es una zona corta, clara y desnuda entre la cofia y la zona de pelos absorbentes. En las raíces terrestres es más corta que en las aéreas.

- **Zona pilífera:** conformada por un gran número de pelos absorbentes. Por esta zona es que

- se realiza la mayor absorción de sustancias por la planta.

- **Zona suberificada:** es la porción de la raíz que no presenta

pelos absorbentes; en ella aparecen las raíces secundarias en un número variable y su parte externa se cubre de súber o corcho; en esta parte la raíz se acorta por contracción, se tensa y fija la planta más fuertemente al suelo.

3- Cuello: es el punto de unión entre la raíz principal y el tallo; se le llama también nudo vital.

Clasificación

Las raíces se pueden clasificar por diferentes criterios de acuerdo a (figura 4):

- **Origen:** pueden ser primarias (nacen directamente de la radícula del embrión durante el proceso de germinación de la semilla), secundarias (nacen de una raíz primaria) y adventicias (nacen de cualquier otra parte que no sea la radícula del embrión).

- **Lugar donde viven:** se encuentran las terrestres (viven en el interior del suelo), acuáticas (se desarrollan en contacto directo con el agua) y aéreas (viven en el medio aéreo).

- **Forma externa:** se pueden mencionar a las raíces típicas o pivotantes que tienen una sola raíz principal muy bien desarrollada como eje central y otras laterales (secundarias, terciarias, etc.) menos desarrolladas. Dentro de este grupo se encuentran:

- *Napiformes*: cuando el eje principal de la raíz se desarrolla de tal forma que adopta esta forma. Ejemplo: el nabo.

- *Globosa*: cuando adopta una forma más o menos esférica. Ejemplo: la remolacha, el rabanillo, etc.

- *Filiforme*: cuando existe un eje principal muy delgado y largo, poco diferenciado del resto de las raíces laterales. Ejemplo: yerba mora, alfalfa, etc.

- *Pilotiforme*: cuando la raíz principal o primaria es muy desarrollada y robusta. Ejemplo: Muchos árboles.

- *Raíces fasciculadas*: las raíces que predominan son las secundarias y no es posible diferenciar una raíz principal más desarrollada. En este grupo están las fasciculadas fibrosas (tienen aspecto de cabellera, ejemplo el arroz, trigo, etc.) y fasciculadas tuberosas (cuando realizan la función de almacenamiento de sustancias, ejemplo la yuca).

• **Por su consistencia:** se definen las raíces herbáceas (pueden doblarse con extrema facilidad y presentan un tejido muy fino que protege los demás órganos) y las raíces leñosas (no pueden doblarse por su gran consistencia, debido en gran parte a las modificaciones del tejido epidérmico).

• Por su ciclo biológico: se pueden encontrar las raíces anuales (proceden de plantas generalmente herbáceas cuyo ciclo vegetativo no excede de un año), las bienales (proceden de plantas que el primer año de vida su función es la de acumular sustancias de reservas y florecen el segundo para perpetuar la especie) y las perennes (proceden de plantas cuyo periodo

vegetativo es mayor de dos años).

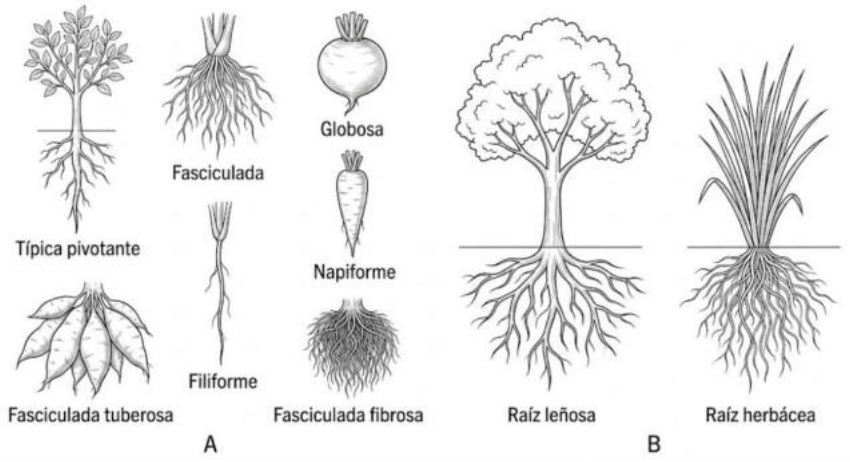


Figura 7. Tipos de raíces de acuerdo a la forma externa (A) y su consistencia (B).

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

2.11 Modificaciones

En muchas plantas, para cumplir funciones especiales en la naturaleza, la raíz sufre las siguientes modificaciones (figura 5):

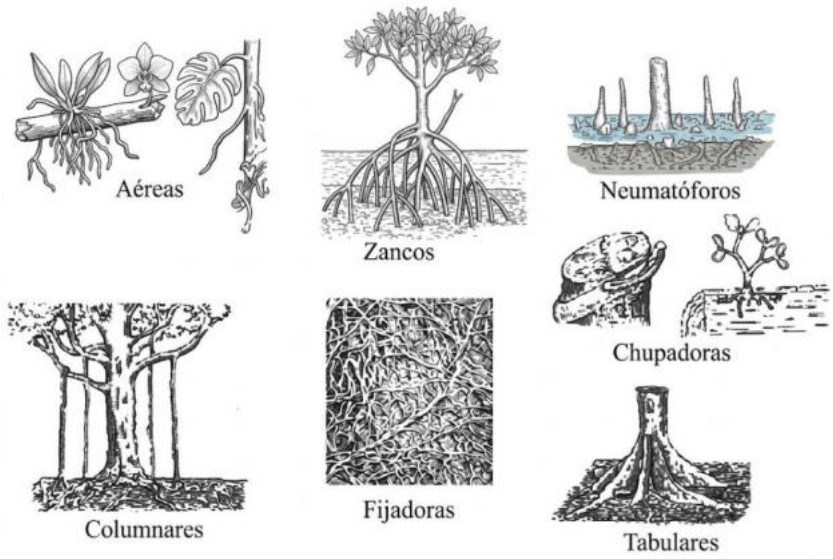


Figura 8. Modificaciones de la raíz.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Aéreas:** nacen en las ramas altas; crecen en el aire y nunca o sólo tarde penetran en el suelo. Ejemplo: orquídeas.

- **Fúlcreas o zancos:** cuando las raíces aéreas llegan al suelo, sirviendo como puntales de sostén a la planta. Ejemplo: maíz, mangle, etc.

- **Respiratorias o neumatóforas:** aquellas que se elevan verticalmente del suelo y emergen, adquiriendo geotropismo negativo, su función consiste en ponerse en contacto con el aire para llevar éste a las raíces sumergidas. Ejemplo: árbol del clavo.

- **Columnares**: crecen en dirección descendente hasta alcanzar el suelo, donde se fijan o ramifican, tornándose nutricias y de

sostén. Constituyen un método de propagación vegetativo porque cortadas y separadas de la planta madre puede obtenerse nuevos individuos. Ejemplo: ficus.

- **Fijadoras:** solamente desempeñan función de fijar a la planta agarrándose externamente a otras plantas o penetrando en las hendiduras de las rocas o muros. También se le denominan garfios. Ejemplo: hiedra.

- **Chupadoras:** propia de Fanerógamas parásitas o hemiparásitas, que penetran en el cuerpo de la planta hospedante, succionando de ellas las sustancias nutritivas necesarias y el agua de transpiración.

- **Gemíferas:** son aquellas que se alargan horizontalmente a varios centímetros de profundidad, dando yemas adventicias, que originan nuevas plantas.

- **Tabulares:** se presentan en aquellos árboles de gran porte y copa, notándose en la base del tronco y a ras del suelo unas raíces que irradian en forma de crestas laminares.

2.12 Examen macroscópico

Para obtener en detalle una descripción macromorfológica de la raíz, desde el punto de vista farmacognóstico se deben tener en cuenta los aspectos siguientes:

- **Forma:** incluye términos tales como son: recta, torcida, simple y

ramificada, cilíndrica, cónica fusiforme, ovoide, piriforme, napiforme, etc.

- **Tamaño:** dimensiones en largo y diámetro.
- **Olor y color:** tanto interno como externo (se refiere al color).
- **Condición:** fresca, seca, entera, cortada, privada de algún tejido.
- **Caracteres de la superficie:** lisa, arrugada, estriada, anillada, fisurada. Presencia o no de cicatrices y yemas.
- **Fractura:** describe como se rompe la pieza cuando se somete a presión. Puede ser completa, incompleta, corta, fibrosa, dura, débil, flexible, córnea, etc.

Para este tipo de descripción macroscópica detallada, generalmente se utiliza el microscopio estereoscópico como instrumental auxiliar que permite un aumento adecuado de la muestra en sus tres dimensiones.

2.13 Identificación de características macroscópicas del tallo

Características generales y morfología externa

El tallo es una de las partes constitutivas del aparato vegetativo de una planta que presenta geotropismo negativo, o sea, generalmente crece en sentido opuesto al de la raíz. Se caracteriza por tener división de nudos, entre nudos y yemas dada por la implantación de las hojas. Generalmente es aéreo, aunque en ciertas ocasiones es subterráneo.

Entre las funciones del tallo se mencionan: sostén de hojas, ramas y flores; conducción de agua y sales en disolución desde la raíz y hasta las hojas; transporte de fotosintatos desde las hojas y hacia el cuerpo de la planta; almacenamiento de sustancias de reserva y agua, fotosíntesis cuando tiene crecimiento primario, en algunos casos, se usa como órgano de reproducción asexual o vegetativa. Las plantas que poseen tallo se denominan **caulescentes** y las que no lo tienen son **acaules**. En el tallo normal, más o menos largo y cilíndrico o cónico, se pueden reconocer las partes constitutivas siguientes (figura 9):

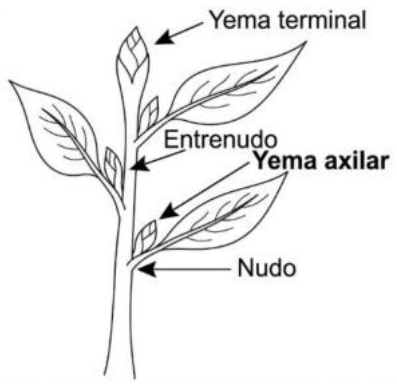


Figura 9. Morfología externa del tallo aéreo.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1- **Punto o cono vegetativo, yema terminal:** es un pequeño abultamiento de forma ovoidea o cónica, constituido por hojuelas muy pequeñas que recubren el meristemo terminal. Se localiza tanto en el extremo del tallo como en sus ramificaciones.

2- Cuerpo del tallo: es la región comprendida entre el cuello del tallo y el cono o punto vegetativo. Se pueden distinguir nudos, entrenudos y las yemas axilares:

- **Nudos:** son las partes más o menos abultadas o engrosadas que presenta el tallo, donde se insertan las hojas.

- **Entrenudos:** porción del tallo, generalmente alargada, comprendida entre dos nudos

consecutivos.

- **Yema axilar:** presenta la misma forma estructural que la yema terminal, pero se localiza en las axilas de las hojas unidas a los nudos.

- **Yema adventicia:** las que no son ni terminales ni axilares. Se pueden clasificar en:

- **Yema foliífera:** Si a partir de ella se desarrolla una rama con hojas.

- **Yema florífera:** Si a partir de ella se desarrollan flores.

- **Yemas mixtas:** Cuando forman tanto flores como hojas.

3- Cuello del tallo: es la línea imaginaria que sirve de separación entre el tallo y la raíz. Coincide aproximadamente con la superficie del suelo.

El tejido epidérmico tanto del tallo como de la raíz pueden sufrir modificaciones con el objetivo de protegerlos del medio externo, observándose en los tallos leñosos la formación de una capa dura generalmente separable de la parte leñosa, conocida como corteza.

2.14 Clasificación

1- De acuerdo al medio donde viven

Tallos aéreos: son los más comunes, crecen en contacto con el aire. Según la dirección que siguen al desarrollarse se pueden diferenciar los tipos siguientes (figura 7):

- **Erguidos:** son los que se elevan de forma más o menos vertical y se caracterizan generalmente por tener "tronco", o sea, presentan entre el suelo y la copa o área foliar, una zona donde no hay ramificaciones.

- **Rastreros:** carecen de rigidez necesaria para erguirse y crecen arrastrándose sobre la superficie del suelo. Si echan raíces adventicias junto a los nudos se dice que son radicantes; si no originan raíces adventicias se les denomina repentes.

- **Trepadores:** crecen apoyándose sobre tallos de otras plantas u objetos que encuentran a su paso. La forma de trepar puede ser por simple apoyo mediante zarcillos, aguijones, o raíces adventicias. Ejemplo: *Bougainvillea menor*

- **Volubles:** son tallos débiles que crecen arrollándose en espiral sobre el tallo de otras plantas o soporte. No llevan zarcillos, ni espinas, ni raíces adventicias como los anteriores. Pueden ser: herbáceos (denominados enredaderas) y leñosos (denominados bejucos). Si se enrollan a la derecha se llaman dextrorsos y si lo hacen a la izquierda se les denomina sinistrorsos.

Tallos acuáticos: son aquellos que crecen en el agua o lugares fangosos (figura 7).

Tallos subterráneos o terrestres: se desarrollan dentro de la tierra. Morfológicamente no se parecen a los tallos aéreos. Se consideran los siguientes (figura 7):

- **Tubérculos:** son tallos cortos y gruesos, generalmente fusiformes o esféricos que contienen casi siempre almidón como sustancia de reserva. En su superficie presentan hendiduras que protegen las yemas, denominadas "ojos". Ejemplo: papa.

- **Rizomas:** son tallos de forma más o menos alargada, que crecen más o menos paralelamente a la superficie del suelo con o sin cortas ramificaciones, de él nacen de manera vertical hacia abajo las raíces y los nudos, el ápice del rizoma está ocupado por la yema, que se renueva todos los años. Ejemplo: jengibre, cúrcuma.

- **Bulbos:** conjunto de tallo reducido (braquiblasto), convertido en un disco que porta yema/s, y las bases foliares reservantes que se llaman catáfilas, cubiertas por catáfilas protectoras, no reservantes, membranosas o papiráceas y generalmente de color castaño, llamadas binzas. Este tipo de bulbo se denomina tunicado (cebolla, *Allium cepa*).

- **Bulbo macizo:** cuando el disco está muy desarrollado y representa el mayor volumen del bulbo, se encuentra protegido por catáfilas membranosas. Ejemplo: ajo (*Allium sativum*),

azafrán (*Crocus sativus*).

- **Bulbo carnoso:** cuando las catáfilas se disponen en forma imbricada (azucena, género *Lilium*).

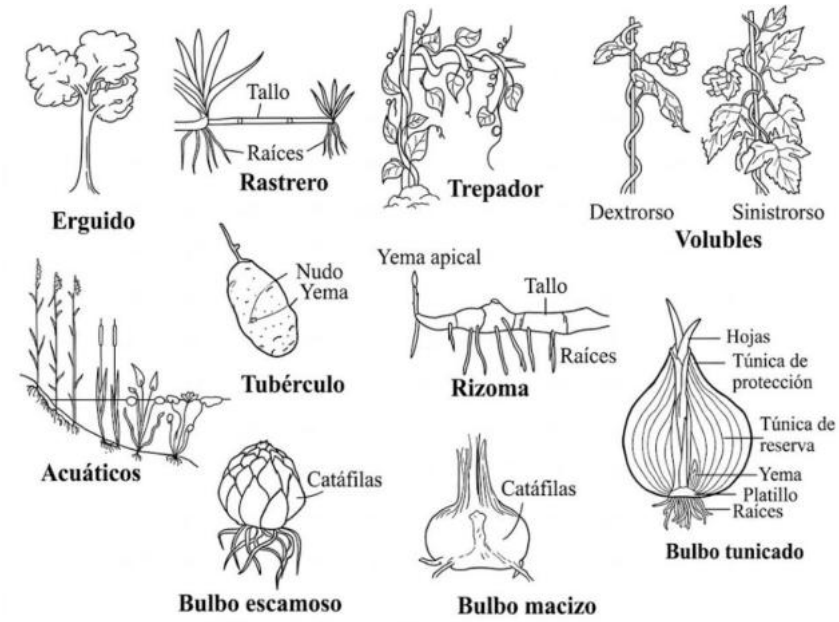


Figura 10. Tipos de tallos según el lugar donde viven.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores

2- Por la consistencia

- **Herbáceos: son verdes, jugosos y flexibles. Según su duración se denominan:**

- **Anuales:** cuando la duración de su ciclo vegetativo comprende un año o menos de un año. Ejemplo: maíz.

- **Bianuales o bienales:** cuando la duración del ciclo vegetativo

comprende más o menos dos años. Ejemplo: zanahoria.

- **Perennes o vivaces:** cuando viven más de dos años.

Los tallos simples no ramificados, pueden ser a su vez del tipo **escapo** (es herbáceo, alargado y sin hojas, en cuyo ápice lleva flores; nace de un rizoma o de un bulbo y cuyas hojas parecen brotar directamente del suelo) y **cálamo** (cuando es herbáceo, sin ramas y sin nudos) (figura 11).

- **Leñosos:** cuando la planta vive muchos años, el tallo se vuelve generalmente duro y leñoso, debido a la formación de tejidos lignificados, generalmente de color marrón, pardo o gris. A estos tallos se les denomina más comúnmente troncos y a las plantas **arbustos** (son plantas leñosas cuyos tallos se ramifican desde el nivel del suelo, por lo que no se puede distinguir bien el vástago principal) o **árboles** (son plantas leñosas que tienen un tronco principal, más grueso que se ramifica a cierta altura del suelo). Los tallos leñosos no ramificados, pueden ser **caña** (es leñoso y con nudos y entrenudos bien diferenciados. Ejemplo: caña de azúcar) y **estipe** (es leñoso, cilíndrico, largo, sin ramificaciones y lleva un penacho de hojas en el ápice. Ejemplo: palmeras) (figura 8).

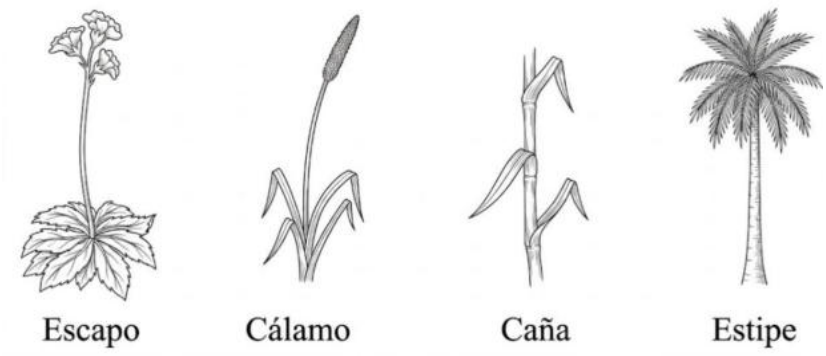


Figura 11. Tipos de tallos según su consistencia.

Modificaciones

Existen tallos, que desempeñan funciones diferentes a las que le corresponden. Para adaptarse al medio modifican su morfología; se pueden señalar los siguientes (figura 12):

- **Estolones:** son ramas que crecen arrastrándose sobre el suelo y que sirven para la propagación vegetativa, ya que emiten raíces adventicias y forman nuevos brotes que quedan separados. Ejemplo: fresa.

- **Filocladios:** son ramas cortas, comprimidas o aplanadas a manera de hojas, capaces de desempeñar las funciones de éstas. Ejemplo: espárrago.

- **Cladodios:** cuando todo el tallo y ramas se comprimen, también con funciones asimiladoras o fotosintéticas propias de las hojas ya que éstas quedan reducidas o transformadas en espinas. Ejemplo: tuna.

- **Espinas caulinares:** son ramas transformadas en espinas, cuya función principal es la defensa contra el ataque de animales herbívoros. Ejemplo: cítricos.

- **Zarcillos caulinares:** son filamentos desarrollados y arrollados en espiral que resultan de la modificación de las ramas y que sirven como órganos de fijación o apoyo. Ejemplo: maracuyá.

- **Suculentos:** son tallos que se modifican para almacenar agua como función principal y por tanto son muy gruesos y carnosos. Ejemplo: cactus.

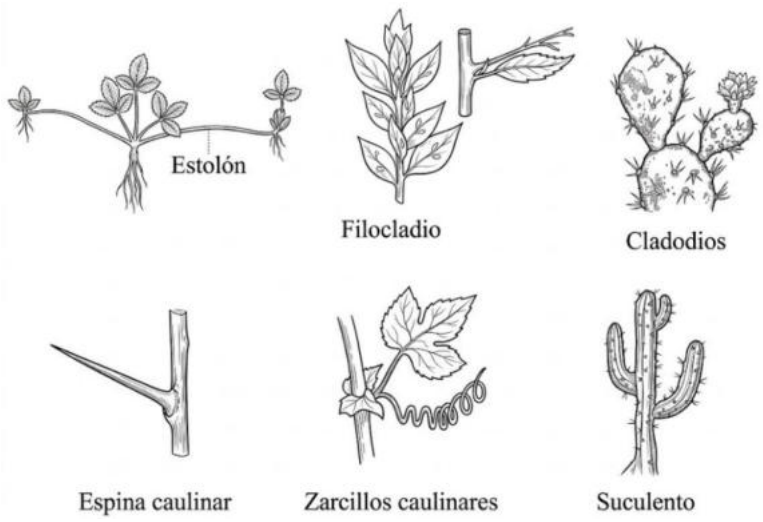


Figura 12. Modificaciones de tallos.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores

Examen macroscópico

La mayoría de los términos descriptivos aplicados a los órganos

subterráneos (raíces), también pueden utilizarse para estudiar tallos y corteza. Pueden destacarse además algunas peculiaridades tales como:

- Forma de la pieza: curvada, aplanada, acanalada, tubo simple, tubo doble, tubo compuesto (para corteza).

- Superficie externa: cicatrices de hojas, presencia de lenticelas (para tallos)

- Superficie interna: color, estriaciones, surcos (para cortezas)

2.15 Identificación de características macroscópicas de la hoja

Características generales y morfología externa

La hoja es la parte más visible del aparato vegetativo de una planta, generalmente plana y pigmentada de verde porque contiene clorofila. Se inserta en el tallo a través de los nudos. La función principal es la producción de hidratos de carbono por fotosíntesis para lo cual está especialmente adaptada por su forma, ubicación en la planta y estructura tanto interna como externa, ya que posee estomas y porta la clorofila. Desde el punto de vista general, la hoja se divide en tres partes fundamentales (figura 13):

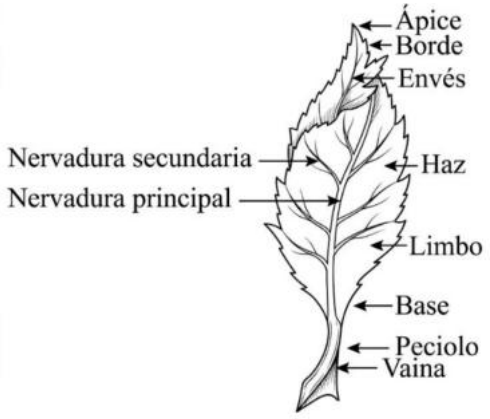


Figura 13. Macromorfología de una hoja.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1- Vaina: es una dilatación membranosa que envuelve el tallo desde el nudo en que nace la hoja hasta el pecíolo o el limbo. Contribuye a la protección de las partes tiernas de la planta, tiene generalmente forma cónica y es pequeña; en algunas ocasiones es grande y envuelve el nudo y parte del entrenudo, o sea, la base de su lámina forma un forro o vaina alrededor del tallo; en este caso la hoja se denomina **envainadora** o **envainada**.

2- Pecíolo: porción delgada y menos visible que une el limbo de la hoja con el tallo. Facilita el transporte de agua y otros productos, en uno u otro sentido, de la hoja al tallo. Los pecíolos en muchas plantas son capaces de aumentar su longitud y de efectuar ciertos movimientos que permiten a las láminas foliares o limbos colocarse en posiciones más favorables para su iluminación.

Las hojas que llevan pecíolo, reciben el nombre de **pecioladas** y las que carecen de él se denominan **apecioladas**, **sésiles o sentadas**.

También están las llamadas **envainadas o envainadoras**, que forman una vaina que rodea parcial o totalmente el tallo. En las hojas **pecioladas**, el pecíolo puede ser largo o corto, según tenga mayor o menor longitud. Algunas lo presenta algo ensanchado a manera de alas y se les dice **pecíolo alado**. Cuando el pecíolo se inserta en el centro del envés del limbo o cerca de él y no en la base como es común, la hoja se denomina **peltada** (figura 14).

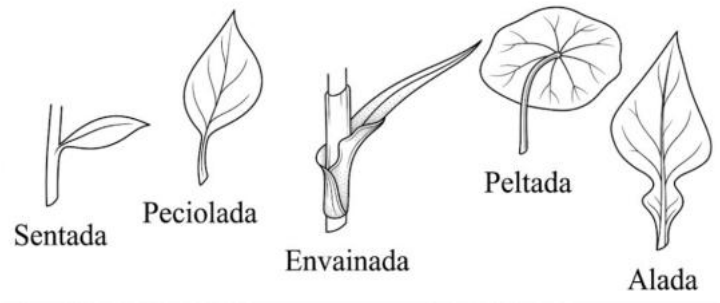


Figura 14. Algunos tipos de hojas atendiendo al pecíolo.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Las hojas sésiles o sentadas toman el nombre de: **abrazadoras** (cuando la base del limbo rodea en parte al tallo); **perfoliadas** (cuando la base del limbo rodea por completo al tallo); **decurrentes** (si la base del limbo se prolonga a lo largo del tallo); **entresoldadas** (cuando dos hojas opuestas se sueldan en su base, formando como un solo limbo atravesado por el tallo) y **equitantes** (son hojas envainadoras que se disponen de tal forma que los externas cubren la base de las internas).

3- Limbo: es la parte esencial de la hoja, de forma generalmente laminar y ancha, que presenta simetría dorsiventral, esto es, que sus caras difieren principalmente por el color verde más oscuro de la cara

superior o haz, o adaxial, que dé la cara inferior, abaxial o envés. Es en esta parte de la hoja donde se efectúa la fotosíntesis y la transpiración de las plantas. Además, en el limbo se distinguen las siguientes partes:

- **Borde o contorno:** línea que delimita el limbo.
- **Ápice:** extremo libre del limbo (opuesto a la base).
- **Base**: extremo del limbo que lo fusiona al pecíolo.
- **Nerviaciones:** tejido vascular o conductor que se distribuye por el limbo.

2.16 Clasificación de las hojas según su morfología

Las hojas presentan una gran variabilidad de características propias de cada especie que le permiten ser clasificadas en diversos tipos, atendiendo a diferentes criterios de formas y disposición de cada uno de esos elementos:

Las hojas en general se subdividen en dos grandes grupos: **hojas simples** (presentan el limbo de una sola pieza) y **hojas compuestas** (presentan varios limbos o foliolos).

Las hojas simples se clasifican atendiendo a sus diferentes partes estructurales. Las más importantes en cada caso se resumen a continuación:

1- Por la disposición en el tallo

Las diversas disposiciones de las hojas en el tallo, se estudian mediante una parte de la botánica llamada filotaxis. Las hojas nacen en puntos determinados del tallo, los cuales vienen condicionados por la estructura de los llamados meristemos apicales primarios. Estos puntos se denominan nudos.

Las hojas se insertan en los nudos con cierto orden e incluso en ocasiones con cierto desorden (las llamadas hojas esparcidas); a veces se disponen varias juntas en un mismo nudo formando un verticilo (hojas verticiladas), en otras ocasiones se muestran dos hojas en cada nudo, una frente a otra (opuestas), etc. Las disposiciones sobre los tallos más representativos son (figura 15):

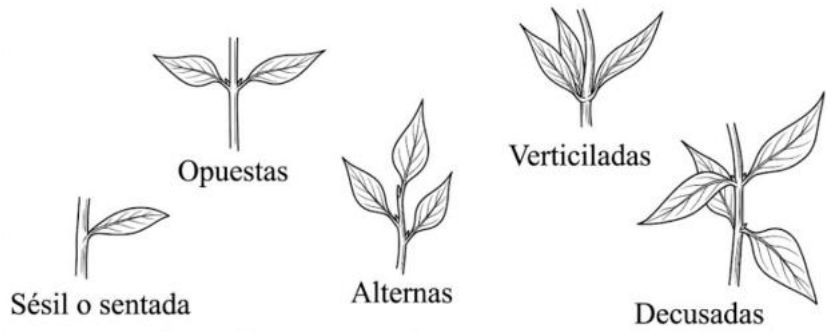


Figura 15. Disposición de las hojas en el tallo.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Verticiladas:** en el tallo aparecen varias hojas por nudo y en el mismo nivel.

- **Alternas:** las hojas están dispuestas siguiendo una línea en espiral a lo largo del tallo, o sea, nacen de una en una a lo largo

de él.

- **Opuestas:** dos hojas están insertadas en el tallo a igual altura, una enfrente de la otra.

- **Decusadas:** dos pares sucesivos de hojas se sitúan en planos perpendiculares entre sí, es decir, cuando cada par de hojas se disponen de manera que forman ángulo recto con el superior e inferior inmediato.

- **Sésiles:** las hojas no tienen pecíolo y su inserción en el tallo lo hace de forma directa (por su base).

2- Por el recorrido de las venas o venación

Las nervaduras o nerviaciones de las hojas varían dependiendo de la especie. A continuación, se detallan los tipos comunes de hojas según su nervadura (figura 16):

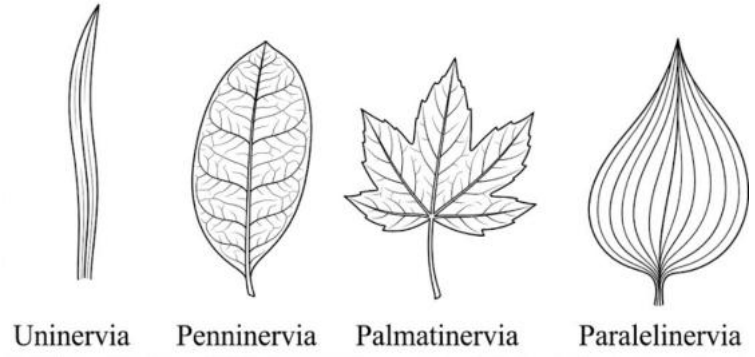


Figura 16. Tipos de hojas atendiendo a las nerviaciones.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Uninervia:** presentan una sola nervadura.

- **Penninervias o pinnatinervia (pinnadas):** nervadura principal marcada y las de menor grado se disponen como las plumas.

- **Palmatinervias (palmadas):** las nervaduras parten desde un punto y emergen como los dedos en la palma de mano.

- **Paralelinervias:** todos los nervios son paralelos y parten longitudinalmente del pecíolo a lo largo de la hoja.

3- Por el contorno o forma del limbo (figura 17)

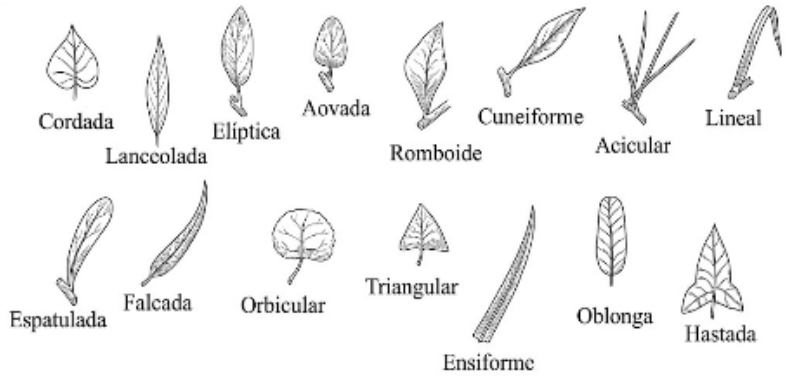


Figura 17. Tipos de hojas atendiendo al contorno o forma del limbo.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Cordada:** lámina en forma de corazón.

- **Lanceolada:** presenta forma de espada o lanza.

- **Elíptica:** la forma traza una elipsis, es decir, una circunferencia

alargada o deformada.

- **Aovada:** forma redondeada, más ancha en la base que en el ápice.
- **Romboide:** en forma de rombo.
- **Cuneiforme:** tiene forma de 'pico de pato'.
- **Acicular:** lámina muy delgada y en forma de aguja.
- **Linear:** lámina estrecha, delgada y con los bordes paralelos o casi paralelos, como una línea.
- **Espatulada:** forma de espátula.
- **Falcada:** forma de hoz o guadaña.
- **Orbicular:** forma más o menos redondeada.
- **Triangular:** la punta en contra del pecíolo (forma de triángulo).
- **Ensiforme:** forma de espada.
- **Oblonga:** la lámina es de dos a tres veces más larga que ancha y tiene lados paralelos (no acaban en punta).
- **Hastada:** hoja puntiaguda y con dos lóbulos divergentes en su base, como las alabardas.

4- Por el margen o borde (figura 18)

- **Entero:** borde liso, que no tiene ningún recorte.
- **Dentado:** presenta el borde con dientes pequeños perpendiculares a la nervadura principal.
- **Aserrado:** se observan dientes agudos en dirección al ápice, idénticos a los dientes de una sierra.
- **Festonado o crenado:** con ligeras ondulaciones redondeadas, a modo de festones.
- **Lobulado:** el margen se encuentra recortado en lóbulos marcados, cuya profundidad alcanza desde 1/8 hasta la mitad de la lámina.
- **Hendido:** limbo dividido en lóbulos irregulares.
- **Partido:** margen de la lámina dividida en partes por una hendidura.



Figura 18. Tipos de hojas atendiendo al borde del limbo.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

5- Por el ápice (figura 19)

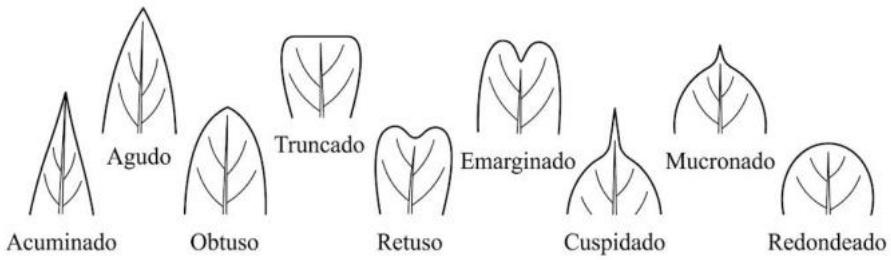


Figura 19. Tipos de hojas de acuerdo al ápice.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Acuminado:** el ápice de la hoja es una punta delgada.
- **Agudo:** los bordes forman en la punta un ángulo agudo.
- **Obtuso:** los bordes forman en la punta un ángulo obtuso.
- **Truncado:** la hoja remata en un borde abrupto y plano.
- **Retuso:** cuando acaba en un ápice truncado y ligeramente escotado, a veces con un apículo en el centro.
- **Emarginado:** acaba en una muesca o entalladura poco profunda. En ocasiones también se
- denomina escotado.
- **Cuspidado:** la lámina toma forma de cúspide o punta hacia el extremo.

- **Mucronado:** ápice que remata en una punta o mucrón.

- **Redondeado:** en el extremo la lámina toma forma de semicírculo.

6- Por la forma de la base (figura 19)

- **Aguda:** los bordes forman un ángulo agudo.

- **Obtusa:** los lados de la lámina de la hoja forman con el pecíolo un ángulo obtuso.

- **Cordada:** con forma de corazón.

- **Reniforme:** los lados de la lámina de la hoja forman al llegar al pecíolo dos lóbulos más suaves, a la manera de un riñón.

- **Auriculada:** provista de aurículas, unos apéndices generalmente redondeados.

- **Sagitada:** con forma de flecha.

- **Peltada:** lámina redondeada y el pecíolo emerge desde el centro de la lámina.

- **Truncada:** base en forma de línea recta de manera abrupta.

- **Cuneada:** base en forma de cuña, aguda, cuyos bordes son rectos convergen hacia el centro.

- **Redondeada:** con forma de semicírculo.

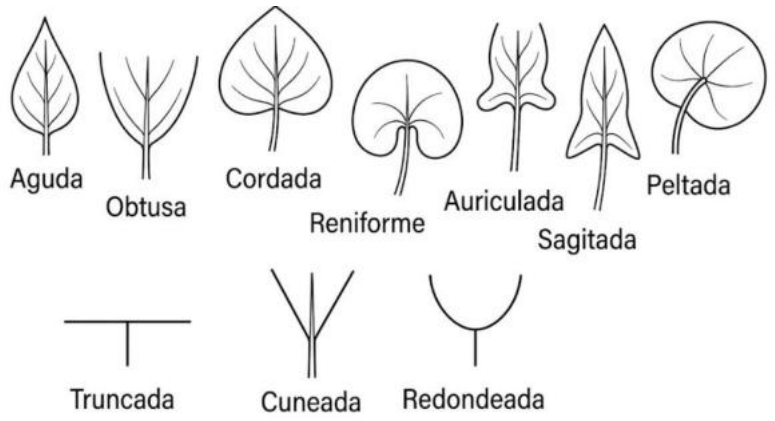


Figura 20. Tipos de hojas atendiendo a la base.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

7- **Por la consistencia:** pueden ser membranosas (son delgadas y suaves al tacto); escamosas o escariosas (presentan consistencia de hojas secas); coriáceas (tienen consistencia de cuero); suculentas o carnosas (son gruesas por su contenido en sustancias líquidas); papiráceas (se parecen al papel).

8- **Atendiendo a la superficie del limbo**: pueden ser lampiñas, papilosas, pubescentes y escamosas.

9- **Según la duración en el tiempo**: pueden ser caducas (solo viven un periodo vegetativo y caen al final de este final), perennes o persistentes (duran más de un periodo vegetativo) y marcescentes (si ya secas, se mantienen en el árbol hasta la formación de las próximas hojas).

Hojas compuestas: Su única clasificación se basa en la forma en

que se disponen los distintos limbos y foliolos. Algunos ejemplos se presentan en la figura 21.

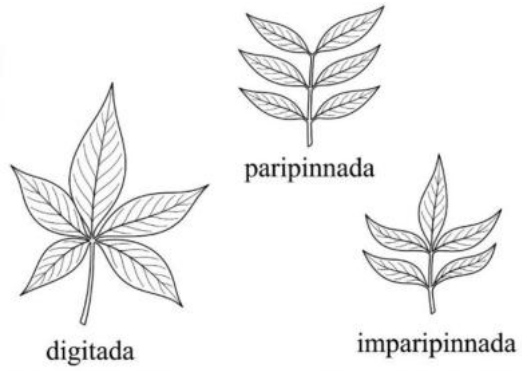


Figura 21. Tipos de hojas compuestas.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Digitadas:** hoja compuesta cuyas hojuelas nacen del pecíolo común separándose a manera de los dedos de la mano.

- **Paripinnada:** hoja compuesta con un número par de hojuelas (foliolos), que suelen estar en pares enfrentados a lo largo del eje principal o rabillo.

- **Imparipinnada:** hoja compuesta con hojuelas (foliolos) a cada lado del pecíolo y presentan un foliolo central en el extremo. Tienen un número impar de pinnas (foliolos).

2.17 Modificaciones de las hojas

Cuando la planta se desarrolla en condiciones ambientales desfavorables, la hoja es una de sus partes constitutivas que sufre

mayores transformaciones como un medio de protección para la planta. Algunas de estas modificaciones se citan a continuación y se ilustran en la figura 22.

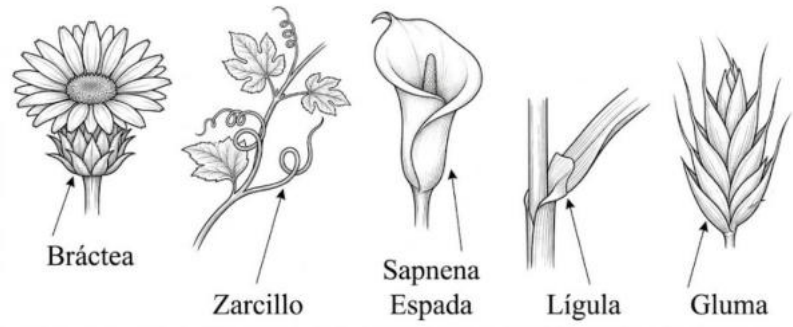


Figura 22. Principales modificaciones de las hojas.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Brácteas**: son hojas modificadas, de cuya axila nacen ramas florales. El aspecto, forma y color son muy variados. Ejemplo: girasol.

- **Zarcillos**: son hojas que se transforman totalmente, en filamentos cilíndricos, sencillos o ramificados, que se arrollan alrededor de los soportes. Ejemplo: guisante, calabaza, uva.

- **Espata:** es una bráctea amplia y a veces coloreada que envuelve a una inflorescencia.

- **Lígula**: apéndice membranoso, impar, entre la base foliar y la lámina, que sirve para impedir el ingreso de agua entre la vaina y el tallo, presente en las gramíneas y otras familias de

monocotiledóneas.

- **Gluma**: es una bráctea que se encuentra debajo de una espiguilla en la inflorescencia (racimo floral) de las gramíneas.

2.18 Examen macroscópico

Para describir las hojas desde el punto de vista macroscópico hay que considerar los aspectos siguientes:

- **Condición:** fresca, seca, completa, rota.

- **Olor y color**.

- **Forma:** puede clasificarse tomando en cuenta el pecíolo, ápice, base, bordes, lámina o contorno y venación.

- **Textura:** membranosa, coriáceas, frágil, suculenta.

- **Superficie:** glabra (que no tiene pelos) o pubescente (presencia de pelos). Los pelos más comunes a encontrar en la superficie de las hojas se pueden observar en la figura 23.

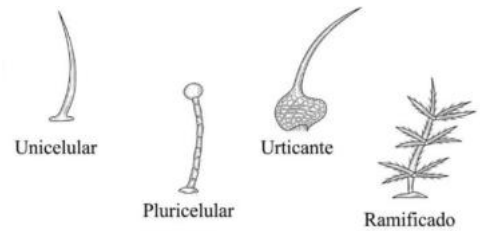


Figura 23. Tipos de pelos de las hojas.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Dimensiones:** se determinan el largo y ancho de las hojas. El estudio estadístico de la homogeneidad o dispersión de estos valores resulta importante para reconocer si en un tamaño de muestra determinado, los valores encontrados se encuentran dentro de los informados en la monografía de referencia, si esta existe. Para ello, se selecciona un tamaño de muestra no menor de 50 y con la ayuda de un pie de Rey o de una regla graduada se determina el largo y el ancho de las hojas.

- **Peculiaridades:** presencia de glándulas, puntuaciones y pelos.

2.18.1 Identificación de características macroscópicas de la flor

Características generales y morfología externa

Es el órgano reproductivo de las plantas superiores (Fanerógamas) constituido por un eje caulinar con apéndices laterales, originado en una yema florífera. Se compone de hojas muy modificadas y especializadas, unas con función de reproducción y otras, de protección (en el caso de las angiospermas).

La flor está unida al tallo por un eje denominado pedúnculo floral, que se ensancha en su parte superior para formar el receptáculo en el que se insertan los verticilos florales (conjunto de órganos florales con una disposición específica). En una flor completa, de afuera hacia adentro se encuentran los dos primeros verticilos que constituyen el perianto, que es la parte no reproductiva (conjunto de piezas estériles que comprenden el cáliz y la corola), y los dos últimos formado por las piezas fértiles (androceo y gineceo) (Figura 24).

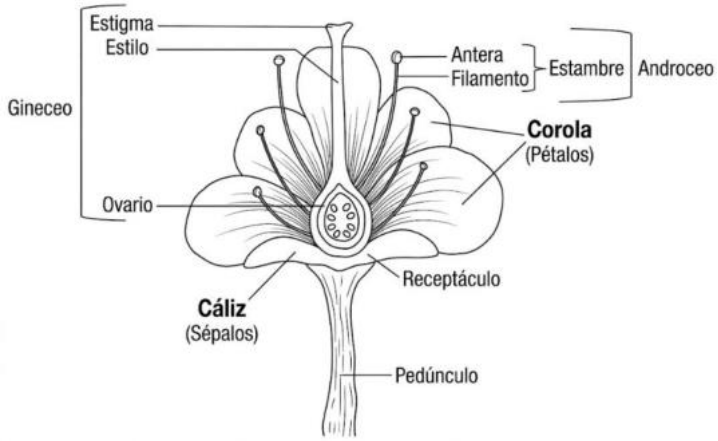


Figura 24. Macromorfología de una flor.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1- Cáliz: usualmente está formado por un número variable de hojas modificadas llamadas sépalos, generalmente simples y de color verde. Constituye el verticilo externo de la flor. Los sépalos pueden ser libres entre sí o ser concrescentes.

2- Corola: está constituida por los pétalos y es el verticilo interior que sigue al cáliz. Generalmente posee una textura suave y vivos colores. Puede ser dialipétala, cuando los pétalos son libres o gamopétala, cuando se hallan más o menos soldados entre sí.

Algunas células epidérmicas de los pétalos son *osmóforos,* o sea, contienen aceites esenciales que imparten una fragancia característica a las flores. Otros pétalos contienen pigmentos carotenoides (rojos, anaranjados y amarillos). Los pigmentos más importantes son los flavonoides, principalmente antocianinas, que se encuentran disueltos en el jugo celular; los pigmentos básicos son pelargonidina (rojo),

cianidina (violeta), y delfinidina (azul), otros flavonoides brindan el color amarillo o marfil. El color de los pigmentos antocianicos depende del pH del jugo celular. En *Brunfelsia australis* (familia Solanaceae) (jazmín paraguayo o diamelo) las flores son violáceas, al envejecer se vuelven blancas por un cambio en el pH.

3- Gineceo (pistilo): es el aparato sexual femenino, compuesto por carpelos (ovario, estilo, estigma), que constituyen en una flor completa el verticilo más interno:

- **El ovario:** es la parte inferior y ensanchada del gineceo, en cuya cavidad se insertan los óvulos. En dependencia de la forma de inserción del ovario en el receptáculo y su relación con las demás estructuras, este se puede clasificar en: **ovario súpero** (flor hipógina, el cáliz, corola y estambres se insertan sobre el receptáculo o tálamo por debajo del gineceo. Ejemplo: flor de la frutilla (*Fragaria chiloensis* L); **ovario medio o semiínfero** (flor perigina, el cáliz, la corola y estambres aparecen insertados en el tálamo acopado, más o menos profundo, en torno al gineceo. Ejemplo: flores de los géneros *Saxifraga*, *Euonymus* y algunos géneros de la familia Celastraceae) y **ovario ínfero** (flor epígina, el perianto y androceo semejan nacer o insertarse sobre el ovario. Ejemplo: géneros *Pyrus*, *Narcissus*, *Cucurbita*) (figura 25).



Figura 25. Tipos de flores según la disposición del ovario.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **El estilo:** es la porción delgada, cilíndrica y tubulosa que une al ovario con el estigma.

- **El estigma:** se encuentra en el extremo del estilo y es de forma muy variada según las especies; generalmente provisto de células papilares, las cuales segregan un líquido azucarado y pegajoso. Es el órgano adecuado para retener el polen y para que éste germine en él.

4- **Androceo:** constituye el aparato sexual masculino y está formado por un número variable de piezas llamadas estambres que se insertan por encima de la corola. Los estambres constan de dos partes: el filamento, mediante el cual el estambre se inserta al soporte; y la antera, que es la parte fértil terminal, formada a su vez por dos cavidades, (las tecas), que contienen las microesporas, conocidas por granos de polen.

2.19 Tipos de flores

2.19.1 Según las partes que las conforman (figura 23 A)

La flor que posee cáliz, corola, estambres y carpelos es **completa**. Si le falta alguno de ellos, se nombra **incompleta**. En el caso de que falten cáliz y corola, la flor es desnuda; cuando carece de sépalos se denomina asépala y cuando no tiene pétalos es apétala.

2.19.2 Según la presencia de órganos sexuales (Figura 26 B)

La flor hermafrodita es aquélla que tiene órganos masculinos (estambres) y femeninos (carpelos). Si sólo tiene estambres es unisexual masculina, y si tiene solamente carpelos unisexuales femenina. También están las flores estériles que carecen de estambres y carpelos. Muchas especies llevan flores masculinas y femeninas en el mismo pie de planta, se dice que son monoicas (robles, castaños, hayas, tilos, avellanos, pinos, entre otras). Sin embargo, en otros casos las flores masculinas y las femeninas aparecen en pies de plantas diferentes, en este caso son dioicas y aparecen árboles con sexo distinto, machos y hembras (chopos, sauces, tejo, acebos, entre otros).

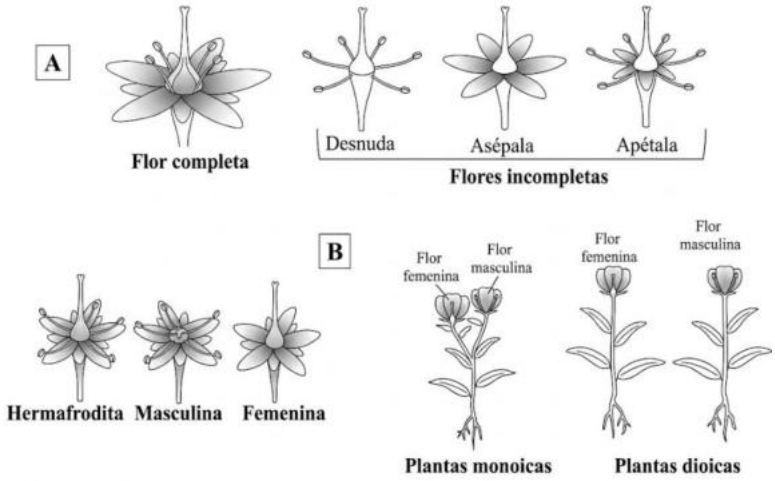


Figura 26. Tipos de flor según las partes que las conforman (A) y atendiendo a la presencia de órganos sexuales (B).

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

2.19.3 Según la forma de la corola (figura 26 A)

Si los pétalos que forman la corola están separados, la corola se llama dialipétala, y a su a vez puede ser:

- **Crucífera:** cuatro pétalos iguales dispuestos en forma de cruz.
- **Rosácea:** cinco pétalos iguales bastante anchos.
- **Aclavelada o cariofilácea:** cinco o un múltiplo de cinco pétalos iguales y estrechos.
- **Papilionácea o amariposada:** cinco pétalos desiguales, cuyo conjunto parece una mariposa.

Si los pétalos que forman la corola están unidos, la corola se llama

gamopétala, y a su a vez puede ser:

- **Acampanada:** los pétalos en forma de campana.
- **Embubada:** los pétalos en forma de embudo.
- **Labiada:** formada por cinco pétalos unidos, que en el extremo se separan en dos grupos formando una especie de labios.

2.19.4 Según el número de carpelos (figura 27 B)

- **Unicarpelar:** presenta un solo carpelo.
- **Pluricarpelar:** está constituida por varias hojas carpelares que se sueldan entre sí o se mantiene independiente.

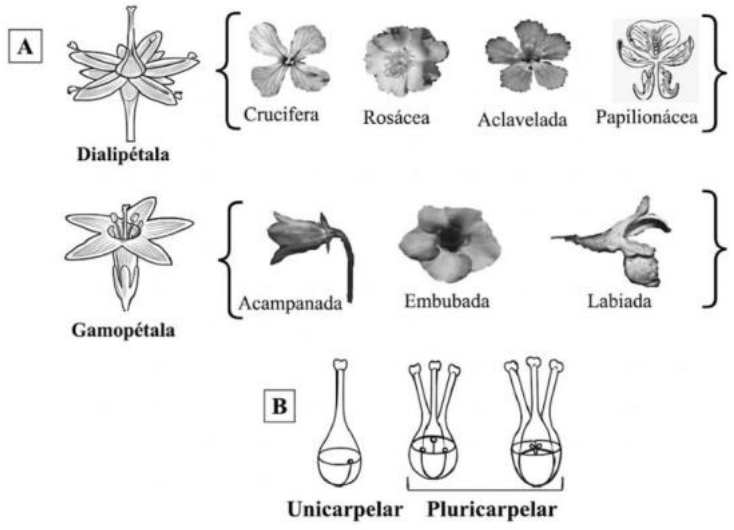


Figura 27. Tipos de flores atendiendo a la forma de corola (A) y según el número de carpelos (B).

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

2.19.5 Según la forma de las inflorescencias

Cabe destacar que las inflorescencias son el conjunto de flores que salen del mismo brote. Se pueden distinguir las **inflorescencias racimosas** (las flores comienzan a abrirse en la periferia y avanzan hacia el eje) y las **inflorescencias cimosas** (las flores se empiezan a abrir en el eje y avanza hacia la periferia). Ambos grupos pueden ser simples o compuestos, ya sea que las ramitas del eje principal terminen en una o en varias flores. Si, además, esas ramitas se vuelven a dividir, estamos ante una inflorescencia compuesta. Estas pueden ser homogéneas, si mantienen el mismo tipo de inflorescencia en todas las ramificaciones, o mixtas, si se combinan ambos tipos.

Las inflorescencias racimosas se corresponden con el tipo de ramificación monopodial, por ello, el eje sigue creciendo indefinidamente mientras las flores se abren desde la base hacia el ápice, y en los capítulos, la floración es centrípeta. En este grupo de inflorescencia se pueden distinguir las siguientes (figura 28):

- **Racimo:** eje alargado con flores pediceladas a los lados. Ej.: Ombú (*Phytolacca dioica*), conejito (*Antirrhinum majus*).

- **Corimbo:** semejante al racimo, pero los pedicelos tienen diferente longitud, de forma que las flores alcanzan el mismo plano. Ej.: peral (*Pyrus communis*), guindo (*Prunus cerasus*).

- **Racimo compuesto:** cada rama lateral del raquis se vuelve a dividir formando un nuevo racimo. Ej.: vid (*Vitis vinifera*).

- **Espiga:** raquis alargado, flores sésiles a los lados. Ej.: llantén

(*Plantago major*), gladiolos (*Gladiolus spp*.).

- **Amento:** raquis caedizo, lleva flores generalmente unisexuales. Ej.: castaño (*Castanea sativa*), nogal (*Juglans regia*).

- **Espádice:** raquis más o menos carnoso, con flores unisexuales, protegida por una gran bráctea, a veces carnosa. Ej.: cala (*Zantadeschia aethiopica*).

- **Estróbilo o cono:** raquis alargado con los óvulos desnudos protegidos por brácteas leñosas. Propio de gimnospermas. Ej.: pino (*Pinus spp*.)

- **Umbela:** pedúnculo brevemente ensanchado en la región distal, que lleva insertos pedicelos de la misma longitud. Ej.: hiedra (*Hedera hélix*).

- **Umbela compuesta:** la que en cada pedicelo porta una umbela. Ej.: hinojo (*Foeniculum vulgare*), cebolla (*Allium cepa*).

- **Espiguilla o espícula**: inflorescencia básica de gramíneas, en ella las flores se acompañan de un sistema de brácteas denominadas gluma y glumilla. Ej.: avena, arroz, maíz.

- **Capítulo o cabezuela**: pedúnculo ensanchado en forma de disco, más o menos cóncavo, que lleva hileras de flores liguladas en el exterior y flores tubulares en el interior, protegido por una o más hileras de brácteas. Familias compuestas.

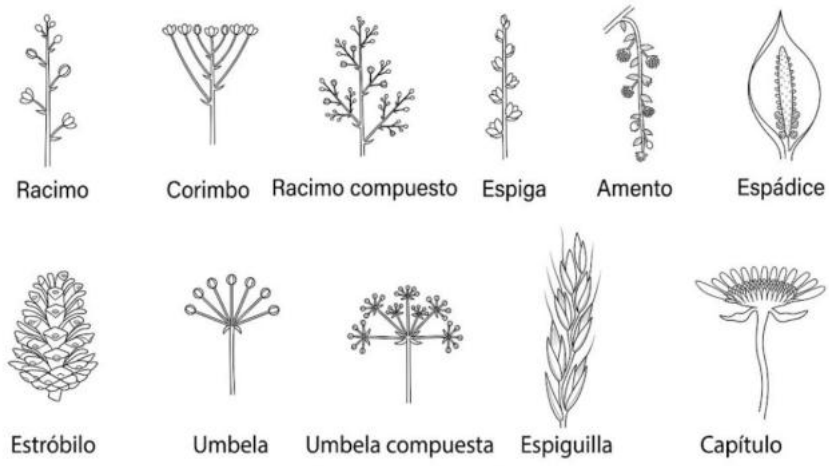


Figura 28. Tipos de inflorescencias racimosas.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

En las inflorescencias cimosas, el eje principal termina en una flor, por lo que cesa su crecimiento. En un nudo inferior, se desarrollan yemas que terminarán en sendas flores. Es común en este grupo de inflorescencias que la bráctea aparezca del lado contrario de la rama florífera. En este grupo de inflorescencia se pueden distinguir las siguientes (figura 29):

- **Cima helicoidal:** cuyas ramas floríferas salen a un lado y el otro alternadamente. Ej.: género *Hemerocallis*.

- **Cima dicotómica:** de la rama principal que remata en flor, surgen dos ramitas laterales terminadas en flor, debajo de estas flores se desarrollan otras dos ramitas anteriores que también rematan en flores, crecen en varios planos. Ej.: gipsofilla (*Gypsophila sp*.).

- **Cima umbeliforme:** con aspecto de umbela. Ej.: geranio (*Geranium sp*.).

- **Cima propiamente dicha:** pleiocasio de cimas dicotómicas. Ej: saúco (*Sambuco sp*.).

- **Cima corimbiforme:** cima con aspecto de corimbo. Ej: lino (*Linum usitatissimum*).

- **Cima capituliforme o glomérulo:** cima de flores de pedicelo breve dispuestas sobre un eje muy corto. Cuando el eje es carnoso, se denomina sincarpo. Ej: la mora (*Morus nigra*).

- **Sicono:** receptáculo común, globoso, con diminutas flores unisexuales en su interior, en la parte superior tiene una pequeña abertura protegida por brácteas pequeñas, sostenido por pedúnculo carnoso. Ej: higo (*Ficus carica*).

- **Ciatio:** involucro en forma de copa que lleva flores unisexuales en su interior. Presenta una única flor femenina, aperiantada, tricarpelar, y cinco flores masculinas reducidas a un único estambre cada una. Ej: género *Euphorbia*, estrella federal (*Euphorbia pulcherrima*).

- **Cima escorpioide o circinada:** las flores se disponen unilateralmente en el raquis. Esta adquiere forma de espiral, semejando a la cola de un escorpión, borraginácea. Ej: cola de gama (*Heliotropium curassavicum*).

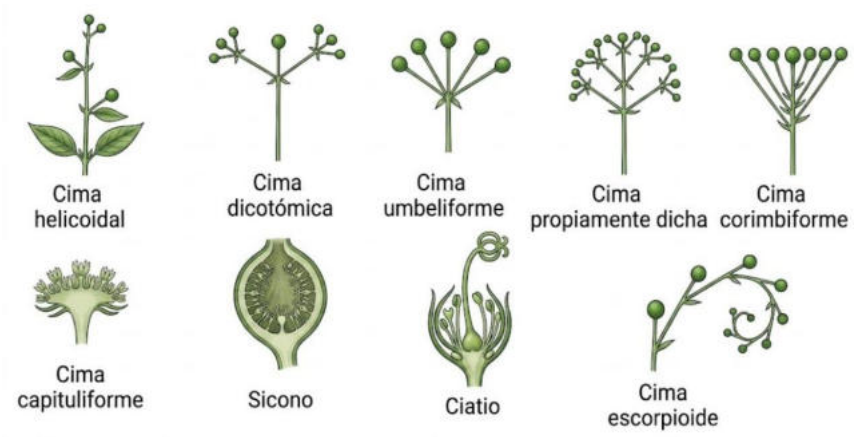


Figura 29. Tipos de inflorescencias cimosas.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Examen macroscópico

Al describir las flores hay que tener en cuenta las características siguientes:

- **Estado de desarrollo**.
- **Condición:** fresca, seca, completa o parte de ella.
- **Color y olor**.
- **Peculiaridades:** aspectos morfológicos más sobresalientes como son: tipo de inflorescencia, tipo de cáliz, tipo de pétalos, número de estos, tipo de ovario, estambres, entre otros.

2.19.6 Identificación de características macroscópicas del fruto

Características generales y morfología externa

El fruto es el órgano del aparato vegetativo de una planta que resulta a partir del ovario de una flor después de fecundado, desarrollado y maduro. Después de efectuada la fecundación, el ovario se agranda poco a poco, convirtiéndose en el fruto y el óvulo o los óvulos en las semillas. Las partes constitutivas del fruto son (figura 30):

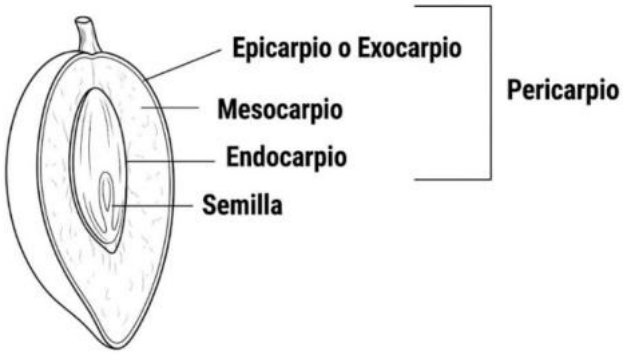


Figura 30. Macromorfología de un fruto.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Pericarpio: es la parte externa que rodea a la semilla y se subdivide en tres partes constitutivas:

Epicarpio: es la cara externa del fruto, puede tener variadas texturas: lisa, como en tomate (*Solanum lycopersicum*), cerosa, como en la uva (*Vitis vinifera*), pilosa, como el durazno (*Prunus persica*), glandulosa, como en la naranja (*Citrus x sinensis*), espinas en chamico (*Datura ferox*).

Mesocarpio: es la capa intermedia del fruto, generalmente comestible; puede ser delgado y seco, como el maíz (*Zea mays)*, o muy desarrollado, carnoso y jugoso, como el durazno (*Prunus persica*), o

con almidón, en el caso de la banana (*Musa x paradisiaca*), dando origen a frutos de colores vistosos y de sabores generalmente agradables.

Endocarpio: es la capa que recubre directamente la semilla; puede ser carnoso, como en la

uva (*Vitis vinifera*); apergaminado, como en el poroto (*Phaseolus vulgaris*); o lignificado, como en el durazno (*Prunus persica*). En el género *Citrus* se desarrollan pelos jugosos.

2.20 Semilla

Los frutos se clasifican según la cantidad de tálamos (porción final de una rama sobre la que se insertan las piezas florales) que los constituyen:

Frutos monotalámicos: cuando provienen de una sola flor y se pueden distinguir a los frutos **secos** y **carnosos**.

- **Frutos secos**: presentan el pericarpio reducido y a su vez se subdividen en:

- **Frutos secos indehiscentes:** cuando el fruto una vez maduro no se abre para dejar salir las semillas. Pueden ser (figura 31):



Figura 31. Frutos secos indehiscentes.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Cariópside: presentan la semilla muy unida al pericarpio (ej.: maíz, trigo, centeno, sorgo)

Aquenio: cuando presenta la semilla, generalmente, sin unirse al pericarpio (ej.: girasol, quinua).

Sámara: fruto con el pericarpio dilatado en forma de ala, proviene de ovario súpero (Ejemplo: tipa blanca (*Tipuana tipu*), quebracho colorado (*Schinopsis balansae*).

Geocarpo (legumbre indehiscente): fruto que completa su desarrollo y madura dentro del suelo (ej.: 'maní' *(Arachis hypogaea)*, familia Fabaceae)

Nuez: fruto semejante a un aquenio, pero de gineceo ínfero, con una semilla grande y con una cúpula basal "robles" (*Quercus* spp.) o envoltura total 'castaño' (*Castanea sativa*), fam. Fagaceae. Es un aquenio que tiene el pericarpio leñoso o coriáceo.

Frutos secos dehiscentes: se les llama también cápsulas o cajas; generalmente poseen varias semillas y de acuerdo a la dehiscencia pueden ser de diferentes tipos. También hay formas especiales de cápsulas entre las cuales se encuentran (figura 32):

- **Pixidio:** se abre mediante una tapa. Ej.: *Eucalyptus sp*
- **Legumbre:** llamada también vaina, se abre por ambos lados y las semillas se ubican a lo largo de la sutura central. Ej.: frijoles.
- **Silicua:** se abre de abajo hacia arriba por separación de dos hojas carpelares que tienen mayor largo que ancho. Ejemplo: mostaza.

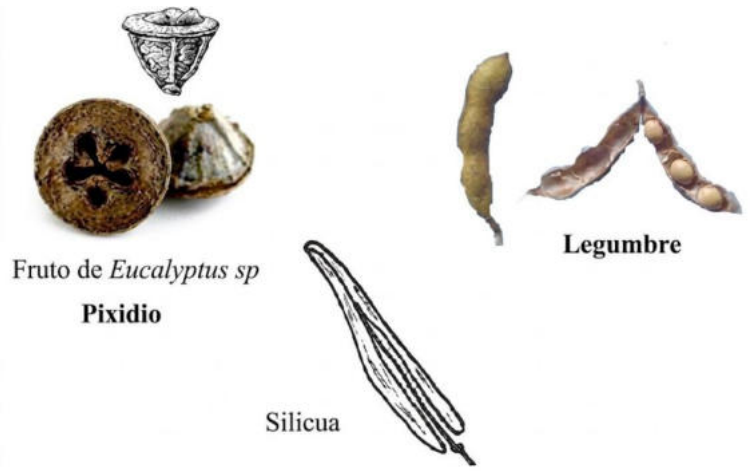


Figura 32. Frutos secos dehiscentes.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Carnosos: cuando el pericarpio se hace jugoso y blando, generalmente indehiscente. Se distinguen dos tipos (figura 33):

Baya: fruto con epicarpio membranoso, mesocarpio y endocarpio carnosos, tienen varias semillas. Ej: tomate, uva (*Vitis vinifera*), guayaba (*Psidium guajava*). Presentan las siguientes formas especiales:

- **Pepónide:** con el epicarpio más o menos duro, grueso al igual que el mesocarpio y el endocarpio carnoso donde se incluyen las semillas. Ej.: calabaza, melón, etc.

- **Hesperidio:** con el endocarpio formado por pelos glandulosos. Ej.: género *Citrus*.

- **Pomo o melónide:** el mesocarpio es carnoso, encerrando las semillas en el endocarpio a modo de lámina cartilaginosa. Ej.: manzana, pera, etc.

- **Balausta:** con pericarpio coriáceo y el interior dividido en cavidades mediante tenues membranas y repleto de múltiples semillas con cubierta carnosa. Ej.: granada.

- **Conocarpo:** fruto agregado o colectivo, formado por un receptáculo carnoso, que lleva insertos aquenios, en frutilla o fresa (género *Fragaria*) o bayas en chirimoya (*Annona cherimola*).

Drupa: fruto donde el epicarpio constituye la piel, el mesocarpio es carnoso y el endocarpio duro, unas veces leñoso llamado hueso que

encierra la semilla. Ej: mango, aguacate, durazno, aceituna, etc.

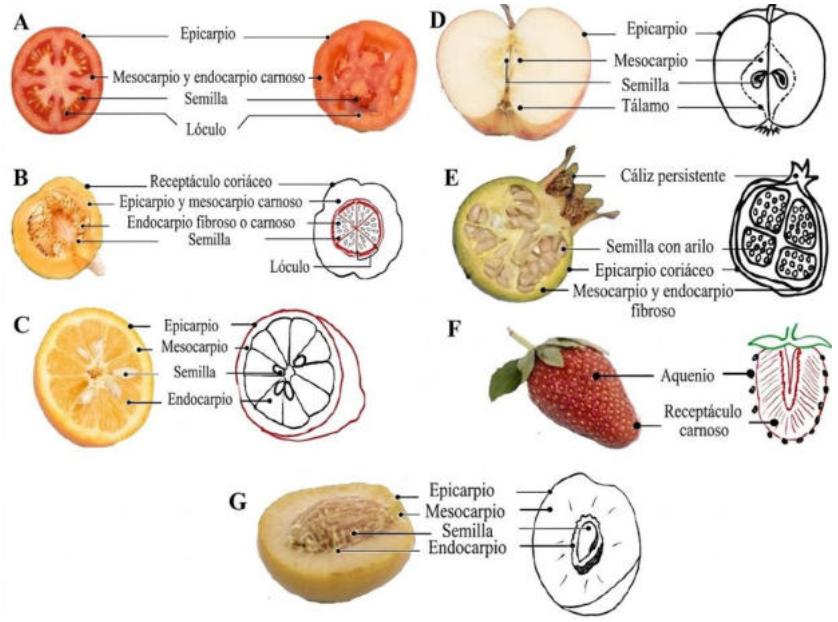


Figura 33. Frutos carnosos. Leyenda: A: baya; B: pepónide; C: Hesperidio; D: Pomo o melónide; E: Balausta; F: Conocarpo; G: Drupa.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Frutos politalámicos: se originan por la soldadura de los ovarios de varias flores, en ellos también crece el receptáculo. Se conocen como infrutescencias. Dentro de este grupo, se mencionan (figura 34):

Sorosio: frutos carnosos soldados sobre un raquis carnoso. Ej.: ananá (piña, *Ananas comosus*), mora (*Morus alba*).

Sicono: receptáculo piriforme o globoso, hueco, que lleva en su interior frutos pequeños con abertura apical protegida por hipsofilos o brácteas (hojas que se producen en las proximidades de las flores y se distinguen de las hojas normales). Ej: higo (*Ficus carica*).

Estróbilo: se compone de un raquis leñoso que lleva brácteas leñosas dispuestas cíclica o helicoidalmente, protegiendo las escamas seminíferas. Ej.: pinos (*Pinus spp*.), cedros (*Cedrus spp*.).

Gálbulo: las semillas se hallan protegidas de brácteas carnosas. Ej.: juniperus o enebro.

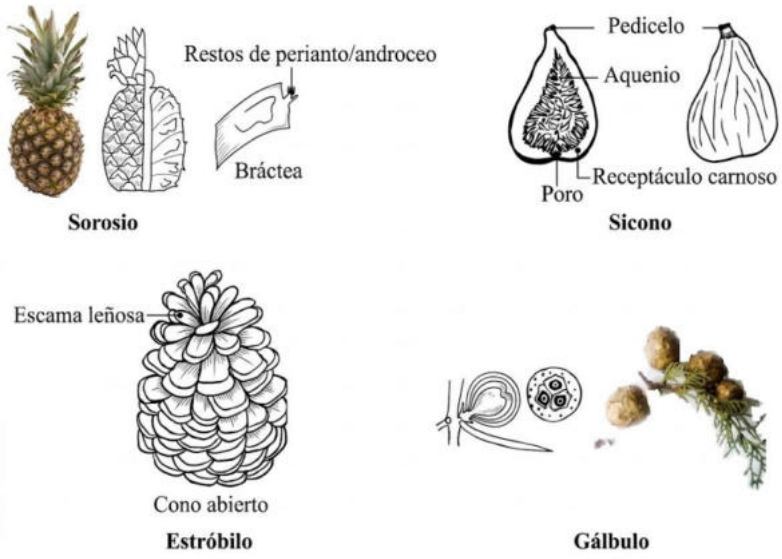


Figura 34. Frutos politalámicos.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Examen macroscópico

Las características más importantes a observar en un fruto son:

1. Tipo de fruto.
2. Forma.
3. Tamaño.

4. Olor y color.

5. Pericarpio: olor, textura, uniforme o modificado, marcas externas.

6. Dehiscencia.

2.21 Identificación de características macroscópicas de la semilla

Características generales y morfología externa

La semilla es el óvulo desarrollado y maduro después de la fecundación que permite en muchos casos la propagación de planta. Contiene el embrión y sustancias de reserva. Este

órgano está constituido por las partes siguientes (figura 35):

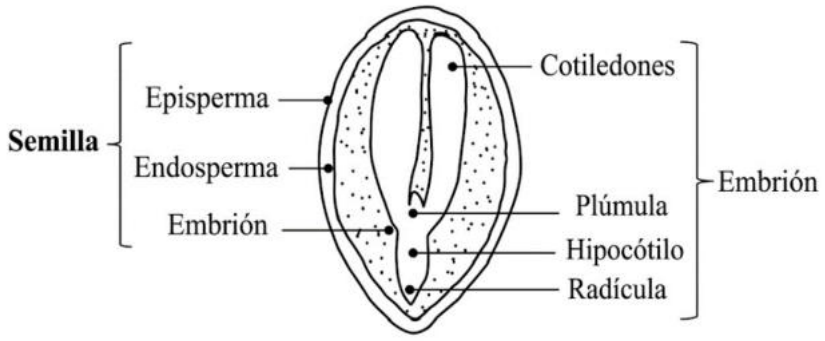


Figura 35. Macromorfología de la semilla.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

1- **Tegumento o envoltura:** es la cubierta de la semilla y sirve de protección contra la lesión y desecación. El tegumento externo se convierte en **testa** y el tegumento interno en **tegmen**, ambos toman el nombre común de **episperma** y constituye la

vulgarmente llamada cáscara de la semilla.

2- **Endosperma o albumen:** es una masa blanquecina que contiene gran cantidad de sustancias nutritivas para alimentar al embrión durante la germinación de la semilla.

3- **Embrión**: es la parte más importante de la semilla, considerada como la planta en miniatura. Está conformado por:

- Radícula: es el esbozo de la raíz principal.

- Hipocótilo: representa el espacio entre la radícula y la plúmula. Posteriormente, con la germinación de las semillas esta parte se convertirá en el tallo de la planta.

- Plúmula o Talluelo: emerge del suelo y desarrolla hojas jóvenes y tallos.

- Cotiledones: pueden convertirse en las primeras hojas de la plántula. Se denominan también hojas embrionarias.

El color de las semillas es variado. Las células de los tegumentos poseen diversos pigmentos que le dan el color característico. Los colores marrón y negro son los más comunes. El rojo, el blanco y el amarillo, son menos frecuentes, y sirven como medio de atracción para los animales. La superficie puede ser lisa o diversamente esculturada. La forma de la semilla está determinada por el tipo de óvulo a partir del cual se ha formado, por el patrón de crecimiento que ha seguido y por la posición que ocupa en el interior del fruto. Si predominan el

ancho y largo sobre el grueso se habla de semillas planas, por el contrario, si prima el grueso se denominan tridimensionales. Las formas de las semillas pueden equipararse a formas geométricas (circular, elípticas, oblongas o reniformes). En el caso de semillas tridimensionales, las formas son más complejas (ovoides, angulosas o discoides, entre otras).

La forma (figura 33 A) también está relacionada con el medio de dispersión que utiliza la semilla para ser propagada en el espacio. Así, las semillas que utilizan como medio de dispersión los mamíferos o las aves, suelen ser esféricas u ovoides, de modo que pasen por el tracto digestivo sin dificultad sin ser deterioradas.

Cuando el medio de propagación es el agua, las semillas suelen ser más voluminosas y ligeras. Para ello, cuentan en su interior con estructuras globosas con bolsas de aire o tejidos esponjosos. En el caso de propagarse utilizando corrientes de aire, presentan en muchos casos formas aladas.

Al clasificar las semillas por su tamaño (figura 36 B), encontramos que existe una gran variedad entre especies, incluso entre variedades de la misma especie. Ejemplo de semillas grandes tenemos las del aguacate, las habas, incluso, la semilla más grande del mundo de la palmera *Lodoicea maldivica* (Familia Arecaceae), conocida por los nombres comunes de coco de mar y su semilla por el nombre de "nuez de Seychelles", que puede llegar a pesar 20 kg de peso. En el extremo opuesto se encuentran las semillas de tabaco, las de orquídeas, entre otras.

El tamaño de las semillas no solo está relaciopnado con el material de reserva que acumula para su germinación y crecimiento. También está condicionado con el medio en que se desarrollan, la disponibilidad de humedad, la facilidad para captar luz o la cantidad de nutrientes que hay en el suelo.



Figura 36. Semillas según su forma y tamaño.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

2.22 Examen macroscópico

Las semillas pueden presentarse enteras, molidas o una sola parte de ellas. Las características más relevantes son:

- Caracteres físicos: forma, dimensión, dureza, peso, etc.
- Testa: textura, espesor, color, características superficiales.
- Tegmen: presente o ausente.

- Endospermo: presente o ausente.
- Olor y color.
- Peculiaridades.

2.23 Características microscópicas y su uso en el análisis de drogas crudas. Histoquímica

El examen microscópico o análisis micrográfico a veces revela detalles significativos, no sólo para confirmar la identidad de la planta sino también para identificar la naturaleza de adulterantes mezclados, intencionalmente o no, en la droga. La descripción microscópica de los diferentes detalles anatómicos brinda un medio valioso que asegura su calidad.

Los órganos vegetales están constituidos por células y tejidos cada uno de los cuales desempeña una función que es esencial para la vida de la planta. El reordenamiento de los tejidos en un órgano vegetal es una característica que le permite su diferenciación, ya que los mismos varían notablemente entre plantas y entre las partes de una misma planta, de ahí la importancia que tiene la histología, la cual se ocupa del estudio microscópico de los caracteres anatómicos o morfológicos de las células y tejidos, y revela el carácter y distribución de los mismos tal y como se encuentran en la droga.

Antes de proceder con los aspectos histológicos e histoquímicos de los órganos vegetales, es importante conocer algunos detalles necesarios para la obtención de los cortes histológicos.

2.24 Técnicas histológicas

Para poder definir los detalles anatómicos del material vegetal es necesario el desarrollo de técnicas histológicas que faciliten su observación al microscopio:

1- **Corte manual:** es la forma grosera y rápida, pero no reproducible de realizar cortes, con una cuchilla, bisturí, etc. Estos cortes son de espesor variado y no siempre permiten una adecuada observación de los detalles morfológicos (80-100 m).

2- **Corte con micrótomo**: permite obtener cortes muy finos y reproducibles (1-50 m) mediante un equipo denominado micrótomo, siendo más usuales los simples o mecánicos y los de congelación.

Para realizar cortes finos por este método, es necesario darle a la muestra la debida consistencia, lo cual se logra mediante técnicas de congelación y de inclusión, las cuales pueden ser de diferentes tipos, como se describe en la figura 37.



Figura 37. Métodos de separación de muestras histológicas.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Técnicas de corte por congelación: constituye una de las técnicas más precisas y pueden utilizar las variantes siguientes:

- **Criostato:** consiste en una cámara a baja temperatura en cuyo interior se dispone de un micrótomo que se maneja con guantes especiales desde el interior. Tiene como ventaja que todo el sistema en su conjunto está a la misma temperatura, lo cual facilita el corte.

- **Con anhídrido carbónico: es el método más popular.** El cabezal tiene muchos orificios por donde se deja expandir el gas y como consecuencia se congela el mismo. La muestra se fija y congela junto al cabezal para su corte con la cuchilla del micrótomo.

- **Con nitrógeno líquido:** es una variante del anterior que congela el cabezal con nitrógeno líquido (-180 °C) y la cuchilla del corte con vapores del propio nitrógeno a baja temperatura

2.25 Técnica por inclusión

Es una técnica que utiliza la parafina, gelatina o carbowax para fijar la muestra que se va a cortar en un bloque. Esta técnica requiere de la muerte y fijación del material de forma diferente a los métodos de congelación que es muy fácil (24-48 horas embebida en el líquido de inclusión), para que mantenga inalterable su composición tisular. Esto se debe a que determinadas estructuras celulares no pueden verse en un organismo vivo y, sin embargo, después de fijadas por procedimientos adecuados con posterioridad a la muerte, es posible su observación.

Para una adecuada muerte y fijación la muestra debe ser lo más pequeña posible y con la mayor área en contacto con los líquidos para matar y fijar. Los reactivos más generalizados para matar y fijar la muestra son: etanol, ácido acético, ácido pícrico, ácido crómico, ácido ósmico, cloruro mercúrico o iodo en combinaciones con los anteriores.

Inclusión en parafina

Para la inclusión en parafina, las muestras no deben ser mayores de 8 mm. Después de matar el material con algunos de los reactivos descritos o sus combinaciones, se programa el lavado del material 2 horas como mínimo y máximo 24 horas con cada una de las siguientes combinaciones en el mismo orden y forma consecutiva:

- Etanol al 5 % en agua
- 11 % en agua
- 18 % en agua
- 30 % en agua
- 50 % en agua
- 70 % en agua 24-48 horas.
- Alcohol terbutílico o n-butílico puro (tres veces) en cada periodo de tiempo

Terminado el proceso de lavado se comienza la infiltración. Con una mezcla de parafina y alcohol terbutílico-butílico (1:1) se trata la

muestra durante 1-4 horas. Posteriormente, ésta se coloca en parafina fundida en la estufa el tiempo necesario para eliminar el alcohol por evaporación y finalmente, se deja enfriar en un molde adecuado con parafina previamente fundida.

Inclusión en Carbowax

Se realiza la misma técnica y pasos que se describieron para la inclusión en parafina. En lugar de parafina para la infiltración se utiliza Carbowax 600 y pasa el proceso final en la estufa, y la inclusión se realiza con Carbowax 1500.

2.26 Tejidos vegetales

1- Tejido de crecimiento (meristemo)

- El meristemo es el tejido que se encarga del crecimiento del vegetal. Presenta la primera parte del desarrollo de la planta, constituido por un cúmulo de células indiferenciadas en constante y rápida división. Las células meristemáticas tienen aspecto poliédrico y equidimensional, presentan vacuolas pequeñas y abundantes, así como una pared celular delgada, sin pared secundaria. De acuerdo con la naturaleza de las células que le dan origen, los meristemos se pueden clasificar en (figura 38):

- **Meristemos primarios o apicales:** son responsables de la formación del cuerpo primario de la planta y de su crecimiento en longitud. Se encuentran en los ápices de raíces y tallos, principales y laterales. En el tallo, el meristemo se denomina **meristemo apical caulinar** y está protegido por los primordios (órgano que empieza a

formarse) foliares que lo envuelven formando las yemas. En la raíz principal el meristemo se denomina **apical radical** que está protegida por la caliptra (cobertura cónica que rodea al ápice de la raíz contra daños mecánicos causados por el suelo).

- **Meristemos primarios o apicales:** son responsables de la formación del cuerpo primario de la planta y de su crecimiento en longitud. Se encuentran en los ápices de raíces y tallos, principales y laterales. En el tallo, el meristemo se denomina **meristemo apical caulinar** y está protegido por los primordios (órgano que empieza a formarse) foliares que lo envuelven formando las yemas. En la raíz principal el meristemo se denomina **apical radical** que está protegida por la caliptra (cobertura cónica que rodea al ápice de la raíz contra daños mecánicos causados por el suelo).

- **Meristemos secundarios o laterales:** producen los tejidos que se añaden al vegetal después del crecimiento primario y hacen posible el crecimiento en grosor del mismo. Se disponen paralelamente a los lados del tallo y la raíz, órganos donde se presentan. Estos meristemos son típicos de Gimnospermas y Dicotiledóneas.

Hay dos tipos de meristemos secundarios: el **cámbium vascular**, que origina los tejidos conductores secundarios (xilema y floema secundarios) y el **cámbium suberoso o felógeno**, que origina el peridermis (tejido de protección).

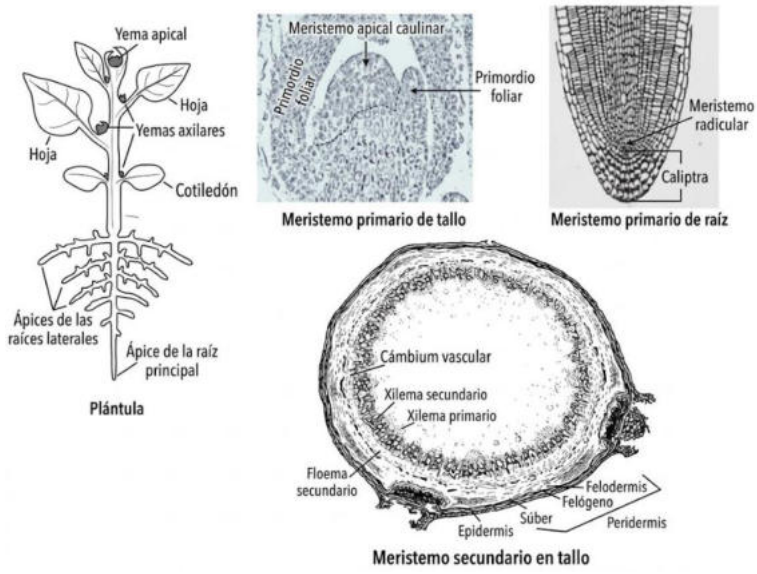


Figura 38. Tipos de meristemos según su origen.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

2- Tejido de protección: corresponden a los tejidos que protegen los órganos del medio externo y a su vez permiten el intercambio gaseoso. Entre los tejidos de protección tenemos el epidérmico y el suberoso.

Tejido epidérmico: es un tejido primario de protección de los órganos aéreos jóvenes (tallos, hojas, peciolo...), conformado por células vivas ordenadas regularmente sin intersticios y sin cloroplastos en la pared celulósica. La parte externa de las células epidérmicas pueden estar recubierta por una capa impermeable de cutina formando la cutícula de espesor variable (figura 39 A).

La epidermis consta de tres tipos principales de células:

Células del pavimento, células básicas o fundamentales: se encuentran en la capa más externa de las plantas. Su función principal es formar una capa protectora para las células más especializadas que se localizan debajo

Estomas: son estructuras que se encuentran en la epidermis de las hojas a manera de abertura u ostiolo, formados por dos células oclusivas y células anexas o subsidiarias. La principal función es permitir la apertura o cierre estomático, lo que regula el intercambio gaseoso e hídrico. Se pueden clasificar en (figura 36 B y 36 C):

- **Anomocítico o ranunculáceo:** las células anexas son idénticas a las demás células epidérmicas, de tal manera que se presentan en un número indeterminado. Por lo general, las más frecuentes están en las dicotiledóneas.

- **Anisocítico o crucífero:** cuando presentan tres células anexas en las que una puede ser de menor o mayor tamaño.

- **Diacítico o cariofiláceo:** las células anexas se disponen de manera horizontal sobre la disposición vertical de las oclusivas.

- **Paracítico o rubiáceo:** las células anexas se disponen de manera vertical, igual que las células oclusivas.

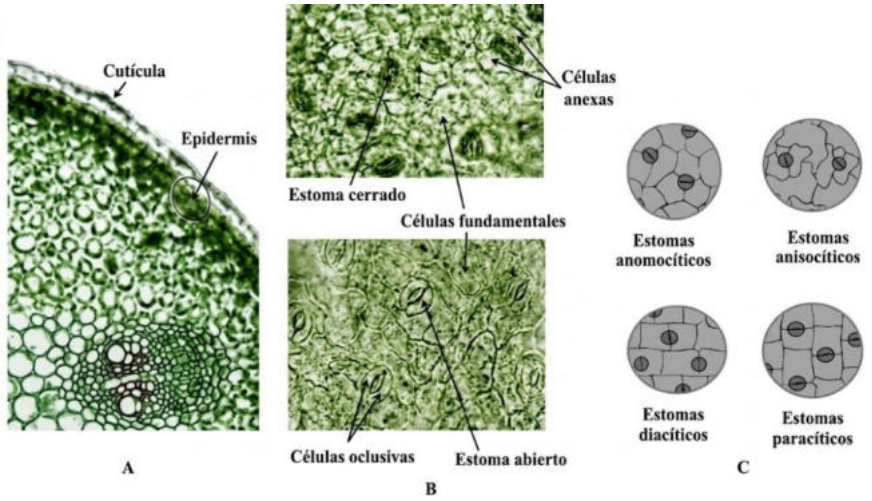


Figura 39. Epidermis (A), estructura general de un estoma (B), tipos de estomas (C).

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Algunas plantas desarrollan pelos o tricomas (figura 40), que son apéndices epidérmicos con singularidad de formas, estructuras, consistencia y funciones. Estos son importantes en la protección, y cuya variabilidad se presenta en pelos glandulares, papilas, escamas y pelos radiculares. Algunas especies carecen de tricomas, por lo tanto, su epidermis es glabra.

De acuerdo al número de células, los tricomas pueden ser **unicelulares** o **pluricelulares**, conformados por células vivas o muertas. Cuando las células están muertas generan cámaras con espacio para almacenar aire, con función aislante. El tricoma unicelular está compuesto por una célula que determina su tamaño pequeño. Los tricomas pluricelulares de acuerdo a su estructura organizacional pueden ser uniseriados (forman una fila de células verticales) o tricomas

multiseriados (se componen de varias filas de células verticales). Además, los tricomas pueden tener formas características entre las que se encuentran Malpighi, o dos brazos, como su nombre indica simulan dos brazos extendidos que nacen a partir de una base. Por su parte, los tricomas glandulares poseen glándulas secretoras de sustancias en la célula apical.

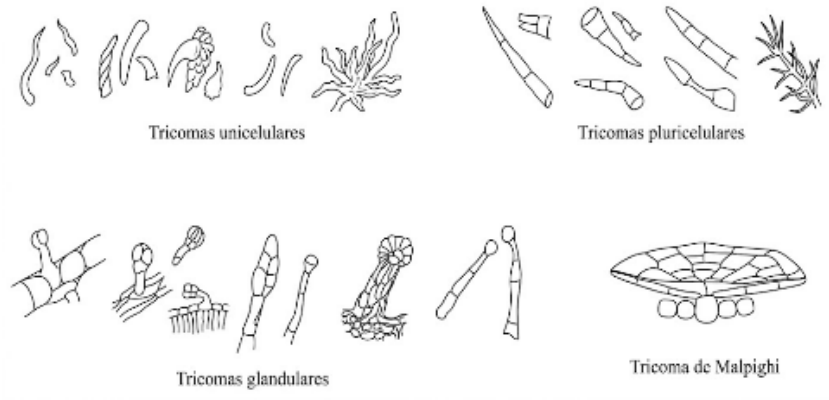


Figura 40. Tipos de tricomas o pelos foliares.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

En términos generales se puede plantear que las funciones normales del tejido epidérmico de las partes aéreas de las plantas son entre otras: limitar la transpiración, dar protección mecánica, regular el intercambio de gases y acumular agua y otros productos metabólicos.

Tejido suberoso: es un tejido de protección que sustituye a la epidermis cuando esta muere o se desprende. Lo anterior es un fenómeno común en los tallos y raíces con un crecimiento secundario durante todo su desarrollo, los restos de la epidermis o las capas corticales externas suberifican sus paredes para darle protección a la

planta.

El tejido suberoso se origina a partir del meristemo secundario. Las células suberosas (figura 41) son aproximadamente de forma variada, pueden adoptar forma prismática, a menudo algo alargadas en sentido paralelo al eje longitudinal del tallo o de la raíz y están dispuestos de forma compacta, sin espacios intercelulares. Presentan sus paredes engrosadas con suberina, proceso que comienza antes que las células alcancen su tamaño definitivo. El color de estas células depende, de la presencia de compuestos químicos tales como: taninos, resinas y politerpenoides.

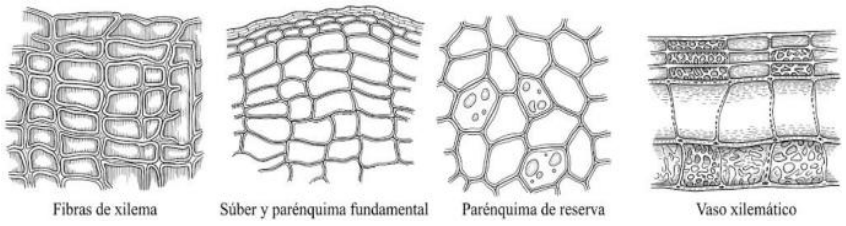


Figura 41. Células del tejido suberoso.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Algunos autores utilizan la siguiente terminología para los tejidos de protección diferentes al epidérmico:

- **Capa pilífera:** corresponde a una capa única de células de pared celulósica que a veces se alargan transformándose en pelos absorbentes. Es el tejido de protección de las raíces.

- **Capa suberosa:** corresponde a una capa de células más o menos suberificada que protege la región subterminal de la raíz después

de la caída de los pelos absorbentes.

- **Capa suberoide**: es típica solo de plantas monocotiledóneas y se forma en las raíces de las mismas por superposición de capas de células suberificadas.

- **Súber:** es un tejido de protección secundario que se encuentra en las ramas y en las raíces. A diferencia de la capa suberoide el súber es un tejido cuyas células están ordenadas en filas radiales.

3- Tejidos fundamentales: parénquima, colénquima y esclerénquima

Parénquima: está constituido por células vivas de morfología y fisiología variables, relacionado con la actividad vegetativa de la planta. También da origen a los tejidos del colénquima y el esclerénquima. Por tal motivo, es el principal constituyente del tejido fundamental. Juega un papel importante en la fotosíntesis, respiración y almacenamiento. Las células parenquimatosas pueden formar parte del xilema y floema, desempeñando un papel importante en relación con la translocación (del agua, sustancias minerales y elaboradas) por los elementos conductores.

De acuerdo a su función y estructura pueden subdividirse en los siguientes tipos: clorofílico, de reserva, acuífero, aerífero, de relleno y el parénquima que acompaña a los vasos conductores que pueden ser xilemático o floemático (figura 42).

Parénquima clorofílico o clorénquima: está especializado en la

fotosíntesis, gracias a que sus células contienen numerosos cloroplastos. Se encuentra por lo general debajo de la epidermis, donde la luz llega más fácilmente, principalmente, en las hojas, aunque también es común en zonas superficiales de tallos verdes y frutas inmaduras.

El clorénquima de la hoja se denomina mesófilo y en plantas dicotiledóneas se divide en: parénquima en empalizada (más expuesto al sol, lleva mayor tasa de fotosíntesis, sus células son más alargadas, densamente empaquetadas y se encuentran en la haz de la hoja) y parénquima lagunar o esponjoso (de células irregulares con poco cloroplastos y abundantes espacios intercelulares, que permiten la difusión de los gases a través de toda la estructura foliar y generalmente situado hacia el envés de la hoja).

Parénquima de reserva: se ubica en la parte más profunda de los órganos y en particular de los subterráneos (raíces, tubérculos, bulbos, entre otros) y en las semillas acumulando cantidades de sustancias como azúcares, proteínas, almidón, aceites, entre otros.

Parénquima acuífero: se especializan en el almacenamiento de agua. Esto es debido a la presencia de mucílagos en las vacuolas, que aumentan la capacidad de las células de absorber y retener agua. Es característico de plantas suculentas**.**

Parénquima aerífero: en este tipo es frecuente observar células estrelladas de paredes celulósicas (idioblastos) que brindan sostén al mismo. Este parénquima no solo permite la aireación, también es un elemento de soporte y floración.

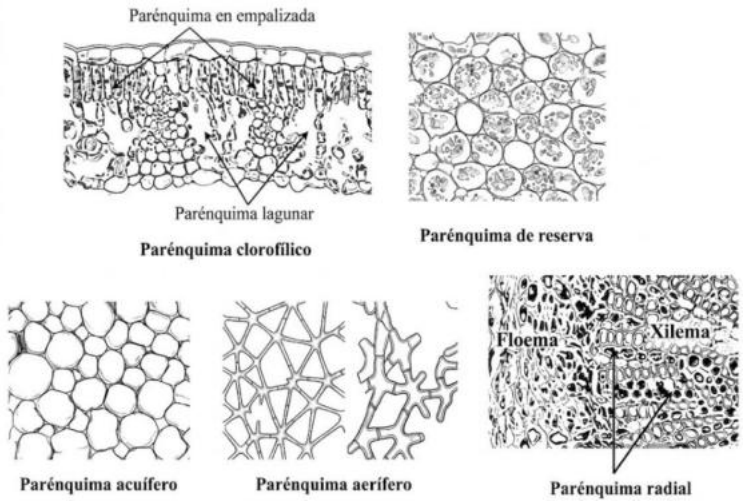


Figura 42. Tipos de tejidos parenquimáticos.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Colénquima: constituye un tejido de sostén de tipo celulósico, superficial y se encuentra en los órganos aéreos jóvenes en vías de crecimiento. Las células que lo constituyen son alargadas, en sentido paralelo al eje principal del órgano en el que se encuentra. La principal función es dar resistencia mecánica a los órganos en crecimiento activo, debido a que pueden incrementar su espesor y la superficie de las paredes al mismo tiempo. Es el primer tejido de sostén en los tallos, hojas y partes florales, y el principal apoyo de las hojas de algunos tallos verdes. En general se distinguen cuatro tipos de colénquimas (figura 43):

- **Colénquima angular:** espacios intercelulares de celulosa formando ángulos.

- **Colénquima redondo:** espacios intercelulares de celulosa distribuido regularmente alrededor de las células.

- **Colénquima tangencial:** espacios intercelulares de celulosa paralelos al borde del órgano y tangenciales a nivel de la pared celular.

- **Colénquima laminar:** depósito de celulosa en el contorno de los meatos (diminutos espacios huecos intercelulares que hay en los tejidos parenquimáticos).

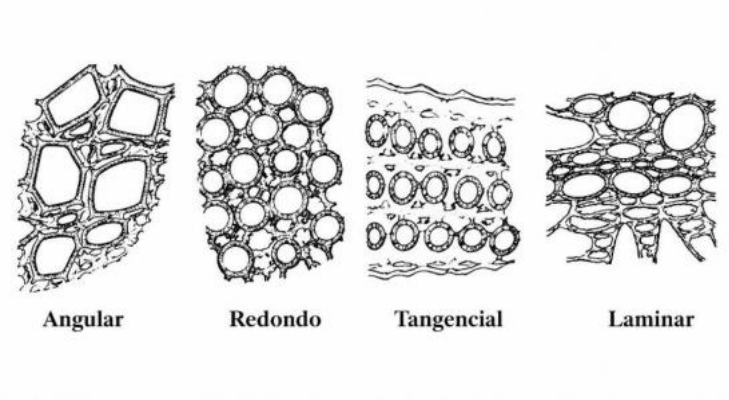


Figura 43. Tipos de células colenquimáticas.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Esclerénquima: es un tejido de sostén lignificado constituido por células muertas que poseen una pared secundaria impregnada de lignina en forma de puntos. Se encuentra en órganos que han dejado de crecer. Su principal función es proporcionar resistencia mecánica y protección a los órganos con crecimiento primario y secundario; sin embargo, es más abundante en tallos y hojas que en raíces. Se distinguen dos tipos de células, las fibras y las esclereidas (figura 44).

Las fibras: son células alargadas y fusiformes, con extremos puntiagudos; suelen presentar un lumen estrecho debido al grosor de las paredes celulares secundarias, con grado de lignificación variable influenciado por las hormonas vegetales (auxinas y giberelinas) que regulan el depósito de lignina en la pared celular. Se localizan en el tallo, hojas, raíces y frutos, asociadas a los tejidos. En el xilema y floema se encuentran en forma de casquetes con los haces vasculares, en grupos o dispersas.

Las esclereidas: son un tipo de esclerénquima que presentan paredes secundarias gruesas y lignificadas, con punteaduras isodiamétricas y más pequeñas que las fibras. También son llamadas células pétreas. Son más abundantes en dicotiledóneas que en monocotiledóneas, y están presentes en tallos, hojas, frutos y semillas. En algunas ocasiones, se asocia al xilema o al floema, y por lo general se encuentran en el parénquima del córtex, la médula del tallo o de raíces, en el mesófilo de la hoja, la pulpa de frutos carnosos y la testa o cubierta de la semilla. Las esclereidas se clasifican en:

- **Braquiesclereidas:** propiamente llamadas células pétreas, son isodiamétricas y se encuentran en la pulpa de algunos frutos.

- **Macroesclereidas o células de Malpighi:** son alargadas y columnares, se pueden observar en la testa de semillas, como las leguminosas.

- **Osteoesclereidas:** son alargadas y abultadas en los extremos, en forma de hueso; están presentes en la cubierta de las semillas y

en algunas hojas.

- **Tricoesclereidas:** presentan forma de pubescencia epidérmica, algunas veces con ramificaciones.

- **Astroesclereidas:** presentan forma de estrella, se encuentran en pecíolos y limbos foliares.

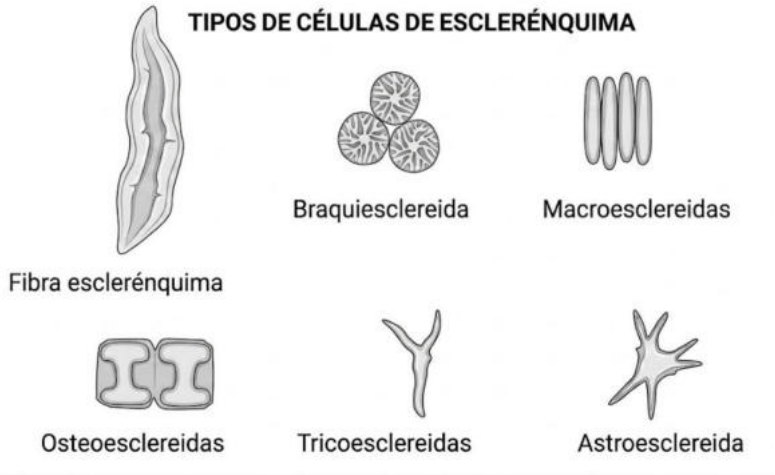


Figura 44. Tipos de células esclerénquima.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

4- Tejidos de conducción: son los que aseguran la circulación del agua y sustancias orgánicas. También son tejidos que hacen de soporte, a modo de esqueleto de las partes aéreas de la planta y dan consistencia a las subterráneas. Otra función es que permiten la comunicación entre diferentes partes de la planta, ya que son vías por las que viajan las hormonas.

Durante el crecimiento primario de la planta se originan el xilema y el

floema primarios. Si la planta tiene crecimiento secundario se forman el xilema y floema secundarios a partir del meristemo cámbium vascular. Todos se localizan próximos entre sí en todos los órganos de la planta (figura 45):

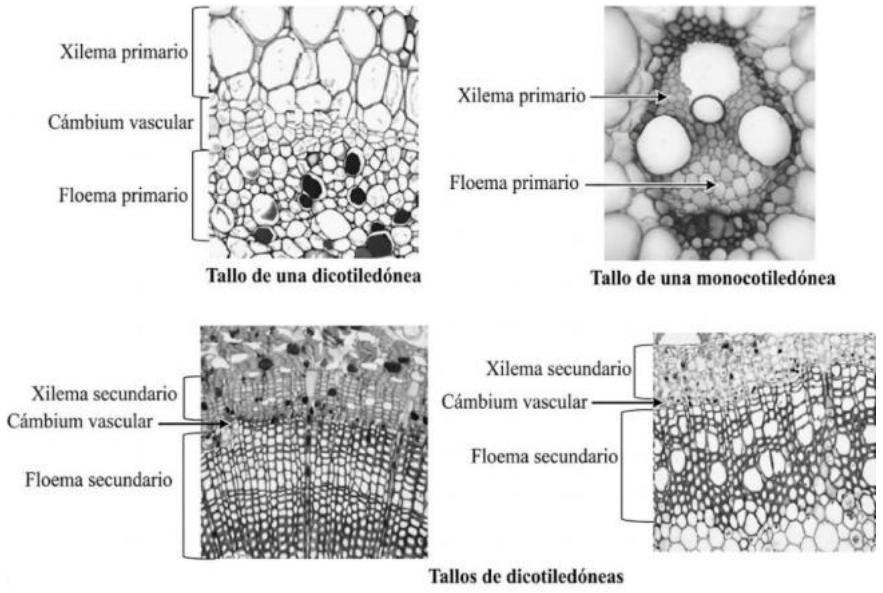


Figura 45. Tejidos de conducción xilema y floema.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

Xilema o leño: transporta el agua y las sales minerales provenientes, fundamentalmente, de la raíz al resto de la planta, aunque también transporta otros nutrientes y moléculas señalizadoras. Es también el principal soporte mecánico de las plantas. Se encuentran varios tipos de células: los **elementos de los vasos o tráqueas**, las **traqueidas** (ambos son elementos conductores), las **células parenquimáticas** (células de almacenamiento o comunicación) y las **fibras de esclerénquima** y las **esclereidas** (tienen función de protección y

soporte) (figura 43).

Floema, líber o tejido criboso: la principal función es transportar y repartir por todo el cuerpo de la planta las sustancias carbonadas producidas durante la fotosíntesis, o aquellas sustancias movilizadas desde lugares de almacenamiento, además de hormonas vegetales. Está formado por los **elementos conductores** que son los **tubos o elementos cribosos** y **las células cribosas** (ambos tipos de células son vivas), y los **elementos no conductores** como **células acompañantes** (son células parenquimáticas especializadas que se encuentran asociadas a los tubos cribosos), **parénquima** (se encargan del almacenamiento de sustancias de reserva, son menos especializadas que las células acompañantes y están relacionadas con los elementos cribosos), **fibras** (se presentan en el floema primario y el secundario) y **esclereidas** (figura 46).

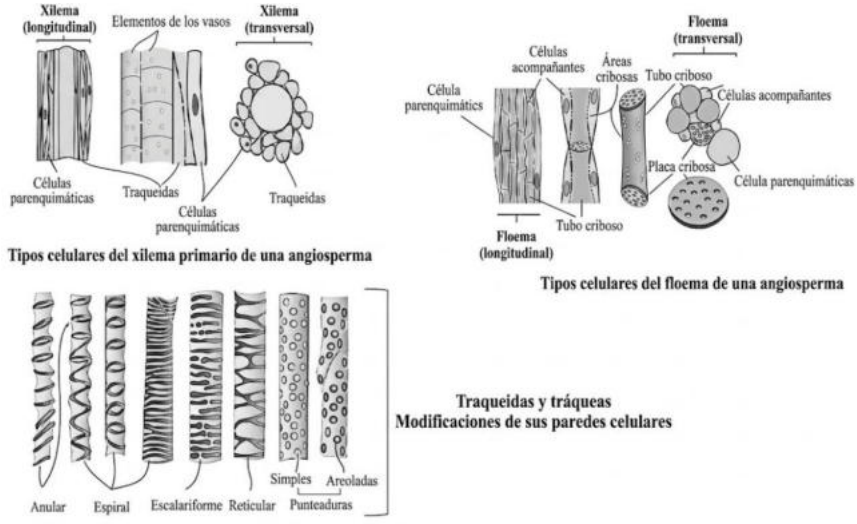


Figura 46. Principales elementos celulares del xilema y floema.

Fuente: Imagen mejorada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

5- Tejidos secretores: son los tejidos especializados en la síntesis de ciertas sustancias (aceites esenciales, resinas, látex, entre otras). Son muy variados en dependencia de su origen, la organización y la naturaleza del producto segregado. Se pueden diferenciar los siguientes:

- **Células segregadoras**: son de origen epidérmico, donde se destacan en particular los pelos, que siendo de cualquiera de los tipos conocidos, se caracterizan por un abultamiento o "teta" terminal donde se acumula la sustancia a segregar.

- **Bolsas segregadoras**: corresponden a cavidades localizadas en el parénquima de las hojas, ramas y frutos de algunos vegetales. Estas bolsas o canales se rodean por dos células especializadas y se distinguen tres tipos (figura 47):

- Bolsas esquizógenas: se forman de una célula parenquimática que se subdivide en cuatro células por dos uniones sucesivas y perpendiculares una respecto a la otra. Esta bolsa se agranda por divisiones ulteriores de forma radial.

- Bolsas esquizolisígenas: se forman igual que la anterior, pero por uniones tangenciales.

- Bolsas lisígenas: resultan de la lisis completa de un grupo de células.

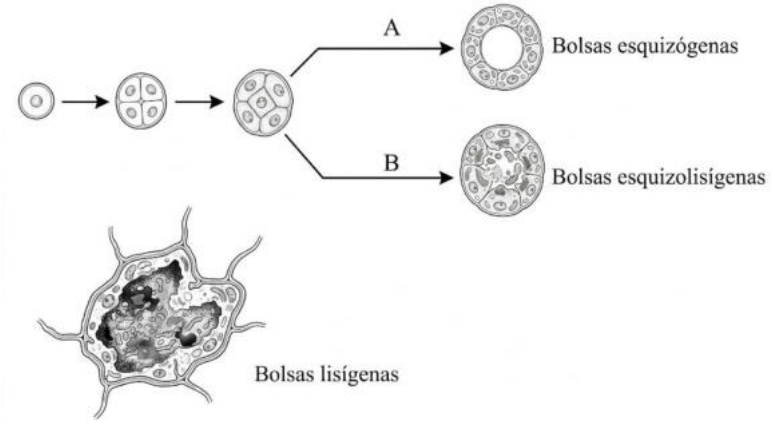


Figura 47. Tipos de bolsas segregadoras.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Canales secretores:** son bolsas alargadas de formas tubulares y orientadas en el sentido longitudinal del órgano que los contiene.

- **Canales laticíferos:** son elementos alargados como cordones, ramificados o no, que elaboran el látex en dependencia del vegetal, puede ser coloreado, aunque en la mayoría de los casos es blanco.

2.27 Micromorfología de los órganos vegetativos de una planta

1- La Raíz

En una sección transversal de una raíz a la altura de la zona pilífera, se observan las siguientes partes definidas: **epidermis**, **corteza** y **cilindro central**. Esta estructura primaria pasado el primer año de vida cambia, las raíces engruesan mediante un proceso de crecimiento dado por el **cámbium** que se inicia en forma de arcos sobre el borde externo del

floema. Luego se forman nuevos arcos por fuera de los polos del xilema, a partir de las células más internas del periciclo. Estos arcos se unen a los anteriores y forman una capa continua, que en sección transversal tiene aspecto sinuoso. Finalmente, adquiere forma cilíndrica. En las figuras 48 A y 48 B se representan las estructuras primaria y secundaria de la raíz.

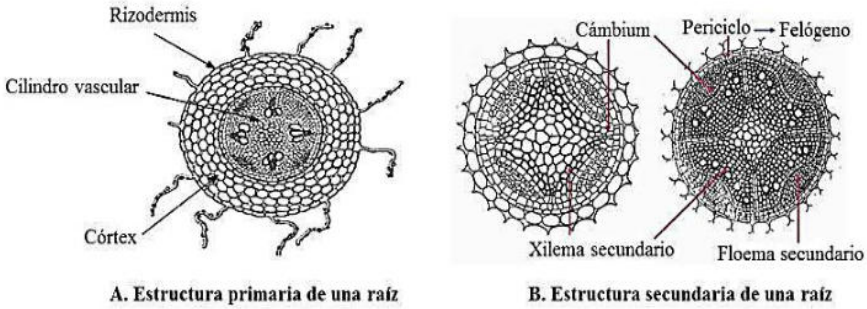


Figura 48. Estructura interna de una raíz.

El cámbium que se origina en el periciclo forma en algunas raíces radios medulares anchos. Los tejidos vasculares secundarios forman un cilindro continuo que incluye completamente al xilema primario. El floema primario es aplastado, algunas células se diferencian en fibras.

2- El Tallo

En el corte transversal del tallo joven de una dicotiledónea, se pueden apreciar desde afuera hacia adentro, sucesivamente las siguientes partes: **epidermis**, formada por una sola capa de células; **corteza**, integrada por un número variable de capas superpuestas de células, las más externas son colenquimáticas, las que forman un anillo de tejido mecánico que envuelven todo el tallo. El parénquima cortical que se

ubica a continuación del colénquima es rico en cloroplastos.

La corteza está limitada interiormente por la endodermis. Internamente a la corteza, se encuentra el **cilindro central**, cuya primera capa de células es el periciclo; está constituido por los haces vasculares en una sola serie, por el parénquima medular y por los radios medulares. Después del primer año de vida, aparecen en el tallo dos meristemos secundarios que lo hacen aumentar en grosor, el **cámbium** y el **felógeno**, que provocan la aparición de nuevos tejidos. En las figuras figura 49 A y 49 B se representan las estructuras primaria y secundaria del tallo.

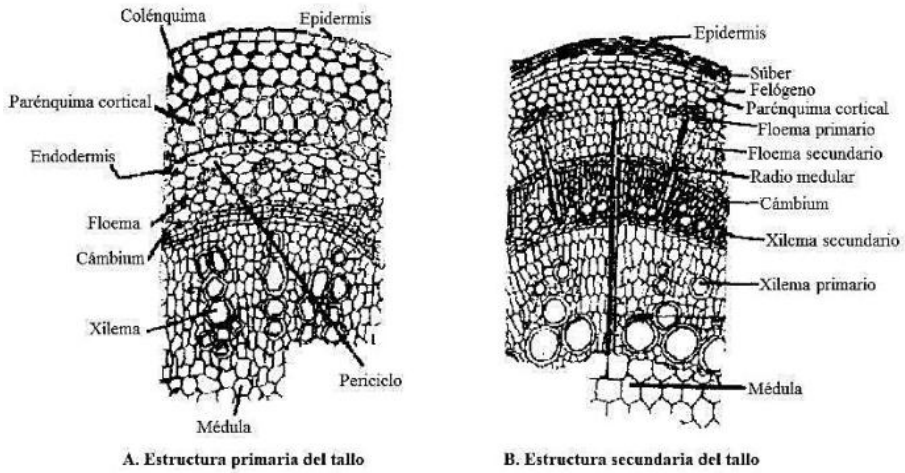


Figura 49. Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

3- La hoja

Se encuentra constituida de pecíolo y lámina foliar. En este último componente se encuentran el tejido epidérmico (epidermis adaxial y abaxial), el tejido fundamental, donde el parénquima clorofílico o

clorénquima se denomina mesófilo y, sobre todo en plantas dicotiledóneas, se divide en empalizada, más expuesto al sol, y parénquima lagunar o esponjoso, en la parte más sombría. También se localiza el tejido vascular (xilema y floema) (figura 50).

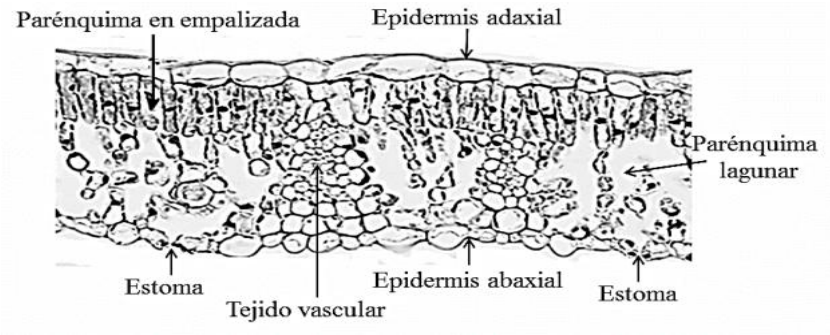


Figura 50. Estructura interna de la hoja.

El tejido en empalizada tiene mayor número de cloroplastos y parece llevar a cabo una mayor tasa fotosintética, estando sus células más densamente empaquetadas. En el parénquima lagunar hay más espacios intercelulares, facilitando el intercambio de gases y vapor de agua con la atmósfera.

4- La flor

La organización histológica de pétalos y sépalos de la flor es similar a la de las hoja, aunque mucho más sencilla. Los pétalos se caracterizan por su variedad morfológica y cromática, y los sépalos por su contenido en cloroplastos que les confieren el típico color verde. En el caso de los sépalos (figura 48 A) las células contienen cloroplastos y su organización tisular se asemeja más a la de una hoja. Tanto en los pétalos como en los sépalos hay haces vasculares poco desarrollados y

sin esclerénquima que se distribuyen más o menos de forma ramificada.

Los pétalos (figura 51 B) están formados por una epidermis adaxial (correspondiente al haz de la hoja, hacia el interior de la flor) y otra abaxial correspondiente al envés de la hoja, hacia el exterior de la flor) de poco espesor y poco cutinizadas. Entre las células epidérmicas podemos encontrar osmóforos o glándulas secretoras de aceites volátiles. También en los pétalos son frecuentes los cromoplastos, responsables de los colores, gracias a que poseen pigmentos como carotenoides, que, junto a otros pigmentos, se encuentran solubles en el citoplasma celular. Un parénquima del tipo lagunar se extiende entre las dos epidermis.

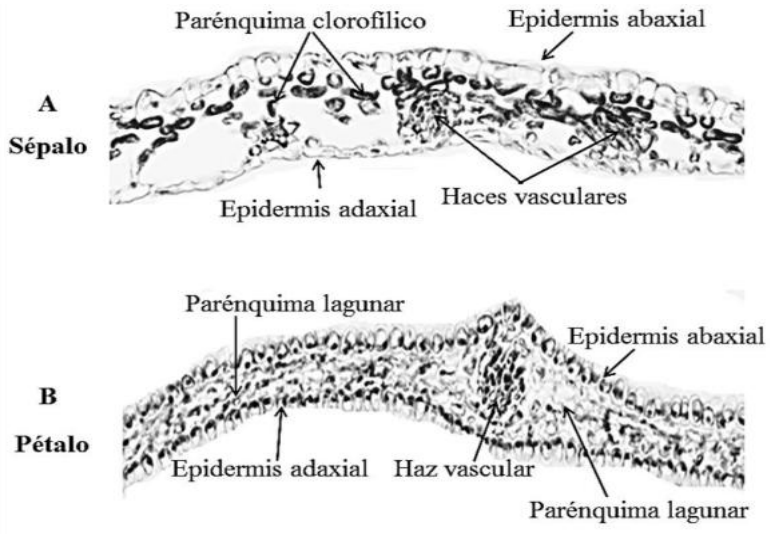


Figura 51. Detalles micromorfológicos de los sépalos y pétalos de una flor de dicotiledónea.

5- El fruto

La anatomía del fruto varía mucho según su consistencia. A continuación, analizaremos algunos ejemplos por su importancia agronómica, entre ellos, algunos frutos secos (cariópside y legumbre) y frutos carnosos (hesperidio, baya, drupa y pomo).

Frutos carnosos

- **Cariópside (*Triticum*, trigo) (figura 52 A)**

En el trigo, varias capas de células presentes en la pared del ovario colapsan o se aplastan. La cutícula es gruesa y continua, excepto en la región calazal [región del óvulo de las plantas con flores en las que convergen el funículo (pequeño cordón que une el óvulo a la placenta)], la nucela y los tegumentos. Esta zona puede coincidir con la terminación o ramificación de los haces vasculares que penetran al óvulo), donde las células se diferencian en células de transferencia; parecen tener importancia en la absorción de agua en el momento de la germinación.

- **Legumbre (*Glycine max*, soja) (figura 52 B)**

La legumbre es un fruto seco, dehiscente. El exocarpio está formado por la epidermis externa y una hipodermis, formada por esclereidas alargadas longitudinalmente. El mesocarpio está constituido por parénquima y el endocarpio por varias capas de esclereidas alargadas transversalmente y por la epidermis interna.

Las esclereidas del exocarpio y endocarpio tienen diferente

orientación, y se contraen en distinto sentido, provocando tensiones que causan la dehiscencia del fruto a su madurez.

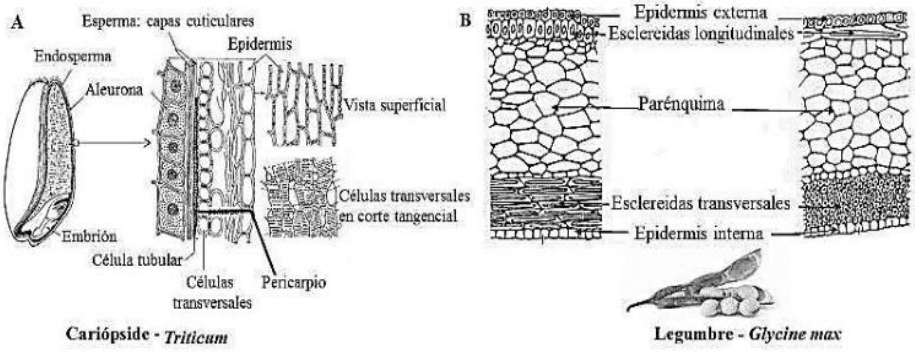


Figura 52. Micromorfología de frutos secos.

Frutos secos

- **Hesperidio (género *Citrus*) (figura 53 A)**

Se muestra el corte de una naranja donde se observa un exocarpio formado por una epidermis uniseriada con cutícula moderada y una zona de células parenquimáticas más o menos apretadas que albergan las cavidades lisígenas. En el mesocarpio se disponen haces vasculares sencillos muy dispersos entre un tejido parenquimático esponjoso, con grandes espacios intercelulares. Estas células se aprietan cerca del endocarpio formando una capa de células.

- **Baya (*Solanum lycopersicum*, tomate y *Musa paradisiaca*, plátano) (figura 53 B)**

El epicarpio está formado por la epidermis fuertemente cutinizada y colénquima subepidérmico. El mesocarpio es parenquimático. Durante

la maduración de los cloroplastos se transforman en cromoplastos conteniendo carotenoides. El endocarpio está formado por la epidermis interna con paredes delgadas. Las placentas durante el desarrollo del fruto proliferan llenando los lóculos con tejido parenquimático que envuelve totalmente las semillas. A la madurez estas células se gelatinizan.

En el caso del plátano (*Musa paradisiaca*), el fruto es una vaya de ovario ínfero, y se desarrolla partenogenéticamente, sin producir semillas. La pared del fruto está constituida por un parénquima con haces vasculares acompañados de laticíferos. Por dentro hay una capa de aerénquima, responsable de la facilidad con que se desprende la cáscara. Internamente, sobre la pared de los carpelos, corren hacecillos vasculares orientados horizontalmente, conectados con los haces carpelares. Los óvulos degeneran, y los lóculos se ocluyen con una pulpa que se origina a partir de la pared de los carpelos y de los septos, muy rica en almidón.

- **Drupa (*Prunus persica*, durazno) figura 53 C)**

La epidermis es variable según la especie y el colénquima es subepidérmico. El mesocarpio es carnoso, durante la maduración disminuyen los ácidos en el contenido celular y aumentan el contenido en azúcares. El endocarpio es el carozo o hueso, esclerificado. De adentro hacia afuera: la epidermis origina varias capas esclereidas verticalmente alargadas; luego hay esclereidas transversalmente alargadas; a continuación 1-2 capas de esclereidas isodiamétricas. En esta parte se presentan haces vasculares, lo que indica que esas capas

se originaron del mesófilo.

- **Pomo-Fruto de las Rosáceas Maloideas (*Malus sylvestris*) (figura 53 D)**

La piel está formada por la epidermis externa del tubo floral, con antocianos, cutícula gruesa con cera, estomas reemplazados por lenticelas en frutos maduros. El tejido subepidérmico es compacto, formado por células con paredes gruesas con inclusiones citoplasmáticas proteicas y con ferritina. Más adentro hay parénquima con espacios intercelulares. Una capa de células compactas indica el límite del tejido carpelar formado por parénquima con haces carpelares, y endocarpio formado por tejido cartilaginoso constituido poresclereidas.

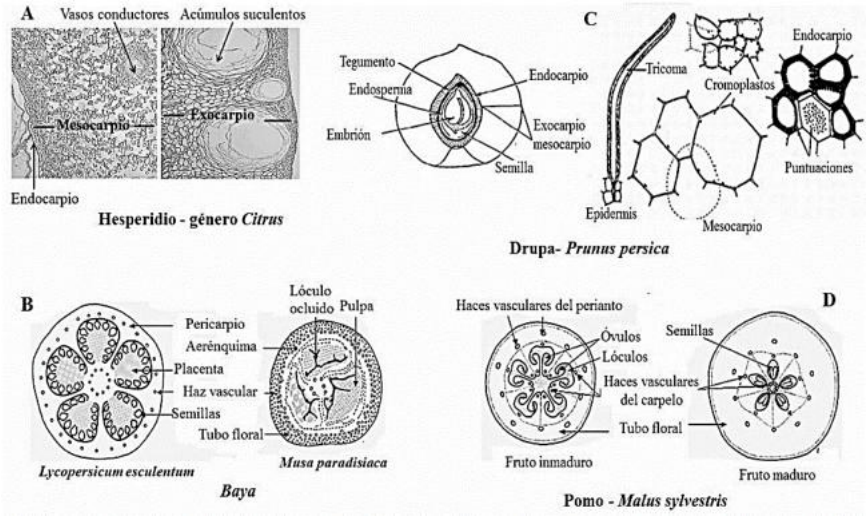


Figura 53. Micromorfología de frutos carnosos.

6- La semilla

Está formada por el embrión, la cubierta seminal o episperma y a veces tejido de reserva. La **episperma** se forma a partir de los tegumentos del óvulo y se observan comúnmente dos capas, la externa, la **texta**, derivada del tegumento externo y la interna, el **tegmen**, derivado del tegumento interno del óvulo y/o nucela. En la figura 54 se ilustran algunas variaciones de epispermas de semillas de Angiospermas.

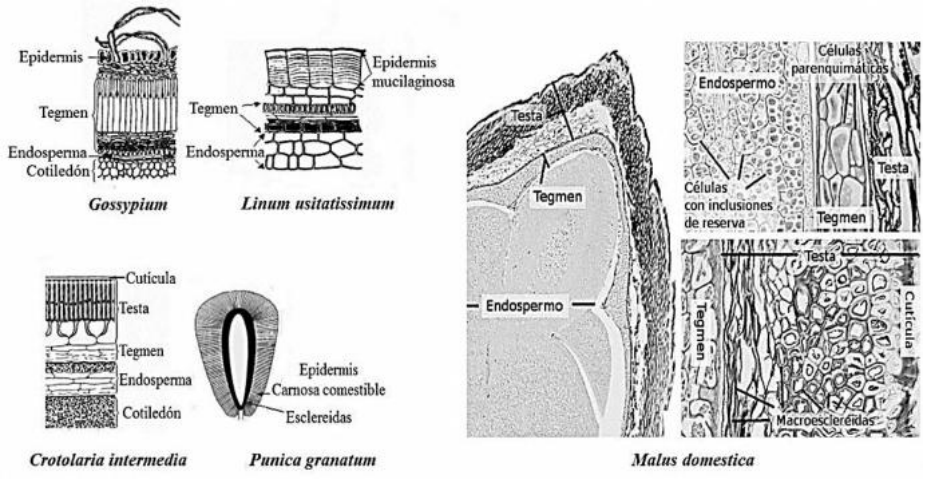


Figura 54. Variaciones en el episperma de semillas de Angiospermas.

En el episperma la cutícula puede ser muy gruesa, lisa, labrada o desarrollar largos pelos como en *Gossypium* (algodonero) donde la epidermis seminal constituyen la "fibra" del algodón. La testa está formada por varias capas, una de las cuales está compuesta por esclereidas columnares dispuestas como una empalizada, sin espacios intercelulares. Estas células reciben el nombre de células de Malpighi. El tegmen está reducido a la epidermis interna que es la capa más interna del episperma.

Con frecuencia el episperma se mucilaginiza, como en el lino, el

membrillo el tomate. En *Linum usitatissimum*, el tegumento externo presenta tres capas, la pared externa secundaria de las células epidérmicas radialmente alargadas, está formada por una sustancia mucilaginosa. El tegmen posee tres capas, una formada por esclereidas orientadas paralelamente. Por debajo hay células parenquimáticas alargadas en sentido perpendicular a las esclereidas. Las células de la capa más interna presenta el lumen (cavidad celular, limitada por las paredes) lleno de pigmentos que determinan el color de las semillas.

En las semillas duras, como la *Crotolaria intermedia*, el episperma tiene una cutícula notable y está esclerificada. Está formada por varias capas de esclereidas (columnares, osteoesclereidas, lagenosclereidas, macroesclereidas). En el caso de *Punica granatum* el episperma es carnoso, donde la capa carnosa comestible es la epidermis, las células se alargan en sentido radial y se vuelven turgentes. La otra capa es mecánica, formada por esclereidas.

En el caso de la semilla de *Malus domestica* (manzana), superficialmente se encuentra la testa, la cual posee una gruesa cutícula que protege a la semilla del aire y del agua. Bajo la cutícula hay una capa ancha de células de paredes muy gruesas que forman una empalizada de protección. Estas células, denominadas células de Malpighi, son macroesclereidas, de las cuales hay dos capas, una orientada perpendicularmente a la superficie del corte y otra más profunda paralela a la superficie del corte. Más internamente se encuentra el tegmen, formado por células de paredes finas y de tipo parenquimático. El tegmen envuelve al endospermo, que está formado por células que contienen inclusiones o granos con material nutricio

(almidón).

2.28 Examen e identificación de drogas crudas

Las drogas pulverizadas poseen muy pocos caracteres macroscópicos de identificación, aparte del color, olor y sabor, de ahí que las características microscópicas son muy importantes. En la droga pulverizada las células están rotas, excepto las de paredes lignificadas, pero el contenido se halla diseminado en el polvo y se hace muy evidente en el ejemplar montado.

Las características tales como el color y el olor, los detalles microscópicos (vasos, pelos, fibras, súber o corcho, glándulas, estomas, etc.) junto con las reacciones histoquímicas de las drogas en polvo, se utilizan para la identificación de las especies. Estas características son lo suficientemente constante para posibilitar una evaluación adecuada de la droga.

El análisis microscópico también permite determinar adulterantes y material de pobre calidad. Modificaciones a la estructura básica de una célula vegetal viva la cual involucra la composición de la pared celular, la forma celular y el contenido celular, son determinados en varios tejidos vegetales y reacomodando estas características microscópicas, son importantes en la identificación y en la detección de adulteraciones.

Las estructuras celulares son frecuentemente oscurecidas por la abundancia del contenido celular, la presencia de material coloreado y el colapso de las paredes celulares, por lo que se requiere de la

utilización de ciertos reactivos para remover el contenido celular, blanqueando y restaurando tanto como sea posible la muestra. Son muy útiles los aclaradores y blanqueadores como la disolución de hidrato de cloral (disuelve almidones, proteínas, clorofilas, resinas, aceites volátiles y causa la expansión celular; puede ser usado para montar secciones de hojas, flores y granos de polen enteros. Este no disuelve el oxalato de calcio y es un buen reactivo para la detección de tales cristales), disolución de potasio, éter-etanol, disolución de hipoclorito de sodio, entre otros.

La evaluación microscópica de las drogas puede ser tanto cualitativa como cuantitativa. La microscopía cualitativa incluye estudios de las secciones de cortes transversales de la hoja, la corteza de la raíz, el tallo, entre otras partes. En el caso de drogas en polvo, se usan reactivos químicos para la detección de componentes químicos.

La microscopía cuantitativa analiza algunos parámetros como el número de islotes de venas, el número de terminación de venas, el número de estomas, el índice de estoma y la relación de empalizada para la identificación, determinación de la pureza y evaluación de las drogas. Otras estructuras diminutas (tricomas, glándulas, estomas, cristales de oxalato de calcio, entre otros) también son analizadas.

En cualquier examen de una droga en polvo, se deben hacer las siguientes observaciones:

1- Color: puede revelar la parte del vegetal de que se trate. Las hojas y las plantas compuestas son generalmente verdes, las drogas de corteza son bronceadas o marrones, mientras que los órganos bajo

tierra son generalmente de colores claros.

2- Determinación del contenido celular ergástico: este contenido celular representa productos de almacenamiento de alimentos o subproductos del metabolismo e incluye carbohidratos, proteínas, aceites fijos y grasas, alcaloides y purinas, glicósidos, aceites volátiles, gomas y mucílagos, resinas, taninos, oxalato de calcio y sílica, siendo no vivientes, se conocen con el nombre de ergásticos.

Análisis de almidones: los almidones y la mayor parte de los órganos bajo tierra dan una reacción positiva intensa. Leños, corteza y flores frecuentemente contienen almidón y los gránulos, o son pequeños o están ausentes. Un ensayo rápido es añadiendo a la muestra en polvo agua yodada o el reactivo de Lugol (color azul o azul violáceo). En la figura 55 se presentan algunos tipos de gránulos de almidón según su forma

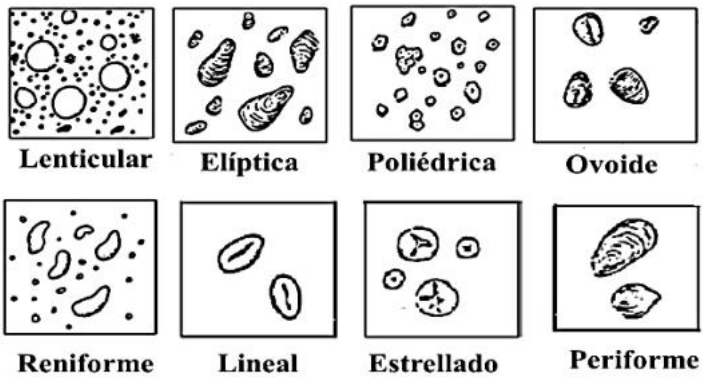


Figura 55. Granos de almidón según su forma.

Análisis de oxalato de calcio: cuando están presentes como cristales se describen para cada especie y son de considerable importancia en la

caracterización. La muestra se debe de montar en una disolución de hidrato de cloral, calentar suavemente hasta evaporación y examinar, para asegurarse del oxalato de calcio, si está presente en pequeñas cantidades, se puede utilizar luz polarizada para no pasarlo por alto. En la figura 56 se ilustran algunos cristales según su forma.

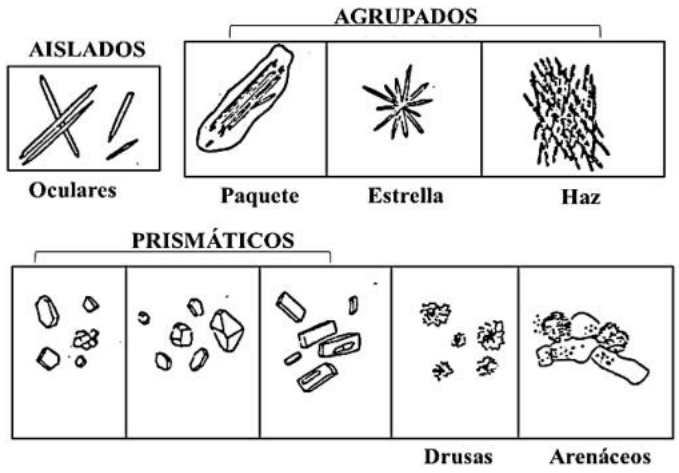


Figura 56. Cristales de oxalato de calcio según su forma.

Análisis de lignina: cortezas y leños generalmente contienen tejido lignificado en cantidades más grandes que cualquier otra parte de la planta. La ausencia de fibras lignificadas es una característica frecuente y significativa en la identificación.

Se mezcla el polvo con una disolución de floroglucinol y permitir la tinción casi hasta secamiento, adicionar HCl concentrado y examinar. Notar la presencia o ausencia de vasos lignificados, fibras, parénquima, esclereidas o pelos, por la coloración de estructuras rojas.

Análisis de aleurona: los granos de aleurona están presentes en semillas fundamentalmente.

También se pueden determinar otros constituyentes químicos como **taninos**, **flavonoides**, **alcaloides**, **aceites esenciales**, **quinonas**, entre otros.

3- Determinación cualitativa y cuantitativa de estructuras celulares: la detección y caracterización de las siguientes células o tejidos en las drogas en polvo son necesarias para su identificación.

Elementos conductores: no están presentes en las drogas de corteza. Los vasos de las hojas y de las flores son generalmente pequeños. Se puede determinar además:

- **Número de islotes venosos:** es el promedio de islotes venosos por mm^2 de la superficie foliar, a la distancia entre la nervadura central y el margen. Diversas especies de plantas medicinales se distinguen por el número de islotes venosos. Por ejemplo, el sen de Tinnevelly y el sen se distinguen por la diferencia en el número de nervaduras, veintisiete y veintidós respectivamente.

- **Número de terminaciones venosas:** se define como el número de terminaciones venosas por mm^2 de la superficie foliar, a la distancia entre la nervadura central y el margen.

• **Células epidérmicas y estomas:** están presentes en hojas, partes de flores y algunos tallos. El arreglo de las células acompañantes puede ayudar a la caracterización. En este sentido es posible determinar el índice de estomas que es una constante dentro de

ciertos límites que permite la caracterización de hojas por comparación con testigos o valores ya tabulados. Representa la frecuencia de estomas en términos de valor proporcional respecto a las células epidérmicas.

Se toman láminas fijas de hojas, se observa con un microscopio equipado con tubo de dibujo. Se dibuja en el papel el área observada de 2 mm de lado utilizando el micrómetro objetivo y se calcula el índice de estomas. El ejemplo se muestra en la figura 57:

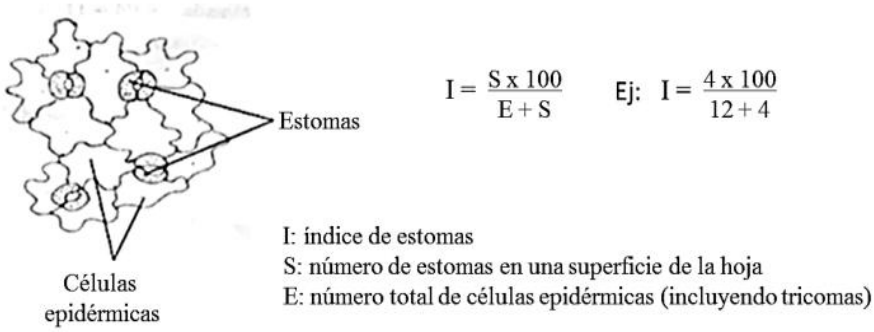


Figura 57. Cálculo del índice de estomas.

- **Células de parénquima:** son generalmente abundantes en raíces y rizomas y poco frecuentes en cortezas y leño.

- **Índice de empalizada:** representa la cifra media de células en empalizada que aparecen debajo de una célula epidérmica. Se obtiene contando las células en empalizada que se encuentran debajo de cuatro células epidérmicas y se determina el valor medio, o sea, se divide el número total de células en empalizada por cuatro (Figura 58)

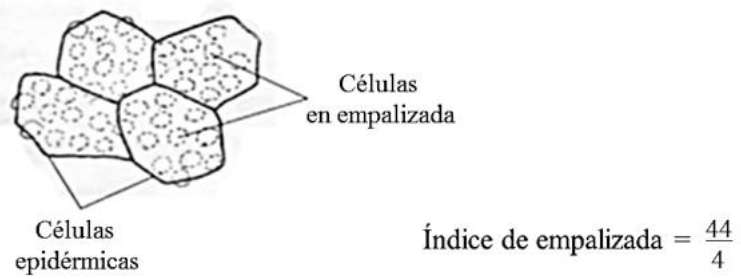


Figura 58. Cálculo del índice de empalizada.

- **Pelos:** se encuentran comúnmente como elementos de hojas, flores, frutos, semillas, etc.

- **Células de súber**: no se encuentran en hojas, flores, leños o partes de frutos y pueden estar ausentes en algunas cortezas, raíces y rizomas.

- **Mediciones microscópicas o micrometría**: este método es utilizado para realizar mediciones de órganos o estructuras a nivel microscópico, como por ejemplo largo y ancho de tricomas, tamaño de células, etc. Se utiliza para tal objeto un ocular micrométrico y un micrómetro objetivo, además del microscopio.

Tradicionalmente, la calidad de los medicamentos herbales se determinaba mediante un examen físico. Sin embargo, en la actualidad, la identificación de drogas vegetales y la detección de adulterantes (como insectos, heces animales, moho y hongos) de la planta mediante características tisulares distintivas requieren análisis microscópico Cada planta tiene una estructura tisular única, que puede identificarse

examinando su organización, paredes celulares y configuración cuando se monta correctamente con tinciones, reactivos y medios. En otros casos, se requiere investigación microscópica para identificar la especie correcta o confirmar la presencia de la subespecie correcta. Esto puede parecer simple, pero es crucial, especialmente, cuando se utilizan varias partes de la misma planta para diferentes tratamientos.

2.29 Histoquímica

La histoquímica se ocupa de las técnicas encaminadas a la localización microscópica de compuestos químicos en las células y tejidos, mediante reacciones químicas específicas que permitan la ubicación de éstos a ese nivel. El uso de reactivos químicos *in situ* permite aumentar el contraste de las distintas estructuras anatómicas en dependencia de su composición química y facilita el estudio histológico.

Las pruebas histoquímicas pueden realizarse ya sea con cortes transversales del tejido a mano alzada y frescos o también con la preparación de infusiones de la droga cruda. El reactivo o el medio de montaje que se utilice depende del elemento tisular o del contenido celular característico que deba estudiarse, por ejemplo, el almidón se observa mejor montado con agua; el tejido lignificado (fibras liberianas, células pétreas y vasos) en un montaje de floroglucina y ácido clorhídrico. El oxalato de calcio, el tejido epidérmico de la hoja, los tricomas, etc., en un montaje de hidrato de cloral.

A continuación se presentan algunas pruebas histoquímicas (tabla 2) que se realizan a los tejidos vegetales. Estas reacciones coloreadas son de considerable importancia no solamente para identificar los

productos de reacción, sino también para establecer la identidad de sublimados y materiales extraídos.

Tabla 2. Algunas pruebas histoquímicas que se realizan a tejidos vegetales.

Constituyente químico	**Reactivo**	**Resultado**
Alcaloides	Dragendorff	Se detectan como puntos o aglomeraciones rojo-ladrillo
Aleurona	Orange G	Rojo-anaranjado
Almidón	Lugol	Azul, azul-violáceo, negruzco
Celulosa	Clorioduro de zinc	Azul o violeta
Lignina	Floroglucina/HCl concentrado Safranina 1 %	Rojo
Grasas y aceites	Sudan III o IV	Aparecen como puntos o gotas rojas dentro de las células.
Mucílagos	Azul de Cresil al 1 %	Azul
Oxalato de calcio	Acetato cúprico	Los cristales de oxalato se disuelven y el ácido oxálico que difunde, da oxalato cúprico de color

		azul
Sustancias péptidas	Rojo de rutenio al 0,1%	Rosado
Taninos	Cloruro férrico al 10 % Sulfato férrico	Azul o verde intenso
	Disolución de vainillina alcohólica al 1 % y se añade una gota de HCl	Coloración rojo
Quinonas	KOH al 10 % en etanol al 50 %	Rojo
Flavonoides	KOH al 10 % en etanol	Las partes que contienen flavonoides se colorean de amarillo.
Aminoácidos y aminas	Ninhidrina 5 % en etanol/calor	Azul intenso o violeta
Antocianinas	HCl al 10 %	Conglomerados en forma de pequeñas bolsas o cristales de color rojo o marrón
Sales de hierro	Disolución de ferricianuro de calcio al 5 % y se añade HCl al 3 %	Coloración azul

Detección de enzimas (oxidasa)	El corte se humedece con una disolución de bencidina al 10 % en etanol al 60 % y esperar 45 min	Color azul: Si la enzima infiere acidez al tejido. Color carmelita: Si la enzima infiere basicidad al tejido.

A continuación, se presentan algunas observaciones histoquímicas (figura 59):

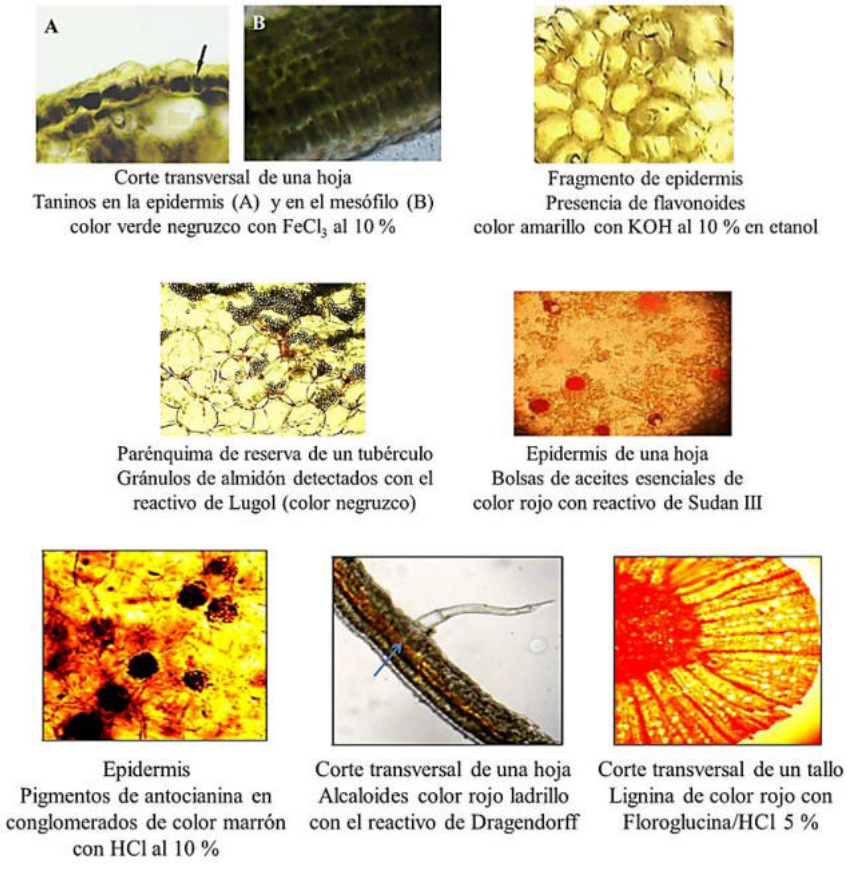


Figura 59. Ejemplo de observaciones histoquímicas.

2.30 Cultivo y recolección de plantas medicinales. Tratamiento postcosecha

La Farmacoergasia, proviene de la palabra griega ERGAZOMAI y se define como la rama de la Farmacognosia que estudia el cultivo, recolección y preparación de las plantas y sus órganos utilizados en la terapéutica.

La Farmacoergasia comprende un campo muy extenso de la Farmacognosia y poco explorado, ya que aspectos como el mes del año en que las plantas poseen mayor proporción de principios activos, el momento de su desarrollo y hora del día óptimo para su recolección, condiciones ideales para su cultivo, etc., no son del todo conocidas para la mayoría de las plantas. Estos factores, incluyendo el manejo postcosecha (secado, embalaje y almacenamiento) pueden influir en la calidad de la droga vegetal, dado el papel decisivo que juegan en su composición química.

2.30.1 Cultivo de plantas medicinales

El cultivo de plantas medicinales se debe desarrollar sobre la base de prácticas agrícolas, las cuales comienzan con la identificación de la especie adecuada y su perfil, el uso de material de siembra sano, suelo fértil, insumos apropiados, metodologías de cultivo, entre otras. En tal sentido, se deben aplicar tecnologías donde se tengan presente las interacciones planta-suelo-condiciones climáticas-plagas (Acosta, 2005). También hay que considerar factores como temperatura, iluminación, altitud, precipitaciones y riego, fertilizantes, plagas y control de plagas.

El suelo influye en la germinación de las semillas, la capacidad de la planta para mantenerse erguida, el vigor, la leñosidad y profundidad

del tallo, y la variedad de flores en una planta. El contenido óptimo del suelo, junto con su efluente, la retención de humedad, la fertilidad y el pH, se ajustan según las necesidades de la planta medicinal elegida. El uso de compost suele ser crucial para obtener una buena producción de plantas medicinales.

La temperatura es el principal factor que controla el metabolismo de las plantas. Estas requieren cierto grado de calor para desarrollar sus yemas, para abrir sus flores, para formar sus frutos y las semillas para su germinación. Así, por ejemplo, *Matricaria recutita* (manzanilla) demanda para su germinación y buen desarrollo temperaturas de alrededor de 20 °C.

La iluminación es el influjo de la luz para que las plantas puedan vegetar normalmente y biosintetizar sus diferentes metabolitos. En cuanto a la intensidad luminosa no todas requieren las mismas condiciones. Las especies que producen aceites esenciales, necesitan que se le cultive a pleno sol, otras, como jengibre (*Zingiber officinale*), se desarrolla mejor a media luz. En la belladona (*Atropa belladonna*), chamico (*Datura stramonium*) y quina (*Cinchona ledgeriana*), la iluminación intensa da un mayor contenido de alcaloides que la sombra.

En sentido general, se considera que bajo la influencia de la luz, se forman con mayor intensidad algunos principios activos como colorantes, astringentes, carbohidratos y aceites esenciales, y durante su ausencia los productos resinosos y los ácidos, de manera que según sean los principios activos de la especie en particular, es que deben

recolectarse en sitios despejados o en caso contrario, donde la sombra de los montes y los árboles o frecuentemente las nubes disminuyan la intensidad luminosa de los rayos solares, teniendo también en cuenta, la mejor hora del día para su recolección.

Con la altitud cambian la presión atmosférica, la humedad, temperatura, etc., lo cual determina las características de la flora en un clima de llanos y montañas. Por ejemplo: el cocotero (*Cocos nucifera*), se desarrolla mejor en clima marítimo; la caña de azúcar (*Saccharum officinale*), es característica de lugares llanos; el cacao (*Theobroma cacao*), crece satisfactoriamente a 90-150 m de altura; el cafeto (*Coffea arabica*), prefiere para su óptimo desarrollo una altura entre 750 y 1500 m.

La mayoría de las plantas necesitan un sistema de riego adecuado o suficiente pluviosidad para su crecimiento y desarrollo. El riego y el drenaje deben controlarse y administrarse de acuerdo con las necesidades de cada planta medicinal a lo largo de sus diversas etapas de crecimiento. El agua utilizada para riego debe cumplir con los estándares de calidad local, regional o nacional. Se debe supervisar que las plantas medicinales cultivadas reciban el riego necesario.

El aloe y la acacia son ejemplos de plantas xerófitas que no requieren riego ni pluviosidad, lo que supone una ventaja adicional para su cultivo. Por su parte, la altea (*Althaea officinalis*), que produce mucílagos, material que retiene agua, contiene menos mucílagos cuando crece en un suelo con baja humedad.

Los fertilizantes son una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos

que se unifican para aumentar la fertilidad del suelo. Se pueden encontrar abonos de hojas verdes, estiércol de corral (combinación de estiércol de ganado, cáscaras y tallos de plantas que se utilizan para alimentar al ganado), estiércol compuesto (combinación de componentes de flora y fauna), biofertilizantes (producto biológicamente activo de microorganismos, algas y hongos que ayuda a distribuir nutrientes al aplicarse al suelo), entre otros.

Otro aspecto importante a controlar en los cultivos son las plagas ya que muchos insectos destruyen o causan graves daños a cultivos valiosos. Plagas comunes incluyen bacterias, hongos, *Rattus* y malezas como *Ambrosia artemisiiflora* y *Toxicodendron radicans*.

Comprender el origen de las plagas es fundamental para el diseño y la ejecución de estrategias de control que incorporen sustancias de origen natural.

2.30.2 Recolección de plantas medicinales

Es el acto de tomar los materiales farmacéuticos de las plantas medicinales, dependiendo la misma de la parte del material biológico a utilizar, estando, por tanto, sujeta a normas generales. Este aspecto es muy importante dado que su objeto está dirigido a utilizar los principios elaborados por las plantas en la aplicación terapéutica. Entre las normas generales a seguir se encuentran:

Tener un cabal conocimiento de la especie a recolectar: se necesita conocimiento y experiencia del recolector para evitar confusiones de

identidad entre las plantas similares, especies no medicinales e incluso especies tóxicas.

Conocimiento de la geografía botánica: tener en cuenta que la zona de recolección no esté afectada por contaminantes, como metales pesados y pesticidas, así como microorganismos patógenos. También es importante conocer la situación natural de los vegetales, su localización y las condiciones ecológicas.

Conocer la organografía y fisiología: para saber las partes del vegetal que se va a recolectar y las condiciones en que esta se encuentra.

Conocer edad de la planta, época del año y hora del día más recomendables para la recolección:

- **Edad:** influye en la cantidad de principios activos y en las proporciones relativas de las mezclas activas. Por ejemplo, en *Aloe vera* (sábila) el momento para iniciar la cosecha de sus hojas es después de los 24 meses de edad, donde muestra la óptima concentración de polisacáridos. En el eucalipto (*Eucalyptus spp*.) La máxima cantidad de aceite esencial se alcanza entre los 3 y 6 años.

- **Época:** la cantidad y a veces la naturaleza de los principios activos no son constantes a lo largo del año. Las condiciones climatológicas según la época de recolección pueden condicionar variaciones en los constituyentes químicos.

- **Hora del día:** influye en la composición de cierto número de metabolitos especializados. Generalmente, se recomienda un

horario temprano, evitando el rocío y la lluvia. O sea, las plantas intercambian con otras plantas, con el medio ambiente, con insectos. Producto de esas interacciones se liberan metabolitos bioactivos, ya sea por volatilización como es el caso de los aceites esenciales u otros metabolitos volátiles, o por lixiviación, donde los metabolitos de polaridad media o alta pueden ser arrastrados por el agua del rocío o la lluvia.

En general, el material vegetal recolectado/cosechado no debe entrar en contacto directo con el suelo. Si se cosechan partes subterráneas (como las raíces o los rizomas/bulbos), se debe retirar cualquier tierra adherida de las plantas tan pronto como se cosechen/recolecten.

El material vegetal recolectado/cosechado debe colocarse en cestas limpias, bolsas de malla, otros recipientes bien ventilados libres de materias extrañas, incluyendo restos vegetales de actividades de recolección anteriores.

Si se va a recolectar más de una parte de la planta medicinal, cada material vegetal debe cosecharse y transportarse separados.

Los dispositivos de corte, cosechadoras y demás maquinarias deben mantenerse limpios y ajustados para reducir los daños y la contaminación por tierra y otros materiales.

Las técnicas y el momento de la cosecha varían según la especie y las partes de la planta:

Bulbos: se cosechan a finales de otoño, mucho después de que la planta haya florecido y fructificado, solo después de la caída de las semillas, a menos que se especifique lo contrario. Los bulbos deben extraerse a una distancia considerable de la planta principal.

Corteza: de las anuales, poco antes de la floración. De las bienales, durante el otoño o el invierno posterior al crecimiento del primer año. De las perennes, durante el otoño o el invierno posterior al crecimiento del segundo o tercer año.

Raíz: las raíces de las plantas anuales deben extraerse cuando las plantas estén bien desarrolladas y maduras. Las raíces de las perennes deben cosecharse a finales de otoño o principios de primavera. Las raíces de las bienales deben recolectarse en el otoño del primer año o en la primavera del segundo año.

Hojas: la recolección debe realizarse en tiempo seco durante la floración. Las hojas deben cosecharse antes o al inicio de la floración, a menos que se especifique lo contrario.

Flores o sumidades floridas: deben cosecharse poco después de su apertura para captar su aroma. La recolección debe realizarse en tiempo seco y a primera hora del día, luego de que la floración se haya disipado.

Semillas y frutos: la recolección debe realizarse cuando los frutos estén completamente desarrollados y maduros, o casi maduros.

Hierbas anuales/planta entera: la recolección de plantas herbáceas enteras o sus partes aéreas, debe efectuarse en la etapa de yema floral o

floración, pero antes de cualquier decaimiento visible en alguna de las partes de la planta. Nunca se debe cosechar la población completa en una zona determinada para su regeneración para facilitar futuras recolecciones.

El procesamiento oportuno y correcto del producto vegetal medicinal después de su cosecha es fundamental para preservar su calidad y prolongar su vida útil. Una vez recolectadas las drogas, se procede a conservar las mismas, dependiendo los procesos a emplear del uso que se destine a la droga, el cual puede ser fresco o desecado. Las operaciones a que son sometidas generalmente las drogas, se resumen en los próximos acápites.

2.30.3 Selección, lavado y desinfección

Se hace una selección cuidadosa de las plantas, desechando las partes decoloradas, manchadas, enfermas o deterioradas por insectos, parásitos, microbios, etc. Se eliminan las materias extrañas que puedan haberse arrastrado durante la recolección o se obtiene la parte deseada (ejemplo: separar la semilla del fruto).

El lavado se hace con agua potable (hervida y enfriada) en una canasta calada, de modo que el agua penetre, lave y escurra. Se aplica una lavada de desinfección con disoluciones de hipoclorito de calcio o sodio 10 ppm o ácido peracético 0,3-0,4 %, que son fácilmente degradables (no existe el desinfectante ideal, por lo que deben adoptarse técnicas convenientes a cada condición). Las raíces, rizomas y cortezas deben limpiarse con un cepillo, para desprender tierra, líquenes o musgos adheridos.

2.30.4 Secado

El secado es una de las técnicas de conservación más utilizadas para las plantas medicinales, influyendo significativamente en sus propiedades fisicoquímicas y funcionales. Se define básicamente como la disminución del contenido de humedad de la planta, con el objetivo de prevenir la actividad enzimática y microbiana, y en consecuencia, preservar el producto para prolongar su vida útil. El secado no solo aumenta la longevidad de las plantas medicinales, sino que también mejora significativamente la facilidad de manipulación, el envasado y transporte.

Las drogas acabadas de recolectar contienen una proporción importante de agua, variable según el órgano considerado. Las semillas y frutos secos contienen el porcentaje menor, 5-10 %; las cortezas contienen 30-40 % de agua, los tejidos leñosos 40-50 %, las hojas 60-90 % según su textura; las raíces, tubérculos y rizomas del 70 al 85 %; las flores y frutos carnosos entre 80 y 90 %. En tal sentido, las hierbas medicinales deben secarse completamente hasta que contengan alrededor de un 8 y 14 % de humedad, que se considera un porcentaje seguro. Se permite un 15 % de humedad en el caso de raíces (rábanos) o hierbas que contienen azúcar. La Monografía de la OMS refiere porcentajes de humedad no mayor del 14 %.

Cuando el producto cosechado es grueso, carnoso o de mayor tamaño, debe cortarse en rodajas pequeñas o delgadas para asegurar un secado adecuado. La temperatura máxima para secar la mayoría de las hierbas se encuentra entre **Prunus** °C (113 °F) y 50 °C (122 °F). Si el aire es

muy húmedo, la temperatura puede aumentarse a 10 °C para reducir la humedad. Las hierbas aromáticas que contienen aceites volátiles deben secarse a una temperatura más baja; idealmente, alrededor de 30 °C (86 °F) y no más de 35 °C (95 °F).

Las plantas medicinales pueden secarse de diversas maneras:

Al aire libre y al sol: en los climas cálidos y secos es el medio más económico y ecológico. Al funcionar a bajas temperaturas, puede ayudar a retener los compuestos sensibles al calor. Sin embargo, es problemático por las posibles alteraciones ligadas a la acción de los rayos solares y las inclemencias atmosféricas. No permite un control de la temperatura; el secado es desigual; es susceptible a la contaminación por hongos y bacterias debido al secado lento; el proceso dura de varias horas a varias semanas y se necesitan grandes áreas de secado.

A la sombra y bajo abrigo: ofrece una mejor calidad del producto en comparación con el secado al sol. Al funcionar a bajas temperaturas, puede ayudar a retener los compuestos sensibles al calor. Sin embargo, al igual que el secado al sol, depende del clima y los productos secos pueden rehidratarse si los niveles de humedad aumentan o se producen una lluvia inesperada. En climas húmedos, la desecación sería muy lenta y se desarrollarían los microorganismos.

Secadores solares: existen dos grupos: directos (los productos reciben los rayos solares directos y la temperatura de secado ~ 60 °C) e indirectos (los productos no reciben los rayos solares directos, la temperatura de secado no es alta).

Secado convectivo: es una técnica de secado tradicional, comúnmente utilizada debido a su versatilidad y facilidad de control. El calor se transfiere desde un medio de secado, generalmente aire, al material vegetal; a la vez que trasporta la humedad desde el interior del producto sólido a su superficie, donde es eliminada por la corriente de aire en movimiento. Los hornos de secado termostáticos eléctricos son el equipo estándar empleado para este método. Permite tratar con rapidez grandes cantidades de drogas en condiciones bien determinadas y demuestra una mayor eficiencia que los métodos de secado naturales (secado al sol y a la sombra). Es muy utilizada la estufa convencional.

Secado por rayos infrarrojos: utiliza radiación infrarroja para suministrar calor directamente a la superficie del material, facilitando la evaporación y el secado. Uno de los principales inconvenientes es su limitada profundidad de penetración en el material que se está secando, lo que genera un secado desigual y posibles problemas de calidad de los productos. Los materiales sensibles al calor, productos delicados o materiales con estructuras muy complejas pueden ser incompatibles con el intenso calor generado por la radiación infrarroja. No es generalizado para todas plantas medicinales.

Secado al vacío: mediante la creación de un vacío se reduce la presión por debajo de la presión de vapor del agua, facilitando la evaporación, incluso a temperaturas inferiores a su punto de ebullición. Permite el secado a bajas temperaturas de materiales sensibles al calor, a la vez que reduce significativamente el tiempo de secado. Además, la ausencia de aire durante el proceso minimiza la oxidación, mejorando

el color, el sabor y textura de los productos secos. Generalmente, se utilizan estufas de vacío, diseñadas para este proceso de secado, las cuales funcionan a presión atmosférica reducida.

Criodesecación o liofilización: es una desecación por sublimación directa del agua del vegetal, previamente congelado. Es un método eficaz para producir productos sensibles a la temperatura y estables en el almacenamiento. Sus temperaturas de procesamiento ultrabajas, la mínima presencia de agua y la rápida transición de un estado hidratado a uno deshidratado, junto con las condiciones de vacío, ayudan a reducir los procesos de degradación, como las reacciones enzimáticas y el pardeamiento no enzimático.

Secado asistido por microondas: utiliza radiación electromagnética (300 MHz-300GHz) y es ideal para procesar pequeñas cantidades de hojas. Su eficiencia energética se debe al calentamiento directo dentro de la muestra, en lugar del entorno circundante o las paredes del horno. Sin embargo, presenta desafíos como la formación de puntos calientes debido a la distribución desigual de las microondas y la dificultad para controlar con precisión la temperatura de la muestra. El tiempo de secado se reduce significativamente porque las altas temperaturas generadas por el campo electromagnético aceleran la transferencia de masa. Esta menor duración del secado ayuda a retener los nutrientes y mejora atributos de calidad como la textura, el color, el sabor y la eficiencia general de la producción.

Secado por radiofrecuencia: induce oscilaciones en el material, generando estados rotacionales y vibracionales. Este fenómeno resulta

en la elevación de la temperatura del material vegetal, independientemente de cualquier alteración en la temperatura del aire circulante, ofrece una mejor penetración y control de la temperatura gracias a sus longitudes de onda más largas, que proporcionan un calentamiento más uniforme. Esto hace que este tipo de secado sea adecuado para materiales a gran escala con alta conductividad iónica.

Secado híbrido: los secadores híbridos presentan mayor eficiencia de secado, un menor consumo de energía y una absorción más rápida de la humedad. Los sistemas de secado híbrido suelen tener un diseño integrado o secuencial, permiten incorporar radiación electromagnética, como microondas, ondas de radio, luz infrarroja o ultravioleta, para mejorar el rendimiento del secado. Esta integración combina múltiples métodos de transferencia de calor o secado en una sola unidad. Otro aspecto destacable del secado híbrido es su enfoque secuencial, donde dos o más secadores funcionan de forma independiente en etapas, cambiando entre modos de operación en función de los niveles de humedad o intervalos específicos del proceso de secado.

2.30.5 Embalaje

Un empaque adecuado es fundamental para reducir el desperdicio y proporcionar protección contra daños mecánicos, cambios fisiológicos indeseables y deterioro patológico durante el almacenamiento, el transporte y la comercialización. El material de empaque de plantas medicinales debe ser no contaminante, limpio, seco, en buen estado y garantizar la calidad. En el caso de materiales de plantas medicinales

frágiles se utilizan contenedores rígidos. Los pasos a seguir para el correcto embalaje son los siguientes:

Tras retirar el material dañado y las materias extrañas, el producto seco en buen estado debe envasarse en sacos, bolsas o cajas limpias y secas, preferiblemente nuevas.

Los materiales de embalaje reutilizables, como sacos de yute, bolsas de plástico, etc., deben limpiarse y secarse bien antes de volver a usarse.

El producto envasado debe almacenarse en un lugar seco, alejado de la pared y del suelo, y protegido de plagas y animales domésticos y agrícolas.

La etiqueta debe contener toda la información necesaria sobre el producto a base de plantas medicinales, indicando claramente el nombre botánico, la fuente biológica, la estructura de la planta, su lugar de recolección, las fechas, el nombre del cultivador, el recolector, el procesador y la cantidad.

Las bolsas de papel, poco empleadas, son apropiadas para la conservación a corto plazo. Se prefieren envases de aluminio, plástico, hojalata o vidrio. Todo material para envase debe cumplir los siguientes requisitos: máxima impermeabilidad a gases, luz y vapor de agua; resistencia frente a la acción de las drogas molidas, que podrían liberar algún componente del material del envase y no combinarse con ningún componente del producto.

2.30.6 Almacenamiento

Almacenar adecuadamente el producto garantiza su estabilidad y la conservación de las propiedades físicas, químicas, organolépticas y terapéuticas que le dan valor. El almacenamiento de drogas debe hacerse en lugares limpios, frescos, sombreados y bien ventilados por aire seco, con una humedad relativa alrededor del 45 % y una temperatura de unos 22 °C, preservándolas de la luz solar y el polvo, separadas de otras plantas con las que puedan intercambiarse olores.

Las drogas almacenadas en los envases usuales (sacos, fardos, cajas de madera o cartón y sacos de papel) reabsorben 10-12 % o más de humedad, incrementando su peso y disminuyendo el contenido en principios activos, favoreciendo de nuevo la actividad enzimática y el desarrollo de hongos y parásitos. Drogas como la marihuana (*Cannabis* sativa) pierden parte considerable de su actividad si reabsorben agua. Aquellas drogas que se afectan con la humedad, deben almacenarse en envases herméticos con un agente deshidratante (cal viva, sílica gel).

Los productos inflamables, como resinas, gomorresinas, aceites, etc., deben almacenarse en un lugar aislado en contenedores cerrados (los materiales inflamables deben estar claramente etiquetados como tales en cada contenedor). Las esencias deben conservarse en recipientes herméticos, bien llenos, en lugares fríos y oscuros. Similares especificaciones se aplican a los aceites fijos, en este caso, algunas veces el aire en el recipiente es reemplazado por un gas inerte. Por otro lado, las hierbas medicinales frescas deben almacenarse a temperaturas

bajas óptimas, preferiblemente entre 2 y 8 °C, mientras que los productos congelados requieren un almacenamiento a temperaturas inferiores a –20 °C.

Los almacenes se construyen preferentemente de material incombustible (acero, ladrillos, etc.), deben ser ventilados y con temperatura y humedad controladas. Es importante también garantizar la ausencia de roedores, insectos, ácaros y hongos, tratando con insecticidas y fungicidas adecuados. Ciertas drogas se deterioran incluso cuando se han almacenado cuidadosamente.

2.31 Normativas para el control de calidad de las drogas vegetales

Las plantas medicinales se han utilizado tradicionalmente en casi todas las culturas como un recurso terapéutico relevante, ya que sirven como fuentes potenciales de compuestos biológicamente activos en la síntesis y el desarrollo de nuevos medicamentos. En este contexto, se ha enfatizado en la necesidad de garantizar su control de calidad con la aplicación de técnicas modernas y el uso de patrones adecuados.

En diversas Farmacopeas (Farmacopea Internacional de la Organización Mundial de la Salud, Farmacopea China, Farmacopea Ayurvédica de la India, Farmacopea Británica de Hierbas, Farmacopea Herbaria Americana, entre otras) y monografías [Monografías de la OMS sobre plantas seleccionadas, Monografías de la Comisión E Alemana, Monografías de la Cooperativa Científica Europea de Fitoterapia (ESCOP- European Scientific Cooperative for Phytotherapy), entre otras] describen métodos de ensayos generales para evaluar o valorar las drogas oficiales. Cada monografía contiene

descripciones botánicas que van acompañada de ilustraciones detalladas e imágenes fotográficas que proporcionan documentación visual del material identificado con precisión.

La Organización Mundial de la Salud ha establecido normas para los métodos y procedimientos de estandarización de drogas vegetales con el fin de mantenerse al día con las tendencias actuales y emergentes. Entre las especificaciones se encuentran: nombre botánico; parte utilizada; características sensoriales, análisis macroscópico y microscópico; parámetros físicos (materia extraña; fibra bruta; cenizas totales, solubles en agua e insolubles en ácido; sustancias extraíbles; humedad), químicos (determinaciones cualitativas y cuantitativas de metabolitos), farmacológicos (índices de amargor, hinchazón, espuma y actividad hemolítica) y toxicológicos (determinación residuos de plaguicidas, arsénico y metales pesados).

- **Nombre botánico**

La caracterización taxonómica es importante para identificar la especie vegetal. Debe realizarse por el nombre científico y no por el popular. Asimismo, debe nombrar la familia a la cual pertenece la planta, ej. *Matricaria recutita* (manzanilla), *Astareaceae.* Este aspecto es muy importante ya que pueden existir adulteraciones de la materia prima vegetal. En ocasiones ocurren adulteraciones, ya sea sustituciones por la dificultad para obtener la especie, por ignorancia o exprofeso donde se mezcla la especie medicinal con otras morfológicamente similares. El cambio también puede tener fines monetarios utilizando plantas de menor valor económico, ejemplo el ginseng (*Panax ginseng*) por

especies del género *Ptaffia*).

Una nueva tendencia en la estandarización de productos herbarios son las técnicas ómicas que constituyen herramientas de análisis molecular que permiten el estudio y caracterización de los organismos y sus procesos biológicos a nivel global. La tecnología ómica abarca el genoma, el transcriptoma (número total de genes convertidos en transcripciones [es decir, moléculas de ARNm]), el proteoma (total de proteínas presentes en una célula o tejido), el metaboloma (total de metabolitos y etapas intermedias de una célula o tejido), el interactoma (posición de moléculas como metabolitos biológicamente activos que interactúan con una proteína específica) y el nivel de fenómenos (la suma de todas las características observables de un organismo).

El análisis genético (del ADN) es una herramienta importante en la estandarización de plantas medicinales. La caracterización genotípica de especies vegetales es importante ya que la mayoría de las plantas, aunque pertenezcan al mismo género y especie, pueden mostrar una variación considerable. Los marcadores de ADN son útiles para identificar células, individuos o especies y ayudan a distinguir la droga genuina de la adulterada.

- **Especificar la parte usada**

Debe declarar la parte de la planta a utilizar (inflorescencias, hojas, tallos, raíces, entre otras). Este aspecto es muy importante ya que pueden existir adulteraciones de la materia prima vegetal y si la parte de la planta no se corresponde con la prescrita, los principios activos pueden no encontrarse en las proporciones no adecuadas e incluso

desprovistos de ellos.

2.32 Características sensoriales, análisis macroscópico y microscópico

Las drogas son categorizadas atendiendo a sus características sensoriales, macroscópicas y microscópicas. De ahí que la mayor información acerca de su identidad, pureza y calidad pueden darse de estas observaciones.

La inspección visual (características sensoriales y macroscópicas), está basada en la forma, tamaño, color, características superficiales, texturas y fracturas. Este no puede considerarse como un ensayo definitorio, ya que en caso de adulteraciones con otras drogas de características similares suelen llegarse a resultados erróneos y es necesaria la aplicación de los métodos microscópicos y fisicoquímicos para poder llegar a resultados concluyentes.

La evaluación microscópica de las drogas es indispensable para su identificación. Implica un estudio detallado de diversos tejidos celulares, tricomas, estomas, gránulos de almidón, cristales de oxalato de calcio, granos de aleurona, entre otras estructuras, observados mediante microscopio. Pueden emplearse reactivos químicos para lograr una mayor información y visualización de los tejidos.

Este ensayo aisladamente, no puede siempre llegar a una completa identificación, aunque utilizado en asociación con otros métodos analíticos ofrece un soporte incalculable. La comparación con materiales de referencia puede revelar características no descritas en

las especificaciones de las drogas. El uso de microscopios ópticos y electrónicos de barrido ha ampliado la precisión y las capacidades de la microscopía como método para identificar materias primas herbales.

2.33 Parámetros físicos

Informa sobre la identidad del material y constituye una prueba inicial de detección de impurezas. Entre los parámetros a medir se encuentran:

Determinación de materia extraña: implica la eliminación de materia distinta de la planta de origen para obtener la droga en forma pura.

Fibra bruta: ayuda a determinar el componente del material leñoso y es un criterio para juzgar la pureza.

2.33.1 Determinación de cenizas

Se entiende por cenizas, el residuo que queda después de la ignición de una droga, y se determina por tres métodos diferentes: cenizas totales, ácido-insolubles y solubles en agua.

Las ***cenizas totales*** permiten determinar la cantidad de material remanente después de la ignición: "cenizas fisiológicas", Derivados de los tejidos de la planta y "cenizas no fisiológicas", que son el residuo después de la ignición de la materia extraña (polvo, arena, tierra, etc.), adherida a la superficie de la droga. Cuando el contenido de cenizas es superior al permitido indica generalmente un procedimiento de recolección y/o almacenamiento inadecuado.

Las ***cenizas ácido-insolubles*** son los residuos después de la ebullición

de las cenizas totales con ácido clorhídrico diluido. Esta determinación mide la presencia de sílica, especialmente, de arena y tierra silícea.

Las ***cenizas solubles en agua*** son calculadas por diferencia en peso entre las cenizas totales y el residuo remanente después del tratamiento de las cenizas totales con agua.

Cuando los valores obtenidos para las cenizas totales son elevados (>5 % según la WHO), es necesario conocer si las mismas están compuestas por metales pesados, lo cual se determina mediante los ensayos de cenizas insolubles, y si este resultado es elevado hay que someter la droga a otros análisis antes de aprobar su uso, como la espectrofotometría de llama.

2.33.2 Determinación de sustancias extraíbles

Se basa en la extracción de las sustancias solubles en diferentes disolventes. Generalmente, se utilizan agua, alcohol o mezclas hidroalcohólicas mediante maceración y evaporación hasta sequedad de una alícuota del extracto.

2.33.3 Determinación de agua (Humedad residual)

Es uno de los índices numéricos que ayuda a complementar la calidad del método de secado evaluado, ya que está directamente relacionado con la estabilidad del material vegetal. Un exceso de agua en una droga puede provocar el crecimiento microbiano y por tanto el deterioro, seguido de la hidrólisis de los principios activos.

Los límites de agua establecidos en la Farmacopea para las drogas,

oscila entre el 8 y 14 % con pocas excepciones, correspondiendo los valores más altos con la humedad de cortezas, tallos y raíces.

El contenido de humedad puede determinarse por el método gravimétrico**,** en el cual la droga se seca hasta peso constante a una temperatura entre 100 y 105 ºC. Tiene la desventaja que el calor provoca la pérdida de sustancias volátiles por lo que no debe aplicarse a drogas que la posean.

Otro método es el azeotrópico, mediante el cual debe obtenerse de forma directa la cantidad de agua presente en la droga cuando ésta es destilada junto con un disolvente inmiscible tal como tolueno o xileno. Es adecuado para drogas que contengan aceites esenciales. Si el disolvente es anhidro, el agua puede ser absorbida por este y el resultado sería falso, por lo que se recomienda saturar el disolvente con agua, antes de usarlo.

2.33.4 Parámetros químicos

La evaluación fitoquímica es una etapa crucial en el estudio de los constituyentes químicos de una planta, incluye desde pruebas cualitativas preliminares para la presencia y cuantificación de diferentes grupos químicos de interés (alcaloides totales, fenoles totales, ácidos triterpénicos totales, taninos totales, aceites esenciales, entre otros) hasta la elucidación estructural de dichos compuestos. Es necesario desarrollar la extracción, el aislamiento, purificación y la determinación estructural.

Los perfiles de huellas dactilares sirven como guía para el perfil

fitoquímico de la droga para garantizar la calidad, mientras que la cuantificación de los compuestos marcadores serviría como un parámetro adicional para evaluar la calidad de la muestra. La estandarización fitoquímica abarca toda la información posible generada con respecto a los componentes químicos presentes en un producto herbario.

Es fundamental para el cumplimiento de cualquier estándar de monografía la necesidad de métodos analíticos adecuados para determinar la identidad, la calidad y la potencia relativa. Se pueden citar: espectroscopia ultravioleta, espectroscopia infrarroja, cromatografía en capa delgada, cromatografía líquida de alta eficacia, cromatografía gaseosa (CG), espectrometría de masas (EM), CG-EM, CL-EM, resonancia magnética nuclear, entre otras.

2.33.5 Ensayos biológicos

En los ensayos biológicos se busca descubrir aquellas plantas que presentan actividad farmacológica, pudiendo indicar la eficacia del producto mediante técnicas cuidadosamente realizadas; los procedimientos deben programarse de tal manera que se pueda utilizar el material bruto, como extractos de plantas o fracciones de extractos. También se incluyen estudios toxicológicos, muy importantes para el desarrollo de nuevos fármacos y para la extensión del potencial terapéutico de las moléculas existentes, proporcionándoles información a los investigadores sobre las dosis a las cuales comienzan a aparecer los efectos tóxicos.

En el caso de drogas vegetales, las farmacopeas y monografías

plantean diferentes parámetros que pueden tener influencia sobre efectos farmacológicos y toxicológicos, por lo que resultan de utilidad en como parte del control de la calidad de las materias primas vegetales. Estos parámetros son:

2.33.6 Índice de amargor

Las plantas medicinales amargas se utilizan terapéuticamente como estimulantes del apetito. Su sabor amargo estimula el tracto gastrointestinal, especialmente, la secreción de jugo gástrico. Sin embargo, dado que la mayoría constan de dos o más componentes con diferente amargor, el amargor total debe medirse primero por el gusto.

El perfil de amargor de una planta se analiza comparando la concentración umbral de amargor de un extracto con la de una disolución diluida de clorhidrato de quinina. El amargor se expresa en unidades que corresponden al amargor de una disolución que contiene 1 g de clorhidrato de quinina en 2000 mL. Se debe utilizar agua potable para la extracción de los ingredientes botánicos y para enjuagarse la boca después de cada degustación.

2.33.7 Índice de hinchamiento

Este índice no es más que el volumen en mL que toma la muestra al hincharse 1g del material bajo condiciones específicas. Esta determinación se basa en la adición de agua o agentes de hinchamiento especificados para cada material vegetal. Tras agitar repetidamente durante una hora con una probeta graduada con tapón de vidrio, se deja reposar el tiempo necesario. A continuación, se lee el volumen de la

mezcla. Es fácil mezclar los componentes de la planta entera con el agente de carga, pero los ingredientes picados o en polvo deben agitarse vigorosamente a intervalos regulares para distribuirlos uniformemente en el agente de carga.

2.33.8 Índice de formación de espuma

Esta determinación se realiza con vista a establecer la capacidad que presentan algunas drogas de formar espuma persistente cuando una decocción o disolución acuosa se agita vigorosamente en un corto período de tiempo. El ensayo es característico de compuestos de tipo saponina o de otros que debido a sus características estructurales son capaces de disminuir la tensión superficial del agua.

2.33.9 Actividad hemolítica

La actividad hemolítica de una droga, o de un preparado que contiene saponinas, se determina por comparación con un material de referencia o saponina R, la cual tiene una actividad hemolítica de 1000 unidades por gramos. Una suspensión de glóbulos rojos se mezcla con igual volumen de una dilución seriada de la droga y se determina la menor concentración que produce un efecto completo de hemólisis. Este ensayo se lleva a cabo simultáneamente con el patrón de referencia.

Todos los procedimientos propuestos para determinar la actividad hemolítica están basados en el mismo principio, pero presentan algunas variaciones referidas a la procedencia de los glóbulos rojos; los métodos de preparación de la suspensión de los glóbulos rojos y del extracto de la droga; la actividad hemolítica definida del material de

referencia y el método experimental. Con vista a obtener valores confiables, es esencial estandarizar las condiciones experimentales y determinar la actividad hemolítica por comparación con la saponina de referencia. Muchas drogas, en especial aquellas derivadas de ***Caryophyllaceae***, ***Araliaceae***, ***Sapindaceae***, ***Primulaceae*** y ***Dioscoreaceae***, contienen saponinas. La propiedad más característica de éstos compuestos es la de causar la ruptura o lisis de los glóbulos rojos.

2.33.10 Residuos de plaguicidas

Los residuos de plaguicidas son sustancias específicas presentes en alimentos, productos agrícolas o piensos, resultantes del uso de plaguicidas. Los medicamentos herbarios suelen contener residuos de plaguicidas derivados de prácticas agrícolas como la pulverización, el comportamiento del suelo durante el cultivo y la adición de fumigantes durante el almacenamiento. Se utilizan diversos métodos tales como: la cromatografía de gases (CG), espectrometría de masas (EM) y técnicas combinadas como CG-EM, cromatografía de gases y espectrometría de masas. La OMS y la Farmacopea Europea también han publicado métodos sencillos que generalmente establecen valores límite para los residuos de plaguicidas en medicamentos.

2.33.11 Determinación de arsénico y metales pesados

La presencia en las drogas de arsénico y metales pesados, puede ser atribuida a muchas causas, entre las cuales se citan la contaminación ambiental y los residuos de pesticidas. La contaminación con trazas de arsénico se debe fundamentalmente, al tratamiento de las plantas con

ciertos pesticidas, estando los límites permisibles en términos de mg de arsénico por gramo de droga.

Para cadmio y plomo, cuya presencia se atribuye, fundamentalmente, a contaminación de los suelos por desechos industriales, las cantidades máximas permitidas están en el orden de 10 ppm y 0,3 ppm, respectivamente.

2.33.12 Determinación de microorganismos

Las drogas vegetales normalmente transportan bacterias y tierra del suelo. Un gran número de bacterias y hongos de la naturaleza aparecen en la microflora de las drogas, siendo predominantes las esporas aeróbicas. La práctica de cosechas, manipulación y producción son también causas adicionales de contaminación y crecimiento microbiano. Adicionalmente, la presencia de aflatoxinas provocadas por hongos se consideran contaminantes altamente peligrosos en una droga.

Los límites establecidos para la contaminación microbiana están de acuerdo al uso que se le dará al material y al material en sí mismo:

a) Contaminación de "drogas crudas" que se emplearán en procesos posteriores (incluyendo descontaminación adicional por un proceso físico o químico). Los límites son dados para drogas no tratadas, cosechados bajo condiciones higiénicas aceptables. Por gramo de droga se admite un máximo de 10^4 *Escherichia coli* y 10^5 como máximo de tierra vegetal.

b) Drogas que serán pretratadas (elaboración de infusiones y

decocciones), o se usarán en forma tópica, por gramo de droga el máximo es 10^7 bacterias aeróbicas, máximo 10^3 *Sacharomycetes* e *Hyphomycetes*, máximo 10^2 *Escherichia coli*, máximo 10^4 otras enterobacterias y la no presencia de *Salmonella*.

c) Drogas para uso interno. Por gramo de droga se admite un máximo de 10^5 de bacterias aeróbicas, máximo 10^3 *Sacharomycetes* e *Hyphomycetes*, máximo 10^1 *Escherichia coli*, un máximo de 10^3 de otras enterobacterias y la no presencia de *Salmonella*.

Cabe acotar que la confiabilidad del resultado obtenido en el análisis de una muestra, depende de la selección que se haya realizado de la misma. Debido a las características específicas de las drogas, en particular, su poca homogeneidad, se requiere de procedimientos especiales de manipulación relacionados con la toma de muestras, la cual se puede realizar de forma aleatoria en dependencia de la cantidad total de muestra disponible, a partir de la cual se obtiene una "muestra promedio" representativa del lote a analizar, con la que se llevan a cabo los ensayos de calidad (WHO, 2011; Miranda y Cuellar, 2012).

2.34 Elementos de cierre del capítulo

1- ¿Qué relación guarda la farmacognosia con la botánica?

La farmacognosia y la botánica se superponen porque ambas estudian las plantas. En tal sentido, examinan la estructura, taxonomía, distribución y ciclos de vida de las plantas. Muchas investigaciones farmacognósticas comienzan con la adecuada identificación y obtención de especies vegetales, tareas propias de la botánica.

Entre los objetivos complementarios se tiene que la botánica describe, clasifica y explica la morfología, fisiología, ecología y evolución de las plantas. En tanto, la farmacognosia toma esas especies para su estudio con fines terapéuticos. La taxonomía, técnicas de herbario, estudios morfológicos de las plantas, entre otros aspectos, previene la identificación errónea, la adulteración y fracaso terapéutico.

El conocimiento botánico reduce la lista de especies y partes de plantas candidatas para la selección, ya que proporciona el marco taxonómico, anatómico, ecológico y de recolección; la farmacognosia se basa en ese marco para además, caracterizar y evaluar los productos naturales biológicamente activos y garantizar su calidad, seguridad y eficacia.

2- ¿Por qué es importante la evaluación macroscópica y microscópica en el control de la calidad de una droga vegetal?

El análisis de características macroscópicas y microscópicas es un procedimiento esencial en el campo de la investigación botánica, desempeñando un papel fundamental para garantizar la identificación precisa de las plantas. El conocimiento de la anatomía e histología vegetal permite seleccionar las partes medicinales, detectar adulterantes e interpretar los análisis de calidad microscópicos.

Estos estudios permiten a los botánicos e investigadores diferenciar variaciones más sutiles entre especies, en particular, aquellas que pueden presentar similitudes. Por ejemplo, la identificación de especies muy similares puede verse significativamente influenciada por la observación de ciertos tricomas o estructuras glandulares, que solo son

discernibles mediante el uso del microscopio. La rigurosa metodología empleada en este minucioso enfoque garantiza la precisión en la identificación de plantas, lo que ofrece ventajas en diversos ámbitos, como la investigación de la biodiversidad, las iniciativas de conservación y las aplicaciones medicinales.

3- ¿Qué importancia tienen las aplicación de herramientas moleculares (DNA barcoding), las bases de datos y software en el estudio de especies vegetales?

Los códigos de barras de ADN son secuencias estandarizadas, idealmente únicas, codificantes o no codificantes, ya sea del genoma del organismo o de sus orgánulos, que se utilizan para identificar/clasificar un grupo de organismos. El método incluye la amplificación del código de barras de ADN, la secuenciación y la comparación con una base de datos de referencia que contiene las secuencias relevantes de diferentes especies. Lo anterior, permite una identificación precisa a nivel de especie, de aquellas morfológicamente similares o cuando solo se dispone de especímenes de plantas incompletos, incluso en casos donde las características morfológicas están ausentes o son ambiguas.

Por otro lado, la codificación de barras, junto con las herramientas computacionales y las bases de datos y software, surgidas a raíz de ello, ha permitido a los investigadores abordar los desafíos relacionados con la identidad de especies con mayor eficiencia y precisión, además de proporcionar sugerencias de identificación más rápidas y fáciles de usar, impulsando avances significativos en la

biología vegetal, la investigación botánica y estudios farmacognósticos, posibilitando la autenticidad del material con que se trabaja.

4- ¿Qué importancia tiene la Farmacoergasia en el estudio de las plantas medicinales?

La Farmacoergasia es una rama de la farmacognosia que comprende los procesos de cultivo, recolección y preparación de plantas medicinales para su uso farmacéutico, incluyendo técnicas de procesamiento primario como secado, trituración, extracción y conservación. Tiene una gran importancia en el estudio de las plantas medicinales porque nos ayuda a conocer el mes del año en que las plantas poseen mayor proporción de principios activos, el momento de su desarrollo y hora del día óptimo para su recolección, condiciones ideales para su cultivo, etc. Todos estos factores, pueden influir en la composición química y propiedades medicinales de las plantas.

5- ¿Cuáles son los principales indicadores en las normas de control de la calidad de drogas crudas y qué importancia tiene sus determinaciones?

La Organización Mundial de la Salud ha establecido normas para los métodos y procedimientos de estandarización de drogas vegetales con el fin de mantenerse al día con las tendencias actuales y emergentes. Entre los principales indicadores en las normas de control de la calidad de drogas crudas se encuentran: nombre botánico; parte utilizada; características sensoriales, análisis macroscópico y microscópico; parámetros físicos (materia extraña; fibra bruta; cenizas totales,

solubles en agua e insolubles en ácido; sustancias extraíbles; humedad), químicos (determinaciones cualitativas y cuantitativas de metabolitos), farmacológicos (índices de amargor, hinchazón, espuma y actividad hemolítica) y toxicológicos (determinación residuos de plaguicidas, arsénico y metales pesados).

Es importante la determinación de dichos indicadores porque con su cumplimiento se garantiza la idoneidad del material vegetal para su procesamiento posterior, manteniendo su seguridad y eficacia. Las especificaciones de cada producto sirven de referencia para determinar si sus características cumplen con las expectativas.

En términos generales se puede plantear que el control de calidad de las drogas vegetales, así como el desarrollo de procedimientos confiables para identificar sus componentes marcadores, son vitales para evitar la adulteración y la sustitución, confirmando la calidad y pureza estos productos herbarios.

CAPÍTULO III

3 EXTRACCIÓN. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE EXTRACTOS

El capítulo 3 aborda de manera integral los fundamentos, métodos y controles de calidad asociados al proceso de extracción de metabolitos bioactivos a partir de drogas vegetales. Inicia con una contextualización histórica, destacando cómo las preparaciones galénicas tradicionales utilizaban las plantas en formas simples, tales como infusiones, decocciones, ungüentos, sin un enfoque dirigido hacia la obtención selectiva de principios activos. La extracción moderna, en cambio, se fundamenta en principios fisicoquímicos que permiten aislar metabolitos específicos mediante técnicas controladas y reproducibles.

Se describen los principales métodos de extracción tradicionales, como maceración, digestión, decocción, infusión, percolación, soxhlet y reflujo, enfatizando sus bases teóricas, ventajas y limitaciones. También se explican los procedimientos para concentrar extractos, incluyendo la evaporación mediante rotavapor, destacando la importancia del vacío y el manejo de compuestos termolábiles.

El capítulo analiza la clasificación internacional de extractos según farmacopeas: tinturas, extractos fluidos, blandos y secos, describiendo sus características, relaciones droga: disolvente y usos farmacéuticos. Finalmente, se detalla el control de calidad de extractos mediante ensayos organolépticos, fisicoquímicos, tamizaje fitoquímico preliminar y técnicas bioautográficas en cromatografía en capa delgada (CCD), destacando la importancia de correlacionar los resultados

químicos con la actividad farmacológica observada.



Figura 60. Extractos reproducibles.

Fuente: Imagen creada por inteligencia artificial y revisada por los autores.

3.1 Extracción

Diversas culturas y civilizaciones han utilizado plantas medicinales desde tiempos ancestrales, para prevenir y tratar diversas enfermedades. El conocimiento sobre las propiedades terapéuticas de estas plantas ha sido un legado que se ha transmitido de generación en generación, consolidando una tradición en el uso de remedios herbales. Un aspecto fundamental para el estudio y utilización efectiva de las plantas medicinales es la extracción de sus compuestos bioactivos, proceso que ha evolucionado a lo largo de la historia y que constituye el enfoque principal de este capítulo.

Los extractos como preparación se denominan popularmente como “galénicos” en honor a Galeno, conocido médico griego de la

antigüedad, el cual hizo grandes aportes en su época al desarrollo de la Farmacia y la Medicina. En la época de Galeno (129-216 d.C.), la utilización de plantas medicinales se basaba en preparaciones rudimentarias, sin un conocimiento preciso sobre la composición química de los principios activos. Los remedios consistían principalmente en infusiones, decocciones, ungüentos y cataplasmas o emplastos, donde toda la planta o alguno de sus órganos se utilizaban sin involucrar procesos extractivos adecuados. El propósito fundamental era aprovechar las propiedades medicinales del recurso en la forma más natural posible, frecuentemente mezclando diversas especies para potenciar los efectos terapéuticos.

Las formulaciones galénicas de aquellos tiempos combinaban ingredientes vegetales con excipientes como aceites, miel y vino. Sin embargo, tales procesos no estaban encaminados a la extracción exclusiva de los compuestos químicos responsables de los efectos biológicos, lo que hacía que las formulaciones no tuvieran la eficacia deseada, ya que se partía de concentraciones de biomoléculas no determinadas.

Los avances en el campo de la fitoquímica han revolucionado la investigación y consecuentemente el uso de plantas medicinales, haciendo uso de técnicas avanzadas de extracción, fraccionamiento, purificación y caracterización de las moléculas de mayor impacto biológico. Métodos como la extracción con disolventes orgánicos, la cromatografía y la espectrometría de masas, permiten identificar y aislar los principios activos, asegurando una dosificación precisa y reproducible. Esto ha llevado a la formulación de fitofármacos y

suplementos nutricionales con respaldo científico, garantizando su seguridad y eficacia; pasando de ser preparaciones empíricas a productos estandarizados con los controles que cualquier tipo de medicamento exige para su registro oficial. Considerando la composición compleja de los extractos, resulta de gran importancia la correcta selección del método de extracción que se debe utilizar, acorde a la composición química que se busca extraer. Colateralmente, se debe controlar el proceso seleccionado para garantizar que los metabolitos bioactivos no sufran alteraciones que incidan negativamente en la efectividad terapéutica del producto final.

3.1.1 Fundamentos teóricos

La extracción es una operación que forma parte de un grupo importante de operaciones unitarias conocidas como operaciones difusionales o de transferencia de materia. Es la técnica empleada para separar un compuesto orgánico de una mezcla o para aislarlo de sus fuentes naturales. Este proceso podría considerarse uno de los más importantes en la investigación fitoquímica, pues de ello depende la obtención de las moléculas de interés, eliminando los componentes que pudieran considerarse no deseados acorde a los objetivos propuestos.

Aunque existen diversas técnicas de extracción la más utilizada es la extracción sólido- líquido, para lo cual se emplean disolventes específicos, conocidos como "menstruos". Un extracto vegetal se podría definir como la mezcla de compuestos obtenidos desde la planta fresca o seca, o desde cualquiera de los órganos de la planta utilizando un método de extracción apropiado.

Para la obtención de un extracto eficaz, se debe considerar las propiedades del material vegetal y sobre todo de los metabolitos que desea extraer. Si el método a elegir utiliza disolvente, será de suma importancia la elección apropiada de este, según la afinidad con las moléculas bioactivas. No menos importante resulta la correcta elección del procedimiento de extracción, aspecto estrechamente relacionado con los aspectos antes mencionados. La elección del método más adecuado depende principalmente del objetivo del estudio y de si los metabolitos de interés ya han sido identificados.

Cuando el material vegetal se selecciona desde una perspectiva etnobotánica, es recomendable emplear los métodos de extracción tradicionales (siempre que estén documentados), ya que estos podrían facilitar el aislamiento de metabolitos con potencial bioactivo.

Si la especie vegetal ha sido objeto de estudios químicos previos, una revisión bibliográfica exhaustiva puede ofrecer la información necesaria sobre los métodos de extracción más efectivos, lo que ahorra tiempo y recursos. Sin embargo, esto no impide la posibilidad de explorar técnicas alternativas que podrían permitir la obtención de metabolitos diferentes o una mayor eficiencia. Si la materia prima vegetal no ha sido objeto de investigación previamente, la falta de datos sobre métodos de extracción apropiados hace que el investigador pueda ensayar diversas técnicas para determinar cuál resulta más eficaz.

En términos generales, la elección del método debe basarse en la naturaleza y la cantidad del material que se desea extraer. Debe

considerar siempre que un mayor rendimiento en el proceso de extracción, no garantiza necesariamente una mayor concentración de los compuestos bioactivos de interés. Tanto la calidad como la cantidad de los metabolitos bioactivos extraídos son aspectos fundamentales al elegir el método de extracción.

3.2 Tipos de extracción

De acuerdo al método empleado, la extracción puede ser de tres tipos: extracción mecánica, extracción por destilación y extracción mediante disolventes.

3.2.1 Extracción mecánica

La extracción mecánica consiste en extraer de los tejidos vegetales o animales, los principios activos disueltos en los líquidos que impregnan dichos tejidos. Los principales métodos de extracción mecánica son: extracción por incisión, extracción por calor y extracción por expresión.

La extracción por incisión consiste en hacer cortes en la superficie de la parte de la planta de donde se desea extraer los líquidos de interés. Se utiliza para la obtención del latex del fruto verde de la *Carica papaya* (papaya), rico en papaína bruta que no es más que una mezcla de enzimas proteolíticas. El corte de las cápsulas verdes de *Papaver somniferum* (adormidera) permite obtener el opio rico en alcaloides como la morfina y codeína. También el rasgado de la corteza de la especie *Croton lechleri* Müll. Arg., facilita la obtención de un látex rojo reconocido por sus propiedades cicatrizantes.

La extracción mecánica por calor, tiene mayor aplicación en las células animales, provocando su ruptura por dilatación del protoplasma y promoviendo la salida al exterior de su contenido. Es una de las formas de obtener el aceite de hígado de bacalao o la manteca de la panza del cerdo. Su empleo en células vegetales no es muy efectivo ya que es más gruesa la membrana por lo que se hace resistente a la ruptura por dilatación.

La extracción por expresión, dentro de los procesos mecánicos, resulta el procedimiento más generalizado, y consiste en aplicar fuerte presión sobre la droga, utilizando exprimidores caseros o prensas automatizadas. Por esta vía pueden obtenerse los denominados zumos (si provienen de plantas) o los jugos (si provienen de animales). En ambos casos son líquidos turbios, debido a las impurezas sólidas que resultan del proceso extractivo mecánico, por lo que pudiera ser necesario efectuar una clarificación haciendo uso de métodos de separación como la decantación, la filtración y la centrifugación.

3.2.2 Extracción por destilación

La extracción por destilación**,** se define como la operación de separar, mediante calor, los diferentes componentes líquidos de una mezcla, aprovechando las diferencias de volatilidades de los compuestos por separar. El aparato más utilizado para la destilación en un laboratorio consta de un recipiente donde se almacena la mezcla, a la que se le aplica calor, un condensador donde se enfrían los vapores generados, llevándolos de nuevo al estado líquido y un recipiente donde se almacena este líquido concentrado.

Este tipo de extracción gana mayor interés para separar de las matrices vegetales la fracción volátil o aceite esencial. En este sentido pueden realizarse algunas variantes, tales como: destilación por arrastre con vapor e hidrodestilación.

La destilación por arrastre con vapor es una técnica usada para separar sustancias orgánicas insolubles en agua y ligeramente volátiles, de otras no volátiles que se encuentran en la mezcla, como resinas o sales inorgánicas. Esta técnica se emplea con frecuencia para separar aceites esenciales que se encuentran en los diferentes órganos de algunas plantas. El método permite separar sustancias que además de ser inmiscibles en agua, se descomponen a su temperatura de ebullición (100 °C o cerca de ella). El proceso tiene lugar utilizando dos recipientes (erlenmeyer 1), uno donde se coloca el agua, con la cual se generan los vapores y un segundo (erlenmeyer 2) donde se coloca la droga, previa disminución del tamaño de partículas de ser necesario. El erlenmeyer 1 se calienta hasta ebullición a fin de generar el vapor que pasará al erlenmeyer 2, extrayéndose de esta manera el aceite esencial, el que es inmediatamente arrastrado por el vapor de agua en un proceso de codestilación.

En este método se puede utilizar material fresco o seco. Se recomienda embeber el mismo en agua para evitar la descomposición de los compuestos químicos, ya que regula la temperatura y a la vez ayuda a la volatilización del aceite que, aunque en su mayoría destilan en el vapor, temperaturas muy elevadas provocan alteraciones irreversibles. El frasco que contienen el material vegetal y el agua, es conectado a un condensador. Después de calentar, el vapor (mezcla de aceite y agua)

condensa y el destilado se colecta separado en dos capas. Si se desea aumentar el rendimiento, el destilado se devuelve repetidas veces a la planta para que la solución se sobresature. La hidrodestilación es una técnica de extracción tradicional también utilizada en la obtención de la fracción volátil de órganos vegetales, particularmente para extraer aceites esenciales. Esta, al igual que la destilación por arrastre con vapor, se fundamentan en el uso del vapor de agua para extraer compuestos volátiles presentes en la materia vegetal.

Durante la hidrodestilación, el material vegetal se pone en contacto directo con agua hirviendo. Los compuestos volátiles se evaporan junto con el vapor y, posteriormente, se condensan en un sistema de refrigeración. La mezcla condensada de agua y aceite esencial se recoge en un recipiente separador, donde el aceite, por diferencia de densidad, se separa de la fase acuosa.

En la hidrodestilación el material vegetal se encuentra en contacto directo con el agua hirviendo, mientras que en la destilación por arrastre con vapor se utiliza un vapor generado en un recipiente independiente, que atraviesa la droga vegetal. En ambos métodos, se aprovecha la capacidad del vapor para transportar los compuestos de interés y facilitar su posterior separación del agua.

Dentro de las ventajas de la hidrodestilación pudiera citarse que es un método sencillo y de bajo costo, así como que no requiere el uso de disolventes orgánicos. Sin embargo, resulta desventajoso para compuestos termolábiles debido a la exposición prolongada al calor, pudiera generar pérdida de ciertos componentes por hidrólisis u

oxidación, dado el tiempo de extracción prolongado, y puede requerir grandes cantidades de material vegetal y agua.

3.2.3 Extracción mediante disolvente

La extracción mediante disolvente es un proceso en el que se emplea un disolvente o menstruo apropiado para separar los compuestos químicos solubles de una matriz sólida o líquida. Este método se basa en la solubilidad diferencial de la compleja mezcla de metabolitos en el disolvente seleccionado y puede realizarse mediante diversas técnicas tradicionales como maceración, percolación, reflujo, Soxhlet o ultrasonido.

Los procesos de extracción con disolventes podrían clasificarse en dos tipos: la extracción sólido-líquido y la extracción líquido-líquido.

- Extracción líquido-líquido

La extracción líquido-líquido se basa en la separación de los componentes de una disolución mediante su contacto con otro líquido o disolvente que no sean miscibles entre sí. La técnica se basa en las diferencias de solubilidad de los compuestos entre los dos líquidos, permitiendo la transferencia selectiva de una sustancia desde una fase a otra. Esta técnica tiene mayor aplicación cuando se parte de un extracto que posee una mezcla compleja de metabolitos, los que pueden ser separados gracias a sus diferencias de polaridad, facilitando su aislamiento y posterior purificación.

- Extracción sólido-líquido

En el campo de la fitoquímica el método de extracción más utilizado es la extracción sólido-líquido, ya que permite la migración de los compuestos químicos presentes en la matriz vegetal, al disolvente utilizado. Este proceso implica poner en contacto el material vegetal con un menstruo adecuado que disuelve selectivamente los compuestos bioactivos de interés. Posteriormente, el disolvente se separa, obteniendo un extracto que puede concentrarse según sea necesario.

Los procesos a seguir deben tener establecidos procedimientos estandarizados y bien definidos. A diferencia de la disolución, donde todo el material debe quedar completamente solubilizado, en la extracción van permanecer residuos insolubles, correspondiente a estructuras químicas no afines con el disolvente.

La extracción es un proceso complejo que involucra diversos fenómenos físicos y químicos. Este procedimiento puede llevarse a cabo utilizando material vegetal en estado fresco o seco.

Una vez que la droga vegetal está seca, por razones de conservación, la célula vegetal experimenta cambios que influyen en su capacidad para liberar compuestos bioactivos durante el proceso de extracción. Sin embargo, cuando la célula está viva, la membrana celular actúa como una barrera protectora e impermeable, capacidad que se pierde luego del proceso de secado. La deshidratación provoca que la pared celular vegetal se vuelva más rígida, frágil y porosa, lo que permite la liberación de compuestos bioactivos por mecanismos físico-químicos en lugar de fisiológicos. Adicionalmente, el proceso de secado inactiva reacciones enzimáticas que pueden alterar los compuestos de interés.

Una vez que los compuestos bioactivos se liberan de las células, interactúan con el disolvente para formar complejos soluto-solvente. Este fenómeno es fundamental para que los metabolitos se disuelvan en el disolvente de extracción, permitiendo su aislamiento. La solubilidad de los compuestos depende de sus propiedades químicas y de la naturaleza del disolvente.

El proceso de extracción se desarrolla en tres fases generales. La primera consiste en la migración de los compuestos intracelulares hacia el exterior a través de la pared celular, o membrana porosa. Este desplazamiento está influenciado por la difusión molecular y el coeficiente de difusión interno, lo que puede ser cuantificado mediante la ecuación correspondiente a la ley de Fick (ec.1).

$$Sc = D\,int \times Fs \times \frac{C-c}{} \times t(1)\,l$$

donde:

Sc: Cantidad de sustancia a difundir (kg).

D_{int}: Coeficiente de difusión interior que corresponde a la cantidad de sustancia a difundir en un segundo a través de una superficie de $1m^2$.

Fs: Superficie de contacto entre las fases del proceso (m^2).

C-c: Diferencia de las concentraciones de sustancia entre las fases (kg/m^3). l: Espesor de la capa a través de la cual ocurre la difusión (m).

t: Tiempo durante el cual ocurre el proceso de difusión (s).

En esta primera fase del proceso de extracción, se deduce que mientras

mayor es la superficie de contacto (menor tamaño de partícula), la diferencia de concentraciones y el tiempo de difusión, la cantidad de sustancia a difundir es mayor y por tanto la eficiencia del proceso es mayor (Sc). Siguiendo el análisis matemático de la expresión, el espesor de la capa a través de la cual ocurre la difusión influye de manera inversamente proporcional, por lo que mientras menor es este valor, más eficiente es el proceso.

Luego de que las moléculas han atravesado la capa de difusión entre la pared y el menstruo de extracción, el proceso depende totalmente de la ley de difusión molecular libre representada a través de la siguiente ecuación (ec. 2):

$$Dm = \frac{RT}{No} \times \frac{1}{6\pi r\eta} \quad (2)$$

donde:

Dm: Coeficiente de difusión molecular.

R: Constante de los gases (8,32 J/mol).

T: Temperatura absoluta (K).

No: Número de Avogadro (6,02 x 10^{23})

π: Constante matemática (3,14)

r: Radio de las moléculas a difundir (m).

h: Viscosidad del medio (N/s.m).

Según esta expresión, la difusión molecular se ve favorecida con el incremento de la temperatura, mientras que disminuye al incrementarse la viscosidad del medio y con el aumento del tamaño de las moléculas difundir.

La última fase del proceso corresponde al traslado de las sustancias difundidas al centro del flujo del disolvente o menstruo empleado en la extracción. En tal sentido ocurre una difusión convectiva que depende de la velocidad de transporte del menstruo y de su capacidad de disolución.

3.3 Selección del disolvente a utilizar

En la selección del disolvente (s) a utilizar debe considerarse lo siguiente: la selectividad, facilidad de manipulación, precio, bajo potencial para formar artefactos, baja toxicidad, baja inflamabilidad y riesgo de explosión, riesgos de contaminación ambiental y facilidad para ser reciclado. Disolventes como el benceno, tolueno, o tetracloruro de carbono, no deben ser utilizados por su elevada toxicidad. El éter dietílico es muy inflamable y puede formar peróxidos explosivos.

En la tabla 3 se resaltan los disolventes más utilizados.

Tabla 3. Constante dieléctrica de los disolventes utilizados en procesos de extracción.

Disolvente	Constante dieléctrica	Punto de ebullición (°C)	Viscosidad (cP)	Solubilidad en agua (% V/V)

n-Hexano	1,88	69	0,31	0,0011
Éter de petróleo	~1,9	30–60	~0,5–0,65	Prácticamente insoluble
Éter dietílico	4,3	34,6	0,224	1,2
Cloroformo	4,81	61,15	0,57	0,815
Acetato de etilo	6,02	77,11	0,45	8,7
Diclorometano	8,93	39,75	0,44	1,6
n-Butanol	17,51	117,5	2,98	7,81
n-Propanol	20,33	97,2	2,3	Miscible en todas proporciones
Acetona	21	56,1	0,32	Miscible en todas proporciones
Etanol	24,55	78,2	1,2	Miscible en todas proporciones
Metanol	32,70	64,7	0,59	Miscible en todas proporciones
Agua	80	100	1,0	—

La opción inicial para seleccionar el disolvente más apropiado, se basa

en la selectividad con la sustancia a extraer, lo que guarda estrecha relación con la polaridad de las moléculas; en otras palabras, suele llevarse a cabo la extracción utilizando disolventes que cumplan con el principio de que similar disuelve lo similar.

La polaridad es una propiedad fisicoquímica de las moléculas que describe la distribución desigual de cargas eléctricas en su estructura. Esta propiedad está determinada por factores como la diferencia de electronegatividad entre los átomos y la geometría molecular. En términos prácticos, un disolvente polar tiene una alta capacidad para formar enlaces de hidrógeno o interaccionar mediante fuerzas dipolares con otras moléculas polares. Ejemplos comunes incluyen el agua, el metanol y el etanol. Por el contrario, los disolventes apolares, como el hexano o el éter de petróleo, presentan una distribución más uniforme de carga y, por lo tanto, son más adecuados para disolver sustancias no polares.

Cuando se diseña un protocolo de extracción sólido-líquido, resulta de gran importancia la naturaleza del metabolito objetivo. Conocer la estructura química y la polaridad del o los analitos, permite anticipar su comportamiento frente a distintos disolventes. No siempre es posible obtener una extracción eficiente con un solo disolvente; por ello, es común emplear mezclas, como etanol-agua (hidroalcohólicas), para ajustar la polaridad del medio.

En resumen, comprender la polaridad de los disolventes y su afinidad con los metabolitos es esencial para diseñar métodos de extracción sólidos-líquido eficaces, selectivos y reproducibles. Esta elección no

solo condiciona el rendimiento del proceso, sino también la calidad química y biológica del extracto obtenido.

En la tabla 4 se muestran algunos ejemplos del tipo de disolvente (según su polaridad) que pudiera utilizarse según el tipo de metabolito a extraer.

Cuando se refiere a una extracción como "total", suele utilizarse un disolvente polar (etanol, metanol, o mezclas hidroalcohólicas) que extraigan la mayor cantidad de compuestos posibles. Esto se basa en la capacidad que tienen los disolventes alcohólicos de aumentar la permeabilidad de la pared celular, facilitando la eficiente extracción de grandes cantidades de constituyentes de elevada, mediana y baja polaridad.

Tabla 4. Tipos de metabolitos a extraer según la polaridad del disolvente.

Polaridad del disolvente	**Metabolitos**	
No polares	Alcanos	Antraquinonas libres
	Triacilglicéridos	Ceras
	Ácidos grasos	Esteroles
	Cumarinas	Terpenoides
Mediana polaridad	Algunos alcaloides	
	Flavonoides	

	Cumarinas simples
Polares	Glicósidos
	Taninos
	Alcaloides en forma de sales

También pueden utilizarse determinados pH en disoluciones acuosas que permitan la solubilidad selectiva de determinados grupos de metabolitos o incluso su estabilidad. Por ejemplo, en la extracción de alcaloides, estos son compuestos básicos. En un medio acuoso ácido (por ejemplo, pH 2–4), se protonan formando sales solubles en agua. Posteriormente, para extraerlos en un disolvente orgánico, se puede basificar la disolución (por ejemplo, pH 9–10) para revertir la protonación y convertirlos en su forma libre, que es mucho menos polar y se transfiere a la fase orgánica. Este procedimiento es ampliamente empleado en la fitoquímica para aislar alcaloides de extractos vegetales. Otro ejemplo sería en la extracción de las antocianinas, pigmentos responsables de los colores rojos, morados y azules en muchas frutas y flores, son estables y solubles en medios muy ácidos (generalmente a pH 1–3). Mantener la disolución en este rango de pH permite extraer selectivamente estas moléculas y minimizar la degradación o la formación de complejos indeseados, favoreciendo su posterior análisis o purificación.

No obstante, el uso de determinados valores de pH pudiera propiciar la formación de artefactos y/o permitir la degradación de compuestos.

En el caso de que parte del disolvente permanezca en el producto terminado, debe ser aprobado por el órgano nacional responsable del registro del producto fitoterapéutico, razón por la cual la mayoría de los fitoterapéuticos son elaborados con mezclas hidroalcohólicas.

3.4 Factores que influyen sobre el proceso de extracción sólido-líquido

Analizando las fases antes referidas para el proceso de extracción sólido-líquido, existen varios factores que pueden influir sobre la eficiencia del mismo. Cuando el proceso inicia la extracción es más ágil, atribuible a que es el momento de mayor velocidad de difusión, por la facilidad de acceso del menstruo a las zonas del tejido y por la diferencia de concentraciones entre el medio intra y extracelular. Conforme el tiempo aumenta la velocidad de difusión disminuye, limitándose la extracción a las zonas de más difícil acceso para el disolvente.

Sobre el proceso de extracción, hay varios factores que pueden influir de forma decisiva

- **Tamaño de partícula o grado de división de la droga**: De acuerdo a la expresión de la ley de Fick, mientras menor es el tamaño de partícula de la materia prima vegetal, mayor será la superficie de contacto con el disolvente y consecuentemente mayor será la difusión a través del tabique poroso. Sin embargo, un grado de división muy elevado de la droga, podría propiciar su compactación en presencia del menstruo, lo que dificulta el proceso de difusión, sobre todo, en el método de lixiviación o

percolación. Cabe señalar que, si la materia vegetal se fragmenta en exceso, podría aportar al extracto metabolitos no deseados o impurezas.

- **Grado de absorción de agua o de menstruo**: cuando la célula vegetal está seca o deshidratada, la superficie de la membrana tiene una apariencia arrugada, lo cual hace que se dificulte la difusión. Si se desea mejorar la velocidad y calidad del proceso, debe ponerse la droga cruda en contacto con el disolvente, en una cantidad suficiente que restituya, aproximadamente, su volumen inicial. Con ello se logra un aumento de la superficie de contacto entre la célula y el disolvente, favoreciéndose el proceso de difusión. Las monografías oficiales sugieren tiempos de humectación entre 15 minutos y 4 horas, considerando que es un factor que influye de manera significativa en la calidad de un proceso de extracción.

- **Viscosidad del medio**: Este factor pudiera influir negativamente en la difusión molecular. Si desea mayor eficiencia en el proceso de extracción no deben seleccionarse disolventes de alta viscosidad. En tal sentido el tiempo del proceso extractivo y la consecuente saturación del disolvente podría aumentar la viscosidad del medio y con ello disminuir la difusión de las moléculas.

- **Balance de concentraciones**: En la expresión de la ley de Fick queda claro que la difusión depende del balance de concentraciones. Siempre que dentro de la célula vegetal exista mayor concentración de metabolitos que en el medio extracelular, la difusión ocurrirá de forma rápida y hacia el exterior. Esto sugiere que durante el proceso extractivo se debe

garantizar que en el medio extracelular (disolvente) siempre exista una menor concentración de las moléculas a extraer. Para lograrlo debe realizarse el cambio del menstruo (siempre que el proceso sea discontinuo), evitando que este se sature y consecuentemente incremente su viscosidad.

- **Temperatura**: Este factor incide de manera directamente proporcional con la difusión molecular, es decir, a mayor temperatura, más ágil será la difusión. Sin embargo, solo puede considerarse en aquellas matrices vegetales donde no exista la presencia de compuestos químicos termolábiles, ya que podría afectar la calidad y eficacia del extracto. También se debe considerar que para aquellos métodos donde se aplique temperatura el disolvente no debe ser volátil, a menos que el sistema de extracción garantice la adecuada condensación del menstruo, como es el caso de la extracción mediante Soxhlet. Otro aspecto a considerar es que cuando la droga vegetal contiene almidones, estos se aglutinan por efecto del calor, aumentan la viscosidad y por tanto disminuyen el proceso de difusión y la calidad de la extracción.

- **Agitación**: Siempre que el método de extracción lo permita, es un factor que influye significativamente en la extracción de metabolitos desde una materia prima vegetal cuando se utilizan disolventes, ya que afecta la eficiencia del proceso de transferencia de masa. La agitación genera movimiento y turbulencia en el sistema, lo que aumenta el contacto entre el disolvente y la superficie de la materia vegetal. Esto facilita que

los compuestos solubles en el disolvente se liberen de la matriz vegetal. En otro sentido tiene lugar la reducción de la capa límitrofe entre la interfase matriz vegetal/disolvente, en la cual la concentración de soluto debe ser menor que en el interior del material vegetal. La agitación ayuda a reducir este efecto al renovar constantemente el disolvente en la superficie, permitiendo que el gradiente de concentración favorezca la difusión de los compuestos hacia el disolvente. Si se analiza como un efecto mecánico sobre la matriz vegetal, la agitación puede contribuir a la ruptura parcial de las estructuras celulares, liberando compuestos que de otro modo permanecerían encapsulados dentro de la célula. Sin embargo, un exceso de agitación debe evitarse, ya que puede provocar la extracción de compuestos no deseados.

No menos importante en el proceso de extracción es la calidad de la materia prima, ya que, si esta no cumple lo estándares establecidos por las normas correspondientes, la composición química del extracto pudiera no garantizar la eficacia y la seguridad del fitomedicamento.

3.5 Métodos de extracción tradicionales

La extracción tradicional se define como una operación unitaria de transferencia de masa en la que los principios activos migran de manera pasiva y lenta desde la matriz vegetal hacia un disolvente convencional (menstruo), un proceso gobernado por la difusión libre, la afinidad química y los gradientes de concentración térmica convencional.

Históricamente, estos métodos tienen su origen en las preparaciones rudimentarias de la antigüedad conocidas popularmente como "galénicas" (en honor al médico griego Galeno), las cuales consistían en infusiones, decocciones, ungüentos o cataplasmas, que utilizaban la planta de forma simple y empírica, sin un enfoque dirigido a la obtención selectiva de sus principios activos. Con el desarrollo de la ciencia, estas técnicas se estandarizaron y clasificaron formalmente en tres grandes grupos según su mecanismo de acción: extracción mecánica, extracción por destilación y extracción mediante disolventes (sólido-líquido), los cuales fueron descritos anteriormente.

Dentro de los métodos tradicionales de extracción sólido-líquido destacan la maceración, la percolación, la digestión, la infusión, la decocción, el reflujo y la extracción mediante el equipo Soxhlet.

3.5.1 Maceración

La maceración es un método sencillo, noble y muy utilizado para obtener extractos iniciales de productos naturales, especialmente en la investigación fitoquímica.

Este proceso consiste en dejar en reposo la droga vegetal (planta seca o fresca) en un recipiente cerrado, con un disolvente o menstruo y a temperatura ambiente. El tiempo de maceración puede variar entre 2 y 14 días, aunque, si no se conoce el tiempo óptimo para una matriz vegetal específica, se recomienda un promedio de 7 días. Se recomienda, además, hacer cambios del disolvente durante ese lapso de tiempo para garantizar un mayor agotamiento de la materia vegetal.

Una vez transcurrido el tiempo, el líquido obtenido (extracto) se separa por decantación. Luego, se exprime el residuo vegetal para recuperar la mayor cantidad de líquido posible. Este residuo puede enjuagarse y exprimirse varias veces hasta alcanzar el volumen deseado del extracto.

En dependencia de cómo se realice el proceso pudiera clasificarse en dos tipos:

1. Maceración simple o estática: Consiste en dejar la planta en contacto con el disolvente durante varios días, con agitaciones ocasionales. Aunque es un método lento, puede repetirse dos o tres veces para mejorar la eficiencia del proceso. En la industria, este tipo de maceración está casi en desuso debido al tamaño de los equipos necesarios (figura 61A).

2. Maceración dinámica: En este caso, la droga y el disolvente se mantienen en constante movimiento, lo que acelera el proceso de extracción y permite una mejor recuperación de los principios activos. La agitación favorece la difusión del disolvente hacia el interior del material vegetal y evita que se forme una capa en la superficie celular que podría enlentecer el proceso (figura 61B).

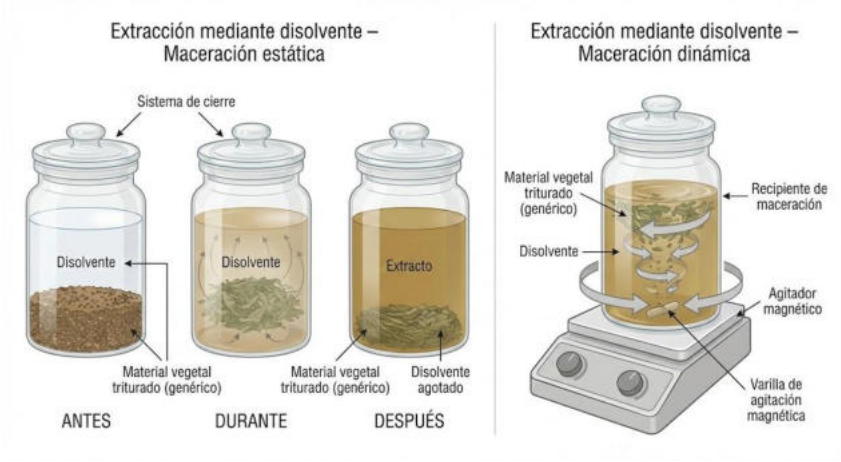


Figura 61. Extracción mediante maceración estática y dinámica.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

Ambos tipos de maceración pueden llevarse a cabo a temperatura ambiente; de utilizar calor moderado el proceso se denomina digestión.

La maceración es el método preferido cuando los principios activos de la planta pueden deteriorarse con el calor y cuando son solubles a temperatura ambiente en el disolvente de elección. También se prefiere este método cuando no es posible aplicar técnicas como la percolación. Por ejemplo, en el caso de plantas que contienen mucílagos, estos pueden hincharse, aumentando la viscosidad del medio y como consecuencia se dificulta el paso del disolvente, lo que hace que la lixiviación no sea viable.

Entre las ventajas de la maceración destaca su simplicidad y bajo costo, ya que no requiere de equipos sofisticados, lo que la hace accesible para laboratorios con recursos limitados. Al realizarse a temperatura ambiente, se minimiza el riesgo de degradación de

compuestos sensibles al calor. Colateralmente, permite el uso de una amplia gama de disolventes, facilitando la extracción selectiva de diferentes tipos de compuestos según su polaridad. En el caso de que los menstruos sean muy volátiles, se recomienda el uso de recipientes cerrados, minimizándose las pérdidas por evaporación.

Como desventajas a señalar está el tiempo prolongado de extracción, lo que limita su eficiencia en términos de tiempo. En comparación con métodos más modernos, la maceración puede presentar menores rendimientos en la recuperación de compuestos bioactivos. A pesar de esto, si se repite varias veces, se incrementa la cantidad de disolvente necesario, pero también mejora el rendimiento del extracto. Cabe resaltar que la exposición prolongada del material vegetal al disolvente, especialmente en condiciones no estériles o cuando el disolvente es agua, se puede favorecer la proliferación de microorganismos. Por ejemplo, una maceración acuosa de más de 24 horas a temperatura ambiente de las hojas de *Moringa oleífera* (moringa), provoca una fermentación en el recipiente de extracción y la consecuente degradación de los metabolitos de interés.

El método de maceración pudiera presentar inconvenientes en aquellas matrices vegetales complejas, ya que los compuestos químicos localizados en estructuras celulares resistentes, pudieran no extraerse completamente mediante maceración simple. Adicionalmente, la

necesidad de ocupar grandes volúmenes de disolvente, para asegurar una extracción adecuada, no solo puede incrementar los costos, sino que genera preocupaciones ambientales.

3.5.2 Digestión, decocción e infusión

Los métodos de extracción como la digestión**,** decocción e infusión son utilizados para obtener metabolitos especializados de origen vegetal (frescos o secos), destacando en ellos su simplicidad y el empleo de calor (figura 62).



Figura 62. Extracción acuosa mediante infusión (1), digestión (2) y decocción (3).

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

Estos tres métodos comparten el uso del agua como disolvente principal, lo que los hace seguros, accesibles y compatibles con el consumo humano. Son adecuados para la extracción de compuestos polares como alcaloides, glicósidos, taninos, saponinas, entre otros. Son métodos tradicionales con una base empírica respaldada por la ciencia moderna, ampliamente usados en fitoterapia y medicina natural.

La **digestión** es un proceso de extracción que tiene el mismo

fundamento que la maceración, solo que se realiza mediante la aplicación de calor constante y debidamente regulado durante varias horas. Se debe utilizar una temperatura superior a la del ambiente pero inferior a la de ebullición del disolvente, lo que sugiere el uso, no solo de agua, sino también de otros menstruos como etanol y mezclas hidroalcohólicas. El objetivo es aumentar la solubilidad de los metabolitos especializados en el disolvente, sin provocar su degradación.

Dicho proceso logra mayor rendimiento extractivo que la maceración, es ideal para compuestos que no sean termosensibles a la temperatura de trabajo y puede realizarse con equipos sencillos (baños termostatados). Como desventajas resalta el hecho que no es útil para compuestos altamente termosensibles, ni volátiles; se corre el riesgo de contaminación si no se mantiene buena higiene y control microbiológico y requiere más tiempo que métodos como la decocción.

La **decocción** consiste en poner en contacto la droga vegetal con el agua durante un tiempo determinado, generalmente no superior a 30 minutos, seguido de enfriamiento y filtración. Este método es apropiado para tejidos vegetales duros y resistentes, como cortezas, raíces o semilla.

Como ventajas de este resalta la eficiencia de extracción de principios activos difíciles de solubilizar y que las altas temperaturas favorecen la ruptura celular, aumentando la difusión de metabolitos de alta polaridad. Sin embargo, resulta desventajoso para compuestos termosensibles (como algunos flavonoides o vitaminas) y puede

volatilizar sustancias aromáticas (aceites esenciales).

La **infusión** es un método suave en el que se vierte agua hirviendo sobre la droga vegetal, se tapa y se deja reposar sin hervir, por lo general de 5 a 15 minutos, seguido de filtración. El tiempo de enfriamiento pudiera ser prolongado para mejorar el proceso de extracción. Es ideal para la extracción de metabolitos de alta polaridad presentes en flores, hojas y partes blandas de las plantas.

Su mayor ventaja es que, al igual que la decocción, es una técnica que se utiliza ampliamente en la medicina tradicional y en ambientes hogareños, dada la rapidez, simplicidad y bajos requerimientos instrumentales. Sin embargo, el rendimiento extractivo es inferior a los métodos de decocción o digestión, tiene poca efectividad con tejidos vegetales duros o lignificados y puede haber variabilidad en la calidad del extracto por falta de estandarización.

Los tres métodos logran extractos que son muy poco estables, por lo que se preparan para consumo rápido. De requerir mayor tiempo de almacenamiento, es necesario adicionar preservantes químicos para mejorar algo la estabilidad de los mismos.

3.5.3 Percolación

La **percolación** es uno de los métodos más utilizados en farmacognosia y fitoquímica para la extracción continua de metabolitos bioactivos presentes en drogas vegetales. Se basa en principios físico-químicos que permiten obtener extractos de forma eficiente, reproducible y con alto rendimiento. Este método está

especialmente adaptado a preparaciones a escala industrial y semiindustrial.

La percolación es una forma controlada y dirigida de lixiviación, término que en química describe el proceso mediante el cual un disolvente atraviesa un sólido poroso (como una droga vegetal pulverizada), disolviendo los compuestos solubles presentes en su interior. En este sentido, se podría definir que la percolación es una aplicación farmacéutica específica de la lixiviación**,** donde se optimizan variables como tamaño de partícula, velocidad del flujo, tipo de disolvente y tiempo de contacto, para obtener extractos de utilidad en la terapéutica.

La percolación se basa en la difusión de los compuestos solubles desde una matriz vegetal que se encuentra ubicada en un equipo denominado lixiviador o percolador, hacia un disolvente que fluye a través de ella por gravedad. Los percoladores se pueden fabricar de vidrio, de acero inoxidable o de cobre (figura 63).



Figura 63. Método de extracción por percolación.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

El proceso implica las siguientes etapas:

1. Preparación de la droga**:** molienda y humectación previa para facilitar la penetración del disolvente y la eficacia.

2. Montaje del percolador**:** colocación uniforme del material en un recipiente cónico o cilíndrico. Tomar en consideración que el percolador en su parte inferior debe tener un medio filtrante que puede ser una placa porosa o una capa fina de algodón o lana de vidrio humedecida con el disolvente.

3. Adición y paso del disolvente**:** el disolvente se añade en la parte superior del percolador descendiendo lentamente a través del lecho vegetal. Se abre la válvula inferior del lixiviador para permitir la salida del aire, y a través de la parte superior se añade

cuidadosamente el menstruo, en una cantidad suficiente para que la droga quede completamente humedecida y cubierta por un excedente de aproximadamente 0,5 cm de altura. Posteriormente, se cierra nuevamente el lixiviador y el volumen de extracto que haya goteado se reincorpora por la parte superior. Se cierra o cubre adecuadamente y se deja macerar durante 48 horas a temperatura ambiente, salvo que se indique un tiempo distinto.

4. Desarrollo de la lixiviación**:** Luego de transcurrido el tiempo maceración se abre la llave inferior para permitir la salida del extracto a la velocidad establecida, que puede oscilar entre 1-5 mL por min. Para establecer la velocidad no solo debe considerarse la cantidad de la droga sino también el diámetro y la altura del percolador. La velocidad de salida puede ser mayor con una capa de droga más alta que con otra más baja.

Dentro de las ventajas que se establecen para el método se citan:

- Mayor eficiencia extractiva que la maceración tradicional.
- Permite una extracción continua y sostenida, reduciendo el tiempo del proceso.
- Proporciona extractos más concentrados.
- Fácil escalabilidad a nivel industrial.
- Control más preciso de parámetros como flujo, tiempo de contacto y concentración.

Como desventajas de la percolación figura que no es un método apto para drogas mucilaginosas o resinosas que pudieran obstruir el flujo del disolvente; requiere una preparación adecuada de la droga (tamaño de partícula y humectación); puede generar canalización del disolvente si el empacado del material vegetal no es homogéneo y resulta inadecuado para extraer compuestos volátiles con elevados rendimientos, ya que pueden perderse durante el proceso.

3.5.4 Extracción por Soxhlet

El método Soxhlet podría definirse como una forma de lixiviación continua y térmica, donde la muestra vegetal es expuesta repetidamente al disolvente caliente, que tiene una temperatura cercana a la de ebullición gracias al sistema de recirculación. A diferencia de la lixiviación clásica (percolación), que se basa únicamente en el paso del disolvente por gravedad y a temperatura ambiente, el Soxhlet utiliza el calor y la condensación para optimizar la eficiencia extractiva (figura 64).

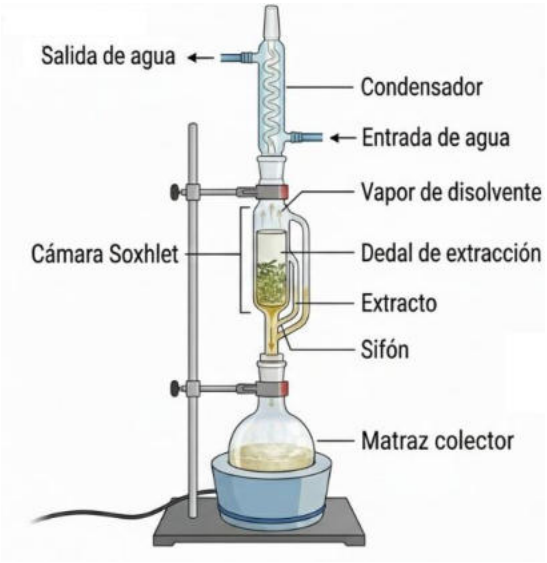


Figura 64. Método de extracción mediante Soxhlet.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

El proceso inicia cuando el disolvente se calienta en un balón, se evapora, asciende por un brazo lateral, se condensa en un refrigerante y gotea sobre la muestra contenida en un cartucho de celulosa. Cuando el líquido alcanza cierto nivel, se descarga a través de un sifón lateral, regresando al balón, pero ahora con los metabolitos extraídos. Este ciclo se repite de forma automática, permitiendo una extracción eficiente con cantidades moderadas de disolvente.

El disolvente más utilizado es el hexano, siendo la opción más utilizada para la obtención de aceites fijos. No obstante, este compuesto figura entre los contaminantes del aire identificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Por esta razón, se han propuesto alternativas como el isopropanol, el etanol e incluso el agua. Sin embargo, estos sustitutos presentan una menor

eficiencia en la extracción, ya que la afinidad con los compuestos lipídicos (aceites o grasas) a extraer es más limitada.

Es un método ventajoso por su alta eficiencia extractiva, sobre todo para compuestos lipídicos y termorresistentes. Al ser un proceso continuo logra un bajo consumo de disolvente, además de que no requiere de tiempos excesivamente prolongados ni de filtración. Una vez que el disolvente se condensa cae sobre la materia prima vegetal en elevado grado de pureza, repitiéndose el ciclo de extracción. De esta manera se garantiza que siempre el disolvente entre en contacto con el material en estado de relativa pureza, logrando una mayor eficiencia de extracción. Dentro de las desventajas resalta el que no es un método apto para compuestos termolábiles, cabe resaltar que no sólo la materia prima vegetal entra en contacto con el disolvente a elevadas temperaturas, sino que una vez que ocurren las sucesivas descargas, el extracto continúa recibiendo calor. De existir metabolitos termolábiles podrían degradarse, formándose artefactos.

3.5.5 Extracción por reflujo

La extracción por reflujo es un proceso que se basa en la aplicación de calor controlado para permitir la extracción de metabolitos especializados presentes en matrices vegetales sólidas, hacia un disolvente apropiado. En este método se pone en contacto la droga vegetal y el disolvente, se calientan hasta alcanzar el punto de ebullición del disolvente, el que se evapora y posteriormente se condensa mediante un refrigerante para retornar de nuevo al recipiente de extracción. Es un método de extracción continuo que permite

mantener una temperatura constante, sin que tenga lugar la pérdida significativa del menstruo, aumentando así la eficiencia del proceso extractivo.



Figura 65. Método de extracción mediante reflujo.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

El principio fisicoquímico que rige esta técnica se fundamenta en el aumento de la solubilidad de los compuestos a temperaturas elevadas, así como en la difusión acelerada de los metabolitos desde la droga vegetal hacia el disolvente.

Las ventajas que se perciben para dicho método guardan relación con la continuidad del proceso, lográndose una mayor eficiencia extractiva (cantidad de sustancia a extraer en el tiempo). Gracias a que es un sistema cerrado, las pérdidas del disolvente por evaporación son mínimas. Adicionalmente, en un proceso relativamente simple, ya que no ocupa equipos altamente sofisticados y puede implementarse en

laboratorios básicos.

En relación con las desventajas, lo que destaca en el método, es similar a lo referido para la extracción por Soxhlet, el riesgo de degradación térmica, para aquellos compuestos que puedan ser sensibles al calor. A diferencia del anterior, este proceso si necesita filtración para separar la matriz extraída de la disolución de metabolitos.

La extracción por reflujo guarda una estrecha relación con la decocción, pues ambos métodos comparten la dependencia del calor como factor extractivo, pero divergen en su capacidad para conservar el disolvente y proteger los principios activos. La decocción, al estar limitada por la temperatura del agua y la evaporación, es más simple pero también más agresiva con los compuestos sensibles al calor. El reflujo, en cambio, optimiza el uso del calor al reciclar continuamente el disolvente, mejorando la eficacia extractiva y permitiendo un mayor control del proceso, aunque requiere equipamiento especializado y puede implicar el uso de disolventes más tóxicos o inflamables.

En consecuencia, mientras que la decocción es más apropiada para contextos tradicionales o cuando se buscan compuestos hidrosolubles y resistentes, la extracción por reflujo representa un método más refinado y eficiente desde el punto de vista fitoquímico, especialmente útil en entornos de investigación, donde se requiere reproducibilidad y mayor control sobre los parámetros de extracción

3.6 Métodos para concentrar extractos vegetales

Una vez obtenidos los extractos mediante técnicas de extracción, en

muchos casos es necesario reducir el volumen del disolvente para aumentar la concentración de los metabolitos extraídos. La concentración es una etapa del proceso que debe ser cuidadosamente ejecutada, ya que puede provocar la degradación de sustancias termolábiles. Los extractos o disoluciones que contienen sustancias estables pueden ser concentradas en equipos que trabajan a presión normal o a vacío, pero la mayoría de los extractos deben ser evaporados a temperaturas bajas en la medida de lo posible y a vacío.

Este proceso tiene gran aplicación en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria, ya que permite estandarizar, estabilizar y formular productos finales a partir del extracto vegetal crudo. Adicionalmente, se logra una mayor estabilidad química de los metabolitos especializados, mayor facilidad de almacenamiento y de transportación. Existen diversos métodos para concentrar extractos, siendo los más empleados: evaporación a presión atmosférica, evaporación al vacío, secado por aspersión y liofilización.

La **evaporación a presión atmosférica** consiste en calentar el extracto en recipientes abiertos para favorecer la evaporación del disolvente, generalmente agua o etanol, mediante calor directo. El aumento de la temperatura incrementa la energía cinética de las moléculas del disolvente, promoviendo su transición a fase gaseosa.

Es un proceso simple y económico, no lleva equipamiento sofisticado y es aplicado para extractos que no contengan compuestos termolábiles. Sin embargo, no puede ser empleado en compuestos sensibles a la degradación térmica o volátiles. Además, se logran bajos

rendimientos cuando se procesan grandes volúmenes de extractos.

La **evaporación al vacío** se refiere a la concentración de extractos vegetales mediante evaporación rotatoria bajo condiciones de vacío. Es una técnica fundamental en fitoquímica para eliminar disolventes de manera eficiente, preservando la integridad de los metabolitos sensibles al calor.

El evaporador rotatorio, conocido como "rotavapor o rotoevaporador", permite la eliminación del disolvente a temperaturas reducidas gracias al uso de vacío. Tales condiciones logran que se disminuya el punto de ebullición del disolvente, lo que es crucial para conservar compuestos termolábiles. La rotación del matraz genera una película delgada del extracto, aumentando la superficie de evaporación y mejorando la transferencia de calor. El disolvente evaporado se condensa y se recoge, dejando un extracto concentrado.

Resulta muy ventajoso ya que la combinación de vacío y rotación reduce el consumo energético. Además, el sistema cerrado permite la recolección y reutilización de disolventes, disminuyendo costos y residuos.

Tiene la desventaja de que requiere equipamiento especializados y la capacidad del matraz limita la cantidad de extracto que puede procesarse en una sola operación. Algunos extractos pueden generar espuma durante la evaporación, lo que puede dificultar el proceso y requerir ajustes adicionales. Esto suele presentarse cuando hay presencia de saponinas o de ácidos orgánicos. En la conservación de extractos vegetales, los métodos de secado como la liofilización y el

secado por aspersión son esenciales para obtener productos estables y de alta calidad.

La liofilización, que implica la sublimación del agua tras la congelación del extracto, permite preservar la estructura, composición y actividad biológica de los compuestos sensibles al calor, resultando en productos con excelente rehidratación y prolongada vida útil.

El secado por aspersión convierte el extracto líquido en un polvo seco mediante la pulverización en una corriente de aire caliente, ofreciendo una técnica rápida y adecuada para la producción a gran escala, aunque puede ser menos eficaz que la liofilización en la conservación de compuestos termosensibles.

La elección entre ambos métodos debe basarse en las características específicas del extracto y los objetivos del proceso de conservación. En capítulos posteriores se abordarán ambos procesos por su repercusión en la industria farmacéutica y alimentaria.

3.7 Tipos de extractos

Las monografías internacionales, como las incluidas en la Farmacopea Europea, la Farmacopea de los Estados Unidos (USP), la Farmacopea Japonesa y otras farmacopeas oficiales, establecen clasificaciones referentes a los extractos vegetales. A continuación, se describen los principales tipos de extractos reconocidos:

- **Tinturas**

Son preparaciones líquidas obtenidas por maceración o percolación de

drogas vegetales secas con etanol o mezclas hidroalcohólicas. Generalmente, la relación droga:disolvente es de 1:5 (20 %) o 1:10 (10 %). Para drogas que contienen compuestos bioactivos muy potentes se preparan tinturas al 10%. Las tinturas pueden ser simples (no ajustadas en contenido de constituyentes activos) o estandarizadas, según lo exijan las monografías. Se utilizan principalmente para administrar vía oral o tópica.

- **Extractos líquidos o fluidos**

Son preparaciones fluidas obtenidas a partir de drogas vegetales secas mediante el empleo de disolventes apropiados (agua, etanol, mezcla hidroalcohólica, entre otros). Generalmente, se establece la relación 1:1, la que establece que por cada parte de droga seca se debe obtener una parte de extracto líquido (1:1). Estos extractos pueden estar normalizados o ajustados para garantizar la concentración constante de constituyentes activos.

- **Extractos blandos**

Son productos semisólidos obtenidos por evaporación parcial del disolvente utilizado en la extracción. Tienen consistencia viscosa o pastosa y presentan entre 20 % y 30 % de disolvente residual, es decir se obtienen evaporando parcialmente el disolvente de extracción dejando entre un 20 % y un 30 % de disolvente residual. Son empleados principalmente en la fabricación de medicamentos, como pomadas, supositorios o preparados semisólidos.

- **Extractos secos**

Son productos sólidos obtenidos tras la eliminación casi completa del disolvente de extracción. Contienen generalmente menos del 5 % de humedad residual. Se presentan en forma de polvo o gránulos y son ampliamente utilizados en la elaboración de comprimidos, cápsulas y otros medicamentos sólidos. Al igual que los extractos líquidos, pueden ser normalizados o estandarizados.

Estas clasificaciones permiten una estandarización internacional que facilita el control de calidad, la reproducibilidad de los efectos farmacológicos y la seguridad en el uso clínico de los extractos vegetales. Además, orientan a la industria farmacéutica y a los laboratorios de control de calidad en la selección de los extractos más apropiados para cada aplicación terapéutica.

3.8 Control de calidad de los extractos

La calidad de los extractos vegetales debe evaluarse mediante una serie de ensayos fisicoquímicos, organolépticos y microbiológicos, establecidos por organismos regulatorios y farmacopeas internacionales. Estos ensayos garantizan que los extractos cumplan con criterios mínimos de identidad, pureza, potencia y seguridad, necesarios para su uso en productos medicinales o suplementos.

3.8.1 Ensayos organolépticos

Los parámetros básicos incluyen características organolépticas (color, olor, sabor y consistencia. Son parámetros cualitativos útiles para la verificación preliminar de identidad.

3.8.2 Ensayos fisicoquímicos

Índice de refracción (IR): Es una medida de cuánto se desvía la luz al pasar a través de una sustancia. Depende de la composición química del extracto y su concentración. El IR puede servir como parámetro característico de extractos líquidos (tinturas o extractos fluidos) estandarizados. Cambios en su valor pueden reflejar alteraciones en la composición o adulteraciones, dilución, evaporación de disolventes o incluso la presencia de impurezas. La variación en el tiempo (estudios de estabilidad) puede revelar cambios físico-químicos en el extracto. A modo de ejemplo, la Farmacopea europea incluye el índice de refracción como parámetro obligatorio para aceites esenciales y extractos oleosos.

Rotación óptica específica (ROE): Es la capacidad de una sustancia ópticamente activa para desviar el plano de luz polarizada. Depende de la presencia de compuestos quirales (como alcaloides, terpenos, etc.). El valor de ROE es específico de cada sustancia ópticamente activa; por lo tanto, permite verificar la presencia de principios activos quirales característicos. Un valor alterado puede indicar mezcla con isómeros ópticos no deseados o degradación química (como oxidación de alcaloides). Por ejemplo, en la Farmacopea de los Estados Unidos (USP, por sus siglas en inglés), la rotación óptica es obligatoria para aceites esenciales como el de *Mentha piperita*, donde los valores fuera del rango pueden indicar fraude o mala calidad.

pH: Es una medida de la acidez o alcalinidad de una disolución. En extractos vegetales acuosos o hidroalcohólicos, el pH refleja la presencia de ácidos orgánicos, sales minerales y otras sustancias solubles. Como criterio de calidad es un indicador de estabilidad

química: Muchas sustancias bioactivas son sensibles al pH (por ejemplo, flavonoides, taninos, alcaloides); por lo tanto, el pH es clave para su conservación.

En la monografía de *Chamomilla recutita* (manzanilla), la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2007) señala que el pH de los extractos acuosos o hidroalcohólicos debe mantenerse dentro de un rango controlado, usualmente entre 5.0 y 7.0, como parte del aseguramiento de calidad. Esto se debe a que flavonoides, como apigenina-7-glucósido, luteolina y quercetina, principales responsables de la actividad antiinflamatoria y espasmolítica de la manzanilla son inestables en condiciones de pH muy ácido o muy alcalino. A pH bajos (menores a 4), se favorece la hidrólisis del glucósido, lo que puede disminuir la biodisponibilidad del compuesto activo. Además, un pH fuera de rango podría alterar la estabilidad general del extracto, favorecer el crecimiento microbiano o causar irritación en aplicaciones tópicas u orales.

Densidad o peso específico: La densidad se define como la masa por unidad de volumen de una sustancia (usualmente expresada en g/mL a una temperatura específica, como 20 °C o 25 °C). Es un ensayo que se le realiza a los extractos líquidos (extractos fluidos o tinturas).

La densidad es una propiedad física característica de cada extracto, influida por el tipo y concentración de metabolitos presentes, así como por el tipo de disolvente utilizado. Un valor fuera del rango especificado en una monografía puede indicar alteraciones en la composición del extracto, adulteración o dilución. En extractos

líquidos, la densidad se correlaciona con el contenido de sólidos totales y con la relación extracto/disolvente, por lo que su medición contribuye al aseguramiento de la potencia y homogeneidad del lote. La variación en la densidad durante estudios de estabilidad puede revelar evaporación del disolvente o precipitación de compuestos químicos, lo cual impacta directamente la calidad del producto.

En la Farmacopea Europea y en la USP, se incluye la densidad como parámetro obligatorio en varias monografías de extractos líquidos, por ejemplo: para el extracto fluido de *Ginkgo biloba*, se exige un rango de densidad específico entre 0,950 – 1,050 g/mL) como criterio para validar la calidad del lote.

Sólidos totales o residuos secos: es la cantidad de materia no volátil que permanece después de eliminar completamente el disolvente del extracto (por evaporación). Se expresa generalmente como un porcentaje en peso/volumen (% p/v). Dicho residuo seco representa la fracción total del extracto, que incluye principios activos, compuestos acompañantes y otros metabolitos especializados. Por lo tanto, un contenido bajo puede indicar dilución excesiva o una extracción incompleta de los compuestos de interés. Valores por debajo o por encima del rango especificado en la monografía, pueden evidenciar errores durante la extracción, tales como errores en la relación droga/disolvente, en el tiempo de extracción, o en la etapa de concentración. En extractos estandarizados, el residuo seco debe mantenerse constante para garantizar que cada lote tenga una concentración terapéutica reproducible. Esto es esencial para asegurar eficacia y seguridad clínica.

En la monografía de extracto fluido de *Valeriana officinalis* (Farmacopea europea), se establece que el contenido mínimo de sólidos totales debe ser del 25% (p/p). Si un extracto presenta un valor inferior, esto podría indicar una extracción insuficiente de ácidos valeriánicos, sesquiterpenos y otros compuestos activos responsables del efecto sedante. Por tanto, dicho extracto no cumpliría los criterios de calidad, ni podría garantizar la actividad terapéutica esperada.

Determinación del contenido de etanol: El contenido de etanol es un parámetro que debe coincidir con la composición especificada en la fórmula del producto y/o en la monografía oficial. El etanol actúa como disolvente selectivo en la extracción de metabolitos: En bajas concentraciones (25–40%), se favorece la extracción de compuestos hidrofílicos o de alta polaridad (azúcares, glicósidos). En altas concentraciones (70–90%), podrían además extraerse compuestos como los aceites esenciales, alcaloides, flavonoides, entre otros). En otras palabras, el contenido final de etanol impacta directamente en la calidad y composición química del extracto.

En la monografía de tintura de *Calendula officinalis*, según la Farmacopea europea, se establece que el contenido de etanol debe ser de entre 45% y 55% v/v, según el tipo de extracto. En tal sentido se asegura la autenticidad y potencia del producto y se preserva la estabilidad microbiológica y química. Aunque a menudo los ensayos anteriores se consideran "simples", su interpretación cuidadosa en conjunto con métodos cromatográficos contribuye a una evaluación integral de la calidad del extracto y consecuentemente del fitomedicamento.

3.8.3 Ensayos para compuestos activos (tamizaje fitoquímico)

El tamizaje fitoquímico (*screening* fitoquímico preliminar) consiste en la aplicación de ensayos químicos cualitativos para sugerir la presencia de metabolitos especializados en extractos vegetales crudos. Esta técnica se basa en la reacción de grupos funcionales característicos de alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas, terpenoides, antraquinonas, entre otros, con reactivos específicos**,** que generan cambios de color, formación de complejos o precipitados.

Algunos investigadores consideran que una selección inicial de las plantas a investigar debe hacerse sobre la base de los fitoconstituyentes presentes en las plantas, los cuales están asociados a la actividad biológica de sus extractos. No obstante, existen criterios donde se les da mayor peso al tamizaje farmacológico. Sin embargo, los factores económicos asociados a este tipo de ensayo, fuerzan al investigador a perseguir una fitoquímica preliminar.

Los resultados obtenidos mediante el tamizaje fitoquímico deben considerarse únicamente como una orientación preliminar, por lo que su correcta interpretación requiere una correlación estrecha con los hallazgos del tamizaje farmacológico. Por ejemplo, si una planta muestra actividad sobre el sistema nervioso central durante las pruebas farmacológicas y, a su vez, se detecta la presencia de alcaloides en el análisis fitoquímico, es razonable suponer que dicha actividad podría atribuirse a esta clase de compuestos. Del mismo modo, cuando se observa una acción antiinflamatoria acompañada de la detección de flavonoides, estos resultados justifican el aislamiento de dichos

metabolitos para someterlos a estudios más específicos. Las antraquinonas, por su parte, pueden asociarse con efectos catárticos. En contraste, la identificación de glucósidos cianogénicos durante la marcha fitoquímica puede llevar al descarte del material vegetal debido a su elevada toxicidad.

Para que el tamizaje fitoquímico sea efectivo, la metodología empleada debe cumplir con ciertos requisitos esenciales, entre ellos: simplicidad, rapidez, necesidad mínima de equipamiento, especificidad para el tipo de compuesto a analizar, capacidad para detectar concentraciones mínimas del metabolito en estudio. Aunque la mayoría de los protocolos cumplen adecuadamente con los primeros cuatro criterios, pocos están diseñados para satisfacer los dos últimos.

Adicionalmente, otros aspectos fundamentales incluyen una clara definición de los criterios de positividad o negatividad de los resultados, así como la elección adecuada del disolvente de extracción, el cual puede influir significativamente en los resultados obtenidos. No es posible establecer reglas universales sobre la solubilidad, ya que los extractos crudos suelen contener compuestos de naturaleza desconocida que pueden alterar el comportamiento esperado. Un caso ilustrativo es el de las saponinas, que debido a sus propiedades tensoactivas pueden facilitar la solubilización en agua de ciertos compuestos que normalmente serían insolubles en ausencia de estas sustancias.

Para evitar interpretaciones erróneas relacionadas con fenómenos de solubilidad inusuales, se recomienda utilizar una serie de disolventes

de polaridad creciente, con el fin de agotar el contenido del material vegetal y evaluar de forma más precisa su composición (figura 66). La literatura especializada describe diversos esquemas de tamizaje fitoquímico, muchos de los cuales emplean distintos disolventes de extracción adaptados a las características de los metabolitos objetivo.

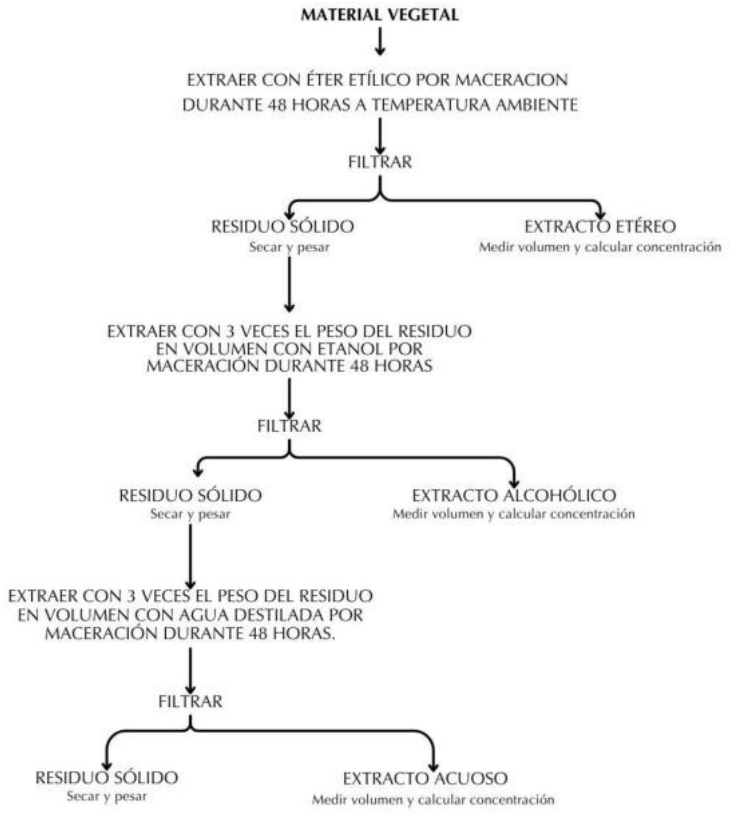


Figura 66. Diagrama general para desarrollar el tamizaje fitoquímico de una droga vegetal sometida a un fraccionamiento con disolventes de polaridad creciente.

Fuente: (Tomado de Miranda y Cuellar, 2000).

En las figuras de la 66-67 se presentan los ensayos que se suelen

realizar a los extractos etéreos, alcohólicos (etanólicos, metanólicos o hidroalcohólicos) y acuosos.

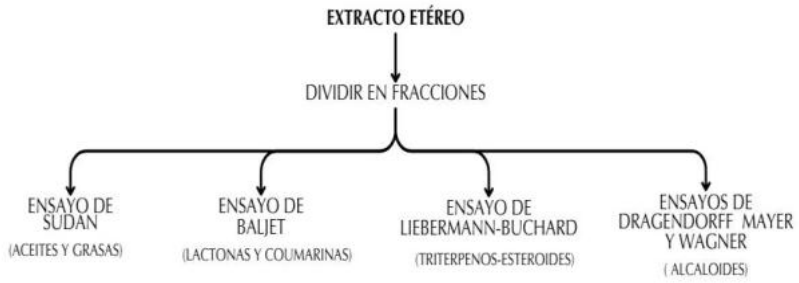


Figura 67. Reacciones químicas a realizar en el extracto de etéreo.

Fuente: (Tomado de Miranda y Cuellar, 2000).

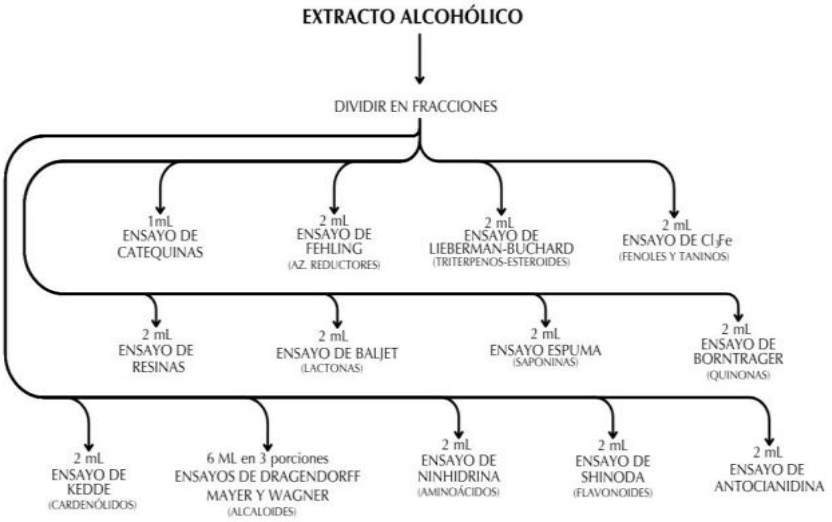


Figura 68. Reacciones químicas a realizar en el extracto alcohólico.

Fuente: (Tomado de Miranda y Cuellar, 2000).

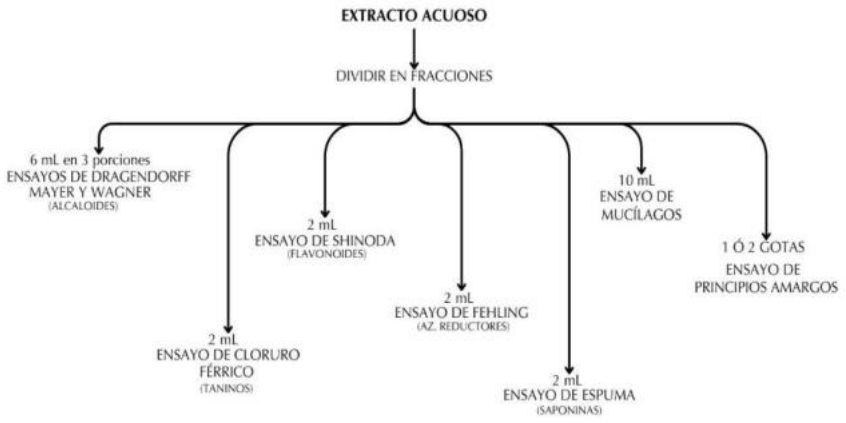


Figura 69. Reacciones químicas a realizar en el extracto acuoso.

Los resultados positivos suelen ser evidentes; sin embargo, es importante tener en cuenta la posibilidad de falsos positivos, como ocurre en algunos ensayos para alcaloides donde la presencia de proteínas o de grupos carbonilo α,β-insaturados puede interferir. Por ello, es crucial contar con una revisión bibliográfica exhaustiva y con conocimientos sobre relaciones taxonómicas que permitan anticipar la posibilidad de tales interferencias.

Por otro lado, los resultados negativos deben analizarse con mayor cautela, ya que pueden deberse tanto a la verdadera ausencia del metabolito como a limitaciones metodológicas. Entre los factores que pueden influir se encuentran variables extrínsecas e intrínsecas como: errores en la recolección, secado o conservación del material vegetal, elección inadecuada de la parte de la planta, baja concentración de metabolitos, escasa solubilidad en el disolvente empleado, interferencia de otros compuestos, sensibilidad insuficiente del reactivo utilizado o deficiencias en la metodología aplicada.

En resumen, el tamizaje fitoquímico proporciona una visión general de la composición química de una planta, pero sus resultados deben interpretarse con prudencia y nunca considerarse definitivos por sí solos.

3.9 Bioautografía en cromatografía en capa delgada (CCD) aplicada al tamizaje de metabolitos bioactivos

En esta misma línea de investigación, la CCD es una técnica muy valiosa que complementa el tamizaje o *screening* fitoquímico de extractos vegetales. La técnica cromatográfica permite analizar múltiples muestras simultáneamente en la misma placa. Esto significa que varios extractos vegetales pueden ser comparados de una vez, acelerando el proceso de screening preliminar. Dado que las fases móviles y estacionarias pueden ajustarse, la técnica es capaz de separar una amplia variedad de compuestos de distintas polaridades, por lo que los compuestos o mezclas de estos separados por zonas, pueden visualizarse mediante las diferentes condiciones de revelado físico o químico; ayudando a generar "huellas fitoquímicas" (*fingerprints*) que ayudan a identificar la presencia de ciertos metabolitos y a comparar con estándares de referencia.

¿Qué se entiende por bioautografía?

La bioautografía es un procedimiento analítico que integra la separación cromatográfica de los constituyentes de una muestra mediante CCD, con la aplicación subsecuente de un bioensayo sobre la misma matriz cromatográfica, con el propósito de detectar y localizar actividad biológica asociada a los metabolitos separados.

Mediante la interacción directa entre los compuestos previamente resueltos y un sistema biológico específico (microorganismos, enzimas, radicales libres, células o sistemas reporteros), la bioautografía permite visualizar, en forma de zonas reactivas o inhibidas, aquellas sustancias que exhiben actividad funcional, constituyéndose así en una herramienta esencial para el tamizaje bioactivo, la caracterización preliminar de metabolitos y el fraccionamiento bioguiado en estudios de productos naturales.

Los métodos más frecuentes de bioautografía descritos por Urbain y Simões-Pires incluyen:

1. Ensayos antimicrobianos: en estos las placas de CCD se impregnan o incuban con microorganismos (bacterias o levaduras) en un medio adecuado. Los metabolitos con actividad inhibidora generan zonas de inhibición visibles, generalmente mediante tinción posterior con colorantes vitales o reactivos de crecimiento. Este procedimiento permite evaluar la actividad antibacteriana o antifúngica de múltiples extractos simultáneamente, facilitando la selección de fracciones para análisis detallado.

2. Ensayos enzimáticos: La inhibición enzimática se detecta aplicando la enzima sobre la placa desarrollada y utilizando sustratos cromogénicos o fluorogénicos. Las zonas donde la reacción se ve bloqueada indican la presencia de inhibidores de enzimas específicas (por ejemplo, acetilcolinesterasa, tirosinasa, lipasas), lo que es de interés en estudios farmacológicos y de

tamizaje de metabolitos bioactivos.

3. Ensayos antioxidantes: Se emplean radicales libres estables, como DPPH, sobre las placas desarrolladas. Los compuestos antioxidantes reducen el radical, generando zonas visibles por cambio de color, permitiendo una rápida identificación cualitativa de metabolitos con capacidad de neutralización de radicales libres.

4. Ensayos de toxicidad y bioactividad celular: Se utilizan modelos celulares o bacterias bioluminiscentes sobre la placa para evaluar efectos citotóxicos o moduladores. La reducción de la señal lumínica o el patrón de crecimiento revela la presencia de compuestos tóxicos o moduladores de vías metabólicas.

5. Ensayos hormonales y de señalización: Por ejemplo, el *Yeast Estrogen Screen* (YES) acoplado a CCD permite detectar fitoestrógenos en extractos vegetales. Es un bioensayo basado en levaduras genéticamente modificadas que tienen dos características clave, expresan receptores estrogénicos humanos (ERα o ERβ) y contienen un gen reportero (generalmente, β-galactosidasa, luciferasa, o GFP), que se activa *solo* cuando el receptor estrogénico ha sido activado. Esto significa que si un compuesto se une al receptor estrogénico dentro de la levadura, la célula produce una señal (color, luz o fluorescencia). El proceso se realiza aplicando una suspensión de levaduras YES sobre la placa desarrollada, las que se mantienen vivas y en contacto con los compuestos separados. **S**i un compuesto tiene

actividad estrogénica se une al receptor humano expresado en la levadura y produce *in situ* una señal visible en la placa. Por ejemplo formación de un color azul por acción de β-galactosidasa, emisión de luz (si usa luciferasa) y fluorescencia (si usa GFP). El ensayo tiene algunas limitaciones, ya que pudiera no detectar compuestos en concentraciones muy bajas, factores como la saturación de la cámara, temperatura, humedad o el grosor de la capa de sílice, pueden afectar los valores de Rf entre experimentos.

En conclusión, integrar la cromatografía en capa delgada como parte del tamizaje fitoquímico ofrece una combinación muy favorable de coste bajo, rapidez, versatilidad y facilidad de implementación, lo que la convierte en una herramienta ideal para la etapa inicial de exploración de metabolitos en extractos vegetales. Además, su capacidad de combinarse con bioensayos, amplía su utilidad no solo para detectar que hay, sino también para identificar compuestos con actividad biológica. Por estas razones, la CCD es un método estratégico y complementario, sobre todo cuando los recursos son limitados o se está explorando múltiples especies o fracciones antes de pasar a técnicas analíticas más costosas.

3.10 Elementos de cierre del capítulo

1. ¿Por qué la extracción se considera una operación difusional dentro de las operaciones unitarias?

Porque depende del movimiento de moléculas desde el interior de la matriz vegetal hacia el disolvente, lo cual ocurre por fenómenos de

difusión regidos por gradientes de concentración y expresados mediante la ley de Fick.

2. ¿Qué factores influyen en el proceso de extracción sólido (materia vegetal) / disolvente?

Influyen la polaridad del disolvente y del metabolito, el tamaño de partícula de la droga vegetal, la relación droga/disolvente, la temperatura, el tiempo de extracción, la agitación, la viscosidad, el pH del medio, la humectación previa de la materia prima y la calidad del material vegetal.

3. ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de la maceración frente a otros métodos tradicionales?

La maceración es un método simple, económico y no requiere equipos especializados. Su principal limitación es que suele ser más, sobre todo si es estática y puede obtener rendimientos menores que métodos como soxhlet o percolación, que optimizan el contacto entre droga y disolvente. Cabe destacar que es ideal para iniciar estudios fitoquímicos, cuando se desconoce la composición química de la droga vegetal, ya que no ocupa temperatura.

4. ¿En qué se diferencia el método de Soxhlet de la extracción por reflujo?

Soxhlet es un sistema cíclico donde el disolvente puro se renueva constantemente sobre la muestra, mientras que en el reflujo el disolvente recircula en contacto continuo con la matriz vegetal sin pasar por un ciclo de sifón.

5. ¿Qué características hacen del método soxhlet un procedimiento eficiente para la extracción con disolventes?

El soxhlet permite que el disolvente se renueve continuamente sobre la droga vegetal, asegurando una extracción exhaustiva sin necesidad de reemplazar manualmente el disolvente. Además, mantiene una temperatura elevada y constante durante el ciclo extractivo.

6. ¿Qué relación existe entre la polaridad del disolvente y el tipo de metabolito extraído?

Los disolventes polares extraen compuestos polares (glicósidos, taninos), mientras que los apolares extraen compuestos no polares (terpenos, grasas), cumpliéndose la regla “lo similar disuelve lo similar”.

7. ¿Qué información aporta el índice de refracción en el control de calidad de un extracto vegetal?

Permite evaluar la composición química y detectar alteraciones como dilución, evaporación del disolvente, adulteración o cambios durante el almacenamiento.

8. ¿Por qué el uso de vacío en el rotavapor es fundamental para conservar compuestos termolábiles?

El vacío reduce el punto de ebullición del disolvente, permitiendo su eliminación a temperaturas más bajas. Esto evita la degradación de metabolitos sensibles al calor y mejora la eficiencia energética del proceso.

9. ¿Cómo se clasifican los extractos vegetales según farmacopeas?

Las farmacopeas clasifican los extractos en:

- Tinturas (relación droga/disolvente 1:5 o 1:10),
- Extractos líquidos o fluidos (1:1),
- Extractos blandos (20–30 % de disolvente residual),
- Extractos secos (menos del 5 % de humedad).

10. ¿Qué parámetros fisicoquímicos son esenciales para evaluar la calidad de un extracto?

Sólidos totales o residuo seco, contenido de etanol, densidad, pH, y otros parámetros definidos en monografías oficiales. Aseguran autenticidad, potencia y reproducibilidad terapéutica.

11. ¿Qué objetivo tiene el tamizaje fitoquímico preliminar? ¿Cómo contribuye a relacionar composición química y actividad biológica?

El tamizaje detecta cualitativamente la presencia de grupos de metabolitos (alcaloides, flavonoides, taninos, etc.). Su correlación con la actividad farmacológica permite inferir qué compuestos podrían ser responsables de la acción observada y orienta estudios posteriores de aislamiento.

12. ¿Qué aporta la bioautografía acoplada a CCD en comparación

con la CCD convencional?

Permite no solo separar los metabolitos, sino también localizar directamente sobre la placa las zonas donde existe actividad biológica (antioxidante, antimicrobiana, enzimática, etc.), haciendo el análisis más funcional.

CAPÍTULO IV

4 EXTRACCIÓN POR MÉTODOS NO TRADICIONALES

En las últimas décadas, el desarrollo de métodos de extracción no tradicionales ha cobrado una importancia creciente en áreas como la fitoquímica, la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética, impulsado por la necesidad de optimizar la recuperación de compuestos bioactivos y reducir las limitaciones inherentes a las técnicas convencionales. Los métodos clásicos, como la maceración, el reflujo o la extracción Soxhlet, si bien son ampliamente utilizados y reproducibles, suelen implicar, tiempos prolongados de operación, elevado consumo de disolventes y, en algunos casos, riesgo de degradación térmica de metabolitos sensibles. Frente a este escenario, las tecnologías emergentes se enmarcan dentro de los principios de la "Química Verde" y de la intensificación de procesos, priorizando la eficiencia, la sostenibilidad y la calidad de los extractos obtenidos.

Entre las principales estrategias no tradicionales se incluyen la extracción asistida por ultrasonido (EAU), la extracción asistida por microondas (EAM), la extracción con fluidos supercríticos (EFS), la turboextracción, la extracción asistida por enzimas, la extracción mediante descargas eléctricas de alto voltaje, entre otras. Aunque cada una de estas técnicas se basa en principios físicos o fisicoquímicos diferentes, todas comparten el objetivo común de facilitar la disrupción de la estructura celular vegetal y mejorar la transferencia de masa sólido–líquido, permitiendo una liberación más eficiente de los metabolitos de interés.

De manera general, estas tecnologías destacan por su capacidad para reducir significativamente los tiempos de extracción, disminuir el volumen de disolvente requerido y, en muchos casos, operar bajo condiciones más nobles que las técnicas tradicionales, lo que favorece la preservación de compuestos termolábiles y fotosensibles. Asimismo, su aplicación ha demostrado ser especialmente eficaz para la obtención de metabolitos especializados como polifenoles, flavonoides, alcaloides, terpenos y otros compuestos con actividad biológica relevante. En este contexto, la selección del método de extracción no tradicional depende de factores como la naturaleza de la matriz vegetal, el tipo de compuestos objetivo, la escala del proceso y las restricciones técnicas o económicas.

No obstante, a pesar de sus ventajas, estos métodos también presentan limitaciones que deben ser consideradas. Algunas tecnologías requieren equipamiento especializado o inversiones iniciales elevadas, mientras que otras demandan un control preciso de los parámetros operativos para evitar efectos indeseados, como la degradación oxidativa o la baja reproducibilidad. Además, la transferencia de estas metodologías desde el laboratorio hacia la escala industrial continúa siendo un desafío en ciertos casos, lo que subraya la necesidad de estudios de optimización y evaluación económica.

En conjunto, los métodos de extracción no tradicionales representan una evolución significativa en el aprovechamiento de recursos vegetales, al integrar eficiencia técnica y criterios de sostenibilidad. Su desarrollo y aplicación contribuyen a fortalecer enfoques más responsables y competitivos en la obtención de extractos naturales, consolidando su

papel como herramientas clave en la investigación y en los procesos productivos modernos.

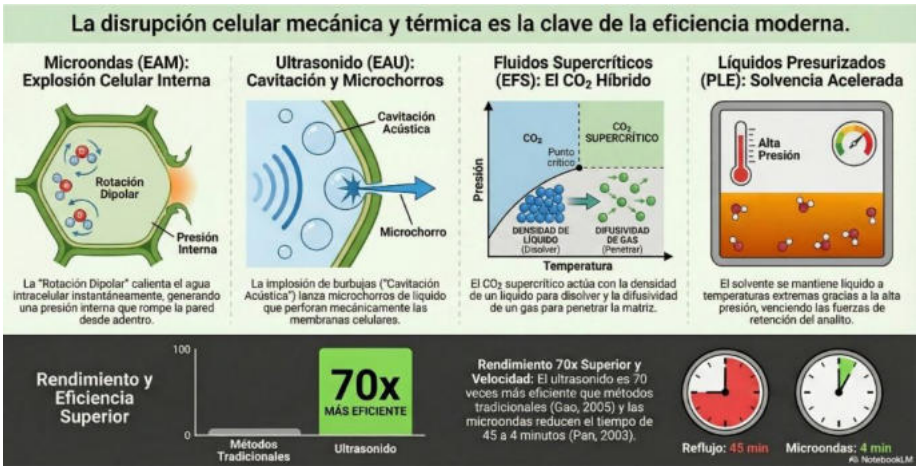


Figura 70. La disrupción celular mecánica y térmica es la clave de la eficiencia moderna.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

Las extracciones no tradicionales, frecuentemente denominadas tecnologías de extracción verde o métodos avanzados, constituyen un conjunto de técnicas emergentes diseñadas para la separación de compuestos bioactivos desde matrices vegetales mediante mecanismos que superan la simple difusión pasiva. A diferencia de los procedimientos clásicos, estas metodologías no dependen exclusivamente de la solubilidad y el tiempo, sino que incorporan el uso de energía auxiliar como ondas electromagnéticas, sonoras o campos eléctricos y la manipulación termodinámica de fluidos. Entre las estrategias más destacadas se encuentran la Extracción Asistida por Microondas (EAM), el Ultrasonido (EAU), los Fluidos Supercríticos (EFS, típicamente CO_2), el uso de Disolventes Eutécticos Profundos

Naturales (NADES), entre otros.

El surgimiento de estas tecnologías responde a la necesidad de superar las limitaciones intrínsecas de los métodos convencionales como la maceración, la percolación y el Soxhlet. Históricamente, las técnicas tradicionales han sido cuestionadas por ser procesos altamente consumidores de tiempo y por requerir grandes volúmenes de disolventes orgánicos, los cuales en muchas ocasiones suelen ser tóxicos, volátiles y contaminantes. Además, la exposición prolongada a altas temperaturas en algunos de estos métodos clásicos, conlleva frecuentemente a la degradación térmica de moléculas sensibles, reduciendo la calidad biológica del extracto final. Por tanto, la búsqueda de la sostenibilidad industrial y la eficiencia operativa impulsó el desarrollo de estas alternativas "verdes".

El fundamento científico de los métodos modernos reside en la intensificación del proceso mediante la acción física directa sobre el medio y la modulación de las propiedades del disolvente. En términos de intensificación energética, técnicas como el ultrasonido generan cavitación acústica, provocando implosiones microscópicas que rompen las paredes celulares, mientras que las microondas calientan selectivamente el agua intracelular, incrementando la presión interna hasta causar la ruptura del tejido. Ambos mecanismos reducen apreciablemente la resistencia difusiva, permitiendo una liberación casi inmediata de los metabolitos.

Paralelamente, el fundamento también abarca la modificación del estado del disolvente para mejorar su capacidad extractiva. En la

extracción con fluidos supercríticos, se ajustan la presión y temperatura para que el CO_2 adquiera la densidad de un líquido y la difusividad de un gas, logrando una penetración y solvatación superiores. De igual forma, el uso de agua subcrítica o disolventes presurizados permite alterar la constante dieléctrica del agua, dotándola de características similares a solventes orgánicos como el etanol.

En el contexto de la Química Verde, el desarrollo de procesos de extracción no tradicionales ha impulsado la búsqueda de disolventes alternativos que permitan reducir el impacto ambiental y los riesgos asociados al uso de solventes orgánicos convencionales. Diversos estudios comparativos sobre tecnologías extractivas para matrices vegetales, destacan la creciente adopción de medios considerados sostenibles, entre los que se incluyen, además del CO_2, los líquidos iónicos, los disolventes eutécticos profundos y las ciclodextrinas. Estos sistemas permiten ajustar la polaridad del medio extractivo, mejorar la solubilidad de metabolitos bioactivos y operar bajo condiciones más seguras y ambientalmente responsables. Basados en los principios de la "Química Verde", los solventes verdes deben cumplir con los siguientes criterios: disponibilidad, precio competitivo, reciclabilidad, alta calidad, fácil obtención, no tóxicos, biodegradables, altamente eficientes, térmica y químicamente estables, no inflamables, fácil almacenamiento y renovables.

Los DES y los líquidos iónicos naturales han recibido especial atención debido a su amplio rango de solubilidad y su eficiencia para extraer compuestos polares y semipolares, lo que permite obtener extractos con perfiles fitoquímicos más ricos y completos, al mismo

tiempo que se alinea con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética promovidos por la Química Verde. Las ciclodextrinas han adquirido un interés particular como agentes de extracción y solubilización de carácter verde. Estos oligosacáridos cíclicos, derivados del almidón, poseen una cavidad hidrofóbica capaz de formar complejos de inclusión con compuestos poco solubles en agua, lo que facilita su transferencia desde la matriz vegetal al disolvente. Este mecanismo resulta especialmente relevante para la extracción de metabolitos hidrofóbicos o semipolares, permitiendo reducir o incluso eliminar el uso de disolventes orgánicos y favoreciendo la obtención de extractos más estables y representativos del perfil fitoquímico original.

La adopción de estos disolventes verdes alternativos en procesos de extracción, combinada con tecnologías no tradicionales como extracción asistida por microondas, ultrasonido o fluidos supercríticos, ofrece un enfoque integrado para maximizar el rendimiento de metabolitos vegetales valiosos, reducir el uso de sustancias peligrosas y promover prácticas más seguras y respetuosas con el ambiente en aplicaciones industriales, farmacéuticas y alimentarias.

4.1 Extracción asistida por microondas (EAM)

La aplicación de energía de microondas en procesos químicos representa uno de los avances más significativos en la ingeniería de separación del último siglo. Aunque la tecnología de microondas se consolidó durante la Segunda Guerra Mundial impulsada por el desarrollo del radar y magnetrones de alta potencia, su transición hacia

aplicaciones civiles y químicas fue gradual. Inicialmente popularizada en el ámbito doméstico para el calentamiento de alimentos, la tecnología encontró su camino hacia la química analítica y de procesos a finales de la década de 1980. Hoy en día, la Extracción Asistida por Microondas (EAM) se define no solo como una técnica de calentamiento, sino como un método de intensificación de procesos que busca superar las barreras cinéticas de la extracción sólido-líquido convencional.

Las microondas son radiaciones electromagnéticas no ionizantes situadas en el espectro entre los rayos infrarrojos y las ondas de radio, con un rango de frecuencia de 0,3 a 300 GHz. Para evitar interferencias con las telecomunicaciones, los equipos industriales y de laboratorio están estandarizados internacionalmente (normas ISM) para operar casi exclusivamente a una frecuencia de 2,45 GHz (con una longitud de onda aproximada de 12,2 cm). A esta frecuencia, la energía del fotón es demasiado baja para romper enlaces químicos covalentes (como C-C o C-H), lo que significa que las microondas no inducen cambios químicos directos en la estructura molecular de los analitos, garantizando su integridad química, una ventaja crítica frente a la radiación ionizante.

4.2 Principios físico-químicos: Mecanismos de calentamiento

A diferencia de los métodos de extracción tradicionales (Soxhlet, decocción) que dependen de la transferencia de calor por conducción y convección desde una fuente externa hacia el interior de la muestra, la EAM se fundamenta en el calentamiento dieléctrico. Este fenómeno permite la conversión directa de energía electromagnética en energía

cinética (calor) dentro del material. Este proceso ocurre a través de dos mecanismos físicos simultáneos:

Rotación dipolar: Es el mecanismo predominante en la extracción de productos naturales. Las moléculas polares presentes en el disolvente y en la matriz vegetal (principalmente agua) poseen un momento dipolar eléctrico permanente. Al someterse a un campo eléctrico alterno que oscila 2,45 x 10^9 veces por segundo, estos dipolos intentan reorientarse continuamente para alinearse con el campo. Debido a la alta frecuencia, las moléculas no logran alinearse perfectamente y el desfase provoca una intensa fricción molecular y colisiones, disipando la energía en forma de calor volumétrico instantáneo.

Conducción iónica: Si el medio contiene iones disueltos (sales, ácidos), el campo eléctrico induce una migración oscilatoria de estos iones (corriente iónica). La resistencia que ofrece el medio al flujo de estos iones genera calor mediante el efecto Joule.

La sinergia de estos mecanismos resulta en un calentamiento que se genera desde el interior del material hacia el exterior ("calentamiento volumétrico"), invirtiendo el perfil de temperatura convencional. Esto es crucial para la extracción, el calentamiento interno rápido provoca una vaporización súbita del agua constitutiva dentro de las células vegetales.

4.3 Mecanismo de acción celular

El fundamento de la alta eficiencia de la EAM radica en su efecto sobre la microestructura biológica. En una extracción tradicional, el

disolvente debe permeabilizar lentamente la pared celular para disolver los solutos y luego difundirse hacia el exterior (difusión pasiva).

En la EAM, el agua presente dentro de las células vegetales absorbe selectivamente la energía de las microondas y se sobrecalienta rápidamente, incluso por encima de su punto de ebullición normal, debido a la presión intracelular. Este incremento drástico de presión interna empuja las paredes celulares y las membranas desde adentro hacia afuera. El resultado es la distensión y eventual ruptura irreversible de la pared celular y de estructuras de almacenamiento específicas como glándulas oleíferas y tricomas. Al romperse la barrera física, el disolvente puede acceder libremente y los metabolitos son liberados masivamente al medio de extracción, acelerando la transferencia de masa en varios órdenes de magnitud.

Para que los mecanismos descritos funcionen eficientemente, el acondicionamiento de la matriz es una etapa crítica que depende de tres factores: humedad, tamaño de partícula y homogeneidad.

Humedad: Se ha determinado que es termodinámicamente imposible desarrollar una extracción por microondas eficiente partiendo de un material totalmente deshidratado.

El agua actúa como el "susceptor" principal de energía. Si la matriz está seca, es transparente a las microondas y no se calienta. Por ello, los materiales secos deben ser rehidratados antes del proceso. El contenido de humedad óptimo permite que el agua absorba la energía, se caliente localmente y provoque la ruptura celular. Sin embargo, un exceso de agua puede ser contraproducente, ya que el disolvente podría

calentarse demasiado rápido, dificultando el control del proceso o hidrolizando compuestos sensibles.

Granulometría (tamaño de partícula): El tamaño de las partículas influye directamente en la superficie de contacto. El rango ideal se sitúa usualmente entre 100 μm y 2 mm. Las partículas menores a 100 μm, aunque ofrecen gran superficie, pueden causar problemas técnicos como la dificultad de filtrado posterior o la formación de emulsiones. Sin embargo, en partículas superiores a 2 mm, la difusión interna se convierte en el paso limitante. El disolvente tarda demasiado en penetrar hasta el núcleo de la partícula y los metabolitos tardan en salir, reduciendo la eficiencia global. El rango intermedio maximiza el área superficial, facilitando la penetración del disolvente y la interacción de las microondas, sin comprometer la operatividad del proceso.

Homogeneidad: Durante el acondicionamiento de la matriz es un requisito crítico que asegura la uniformidad isotrópica de la composición fisicoquímica y la distribución espacial de la muestra sólida previo a la irradiación. Esta condición es indispensable para garantizar que el acoplamiento de la energía de microondas genere un perfil térmico uniforme en todo el volumen, evitando así la formación de gradientes localizados ("puntos calientes") que podrían derivar en la degradación de analitos termolábiles o en una desorción ineficiente. Además, la homogeneidad textural estandariza las barreras difusionales, optimizando la cinética de transferencia de masa del disolvente hacia los solutos y asegurando la representatividad analítica de la muestra, lo cual es fundamental para la obtención de resultados cuantitativos reproducibles.

4.4 Criterios para la selección y modulación de disolventes

En la EAM la elección del disolvente es un proceso multidimensional que difiere de la extracción convencional. Mientras que en los métodos tradicionales el criterio principal es la afinidad química entre el disolvente y el analito ("lo semejante disuelve a lo semejante"), en la EAM se debe considerar obligatoriamente la capacidad del disolvente para interactuar con la radiación electromagnética. Esta capacidad se cuantifica mediante la constante dieléctrica y el factor de pérdida dieléctrica; la relación entre ambos determina la capacidad del disolvente para disipar la energía absorbida en forma de calor.

Los disolventes con altos valores de constante dieléctrica, como el agua, el metanol, el etanol y la acetona, poseen una fuerte absorbancia de microondas, calentándose rápidamente y transfiriendo ese calor a la matriz. Por el contrario, disolventes apolares como el hexano, el tolueno o el xileno son "transparentes" a las microondas; es decir, la radiación los atraviesa sin generar calentamiento molecular significativo. Esto plantea un desafío técnico cuando el analito de interés es apolar y requiere un disolvente apolar para su extracción.

Para superar esta limitación, se emplea la estrategia de mezclas binarias o cosolventes. La adición de una pequeña proporción de un disolvente polar (como agua o alcohol) a un medio apolar permite modular la permitividad dieléctrica de la mezcla. Por ejemplo, la adición de un 10% de agua al hexano permite que el sistema absorba suficiente energía para calentarse, manteniendo al mismo tiempo la selectividad del hexano para extraer lípidos o aceites esenciales.

Alternativamente, se utiliza la técnica de "extracción en medio transparente": se hidrata la matriz vegetal (que se calienta por absorción selectiva) y se sumerge en un disolvente apolar (que permanece frío). El calor se genera desde el material vegetal hacia afuera, permitiendo que los metabolitos migren al disolvente frío, protegiendo así compuestos termolábiles de la degradación térmica en el seno del líquido. . Para calentar disolventes no polares (como hexano, tolueno, cloroformo) en microondas, se utilizan susceptores o materiales que absorben la radiación y transfieren calor por conducción.

4.5 Configuraciones instrumentales: sistemas cerrados y abiertos

Desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, el equipamiento para EAM se clasifica en dos grandes categorías, cada una diseñada para necesidades específicas de presión y temperatura. Es fundamental destacar que el uso de hornos microondas domésticos está desaconsejado para fines científicos o industriales debido a la falta de homogeneidad del campo electromagnético (presencia de ondas estacionarias que crean puntos fríos y calientes) y la imposibilidad de controlar la temperatura con precisión, lo que conlleva a resultados irreproducibles.

A. Sistemas de vasijas cerradas (Presurizados)

Estos equipos operan bajo el principio de calentamiento por encima del punto de ebullición normal. Al sellar herméticamente el recipiente de extracción con sellos fabricados usualmente con polímeros transparentes a las microondas como PTFE (politetrafluoroetileno o también conocido como teflón) o PEEK (poliéter éter cetona), la

presión de vapor generada por el disolvente incrementa el punto de ebullición del líquido. Esto permite alcanzar temperaturas significativamente altas (ej. calentar agua a 150°C en estado líquido) sin evaporación. Según la ecuación de Arrhenius, este incremento de temperatura acelera exponencialmente la cinética de desorción y solubilización. Son ideales para analitos difíciles de extraer y matrices resistentes, pero presentan limitaciones de seguridad y volumen de muestra.

B. Sistemas de vasijas abiertas (Presión atmosférica)

Estos sistemas funcionan de manera análoga al reflujo tradicional pero con calentamiento dieléctrico (figura 71). Operan a presión atmosférica, lo que significa que la temperatura máxima está limitada por el punto de ebullición del disolvente. Son más seguros y permiten procesar volúmenes de muestra mucho mayores, lo que los hace más adecuados para el escalado a nivel piloto o industrial. Además, permiten la adición de reactivos o disolventes durante el proceso sin necesidad de detener la operación ni despresurizar el sistema.

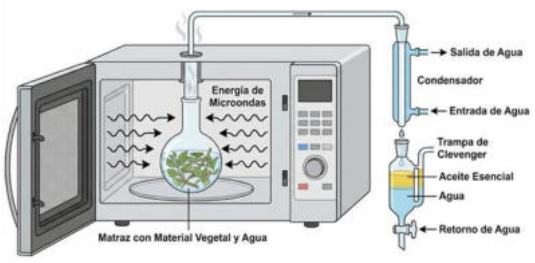


Figura 71. Sistema de extracción por microondas (EAM) con aplicación para la obtención de aceites esenciales.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

4.6 Modos de operación: discontinuo vs. continuo

La operatividad de la EAM puede diseñarse en función del flujo de masa, lo cual es determinante para su aplicación industrial.

- **Extracción en lotes (discontinua):** Es la modalidad estándar en laboratorios analíticos. Una cantidad fija de matriz y disolvente se procesa en un recipiente determinado. Aunque es simple, presenta la desventaja de que el disolvente puede saturarse con el analito a medida que avanza el tiempo, disminuyendo el gradiente de concentración que impulsa la transferencia de masa. Además, el analito extraído permanece expuesto al calor durante todo el ciclo, lo que podría degradarlo.

- **Extracción continua:** Representa el avance tecnológico hacia la producción industrial. En este sistema, el disolvente fresco fluye continuamente a través de la matriz vegetal mientras esta es irradiada por las microondas. Esta configuración ofrece dos ventajas termodinámicas críticas: primero, mantiene siempre un gradiente de concentración máximo (el disolvente nunca se satura), acelerando la extracción; y segundo, el analito extraído es retirado inmediatamente de la zona de calentamiento, minimizando su tiempo de residencia en condiciones térmicas agresivas y preservando su bioactividad.

4.7 Ventajas, desventajas y aplicaciones de la EAM

Las técnicas de extracción no convencionales permiten trabajar con volúmenes reducidos de disolvente, ya que la energía se aplica de forma directa sobre la matriz vegetal, lo que favorece una mayor eficiencia del proceso. En este contexto, se establecieron condiciones óptimas para la extracción y el análisis de furanocumarinas a partir de frutos de *Archangelica officinalis* Hoffm., mediante la comparación de diversos métodos extractivos (Waksmundzka-Hajnos et al., 2004). Se analizó la extracción mediante Soxhlet, la extracción asistida por ultrasonido (EAU) a 25 y 60 °C, la extracción asistida por microondas (EAM) en sistemas abiertos y cerrados, así como la extracción acelerada con disolventes (ASE). Se analizaron los efectos del tipo de disolvente, la temperatura y el tiempo de extracción sobre la eficiencia del proceso, determinándose que el empleo de metanol a temperaturas entre 100 y 130 °C durante 10 minutos permitió maximizar el rendimiento extractivo. Por otra parte, los rendimientos obtenidos mediante EAU a 60 °C y mediante EAM en sistema abierto fueron comparables a los alcanzados por la extracción en Soxhlet, aunque esta última requiere tiempos prolongados y un consumo significativamente mayor de disolvente.

Pan et al. (2003) compararon la extracción de polifenoles y cafeína del té verde, encontrando que la EAM requirió solo 4 minutos, frente a los 90 minutos de la extracción ultrasónica y los 45 minutos del reflujo térmico convencional. Esto sugiere que, para matrices con alto contenido de agua intracelular, el calentamiento dieléctrico es el mecanismo más eficiente energéticamente.

La EAM se ha escalado exitosamente en sectores clave tales como:

- Industria farmacéutica y nutracéutica: Se emplea para el aislamiento rápido de principios activos de alto valor como el taxol (anticancerígeno) y la artemisinina (antimalárico), donde la velocidad es crucial para la rentabilidad.

- Industria de fragancias y sabores: La extracción de aceites esenciales mediante microondas sin disolventes permite obtener esencias con un perfil organoléptico superior ("más fresco") al de la hidrodestilación tradicional, ya que se evitan las notas a "quemado" o hidrólisis por exposición prolongada al calor.

- Análisis ambiental: Se utiliza para extraer contaminantes (como pesticidas o hidrocarburos) de suelos y sedimentos para su análisis, reduciendo los tiempos de preparación de muestras de días a minutos

A pesar de sus ventajas, la EAM presenta desventajas frente a lo tradicional que deben considerarse. A diferencia del Soxhlet, donde el extracto final está libre de sólidos, la EAM produce una mezcla de disolvente y residuo vegetal que requiere una etapa posterior de filtración o centrifugación. Además, la eficiencia decae si tanto el solvente como el analito son apolares, requiriendo modificaciones químicas del medio, lo que limita su aplicabilidad universal. Otro aspecto a considerar es que puede verse restringida por la heterogeneidad del calentamiento, lo que puede generar puntos locales de sobrecalentamiento y favorecer la degradación de compuestos termo o fotosensibles.

4.8 Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (EAU)

La primera aplicación comercial del ultrasonido fue en 1917; desde entonces, el tema se ha desarrollado y expandido a un gran número de aplicaciones. Los proyectos más importantes que envuelven esta técnica no se encuentran entre los confines de la química, sino en tecnologías de procesamiento, ya que ha sido mejor reconocido en la industria que en los ámbitos de la ciencia pura.

Según el Centro de Sonoquímica de la Universidad de Coventry en el Reino Unido, el ultrasonido es utilizado por la posibilidad de realizar evaluaciones no invasivas ni destructivas, y por ser fuente de energía. Según este criterio, sus aplicaciones pueden dividirse en ultrasonido de señal y de potencia.

El ultrasonido se define como una onda acústica o sonora cuya frecuencia supera el umbral de audición del oído humano, es decir, por encima de los 20 kHz (20,000 ciclos por segundo). Al igual que cualquier onda sonora, se propaga a través de un medio material (líquido, sólido o gaseoso) mediante ciclos de compresión y rarefacción. Sin embargo, en el contexto de la ingeniería de procesos y la extracción de metabolitos, el ultrasonido no se utiliza solo para "transmitir" energía, sino para generar cambios físicos drásticos en el medio líquido a través del fenómeno de cavitación acústica.

4.9 Clasificación

Es fundamental distinguir entre los dos tipos de ultrasonido existentes, ya que sus aplicaciones industriales son diametralmente opuestas:

Ultrasonido de señal o diagnóstico (alta frecuencia: 100 kHz - 1 MHz): En este rango, la onda acústica se utiliza para obtener información sobre el medio que atraviesa sin alterarlo física o químicamente. La intensidad es baja y el objetivo es el análisis no destructivo.

- Principio: El producto modifica la señal acústica (atenuación, velocidad del sonido), y este cambio proporciona datos sobre la estructura o composición.

- Aplicaciones alimentarias: Se utiliza para el control de calidad no invasivo, como la medición del estado de maduración en melones y aguacates, la determinación de propiedades reológicas en quesos, el análisis de textura en frutas (manzana, kiwi, melocotón) y la determinación de la frescura (edad) en huevos y papas (Mulet et al., 1999).

Ultrasonido de potencia (baja frecuencia: 18 - 100 kHz) Este es el rango de interés para la extracción. Se emplean señales de alta intensidad y baja frecuencia que tienen la capacidad de modificar física y químicamente el medio o el producto.

Requerimientos: Precisa de un medio líquido, una fuente de energía y un transductor (dispositivo que convierte energía eléctrica, magnética o cinética en energía acústica/mecánica).

- Tipos de transductores: Actualmente predominan tres tecnologías: transductores propulsados por líquido, magnetostrictivos y, los más comunes en laboratorios modernos,

los piezoeléctricos.

4.10 El fenómeno de la cavitación acústica

El fundamento de la extracción por ultrasonido de potencia reside en la cavitación. Cuando ondas sonoras de alta intensidad viajan a través de un líquido, crean ciclos alternos de alta presión (compresión) y baja presión (rarefacción).

Durante el ciclo de baja presión, la presión del líquido cae por debajo de su presión de vapor, creando pequeñas burbujas de vacío o vapor microscópicas. Estas burbujas oscilan y crecen en tamaño al absorber energía de las ondas sonoras durante varios ciclos. Cuando la burbuja alcanza un tamaño crítico donde no puede absorber más energía, implosiona violentamente durante un ciclo de compresión. Este colapso genera "puntos calientes" (*hot spots*) microscópicos donde, por fracciones de segundo, se alcanzan temperaturas estimadas de 5000 K y presiones de 1000 atm. Aunque estos cambios son locales y efímeros, generan poderosas fuerzas de cizalla (cortantes) y chorros de líquido que impactan contra las superficies sólidas cercanas (como el material vegetal).

Antes de centrarse exclusivamente en la extracción, es importante notar que este mecanismo de cavitación, además de utilizarse en la extracción, permite otras operaciones unitarias, tales como:

- Limpieza y desinfección: La implosión de burbujas cerca de superficies elimina contaminantes biológicos y suciedad en zonas inaccesibles para métodos convencionales.

- Emulsificación: Los homogeneizadores ultrasónicos generan fuerzas de cizalla capaces de reducir el tamaño de gota, creando emulsiones estables para salsas y sopas con mejor textura.

- Filtración: La vibración acústica mantiene los filtros limpios por más tiempo, evitando la colmatación y reduciendo paradas por mantenimiento.

4.11 Mecanismo de extracción: interacción onda-célula

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) no es un proceso estático; es un fenómeno dinámico que altera la estructura biológica de la matriz vegetal. Según la literatura científica, el mecanismo se puede desglosar en dos fenómenos físicos simultáneos impulsados por la cavitación:

Difusión acelerada y efecto "esponja": Las ondas ultrasónicas facilitan la rehidratación del tejido vegetal seco. La presión acústica fuerza la entrada del disolvente a través de los poros de la matriz (efecto de hinchamiento), lo que incrementa la presión osmótica interna. Este hinchamiento abre nuevos canales de difusión, permitiendo que el disolvente alcance analitos situados profundamente en el tejido.

Disrupción mecánica (sonoporación): El colapso asimétrico de las burbujas de cavitación cerca de una superficie sólida genera microchorros de líquido que impactan la pared celular a altas velocidades. Este impacto mecánico causa erosión, picaduras y finalmente la ruptura de la pared celular.

En plantas donde los aceites esenciales se almacenan en glándulas superficiales o tricomas (ej. menta, lavanda), la pared es fina y se

rompe casi instantáneamente por el ultrasonido, liberando el contenido de inmediato. Sin embargo, cuando los metabolitos están dentro de la estructura celular interna, el ultrasonido primero debe permear el tejido antes de romper las vacuolas de almacenamiento.

4.12 Influencia del tamaño de partícula

El tamaño de la partícula sólida es un parámetro determinante en la eficiencia del proceso. Para ilustrar cómo la reducción del tamaño de partícula interactúa sinérgicamente con el ultrasonido, se presenta el siguiente análisis de un caso práctico sobre la extracción de eugenol.

Los datos demuestran que en la extracción por US si la matriz no está acondicionada, la eficiencia del proceso disminuye. Sin embargo, cuando reduce el tamaño (0,1-0,5 mm), se logra un incremento del rendimiento superior al 30% respecto al mejor método tradicional. Esto se debe a que las partículas más pequeñas permiten que la onda ultrasónica afecte a la totalidad del volumen de la muestra, y la cavitación rompe las estructuras celulares ya expuestas por la molienda.

La tabla 5 muestra cómo varía el rendimiento (100 g) en función de la técnica aplicada y el pretratamiento físico de la muestra, utilizando etanol al 96% durante 30 min.

Tabla 5. Comparación de la eficiencia de extracción de eugenol del clavo de olor.

Técnica de extracción	Estado de la matriz (tamaño de partícula)	Rendimiento de eugenol (g/100 g)	Análisis de eficiencia

Tradicional (Disolvente + agitación)	Entera	4,10	Bajo. El disolvente apenas penetra la estructura externa.
Tradicional (Disolvente + Agitación)	Molida (0,1 - 0,5 mm)	25,20	Medio-Alto. La molienda expone más superficie, mejorando la difusión pasiva.
Ultrasonido (US)	Entera	4,22	Bajo. El US no puede penetrar eficazmente la corteza entera del clavo.
Ultrasonido (US)	Molida (0,1 - 0,5 mm)	32,66	Máximo**.** Sinergia entre gran superficie de contacto y cavitación acústica.

4.13 Equipos y configuraciones experimentales

La implementación de la EAU varía desde configuraciones de laboratorio sencillas hasta reactores industriales complejos. Se distinguen dos modos de aplicación de la energía (figura 72):

- Sistemas de extracción indirecta (baños ultrasónicos): Es el equipo más común en laboratorios debido a su bajo costo y disponibilidad. El disolvente y la muestra se colocan en un

recipiente (matraz, vaso) que se sumerge en una cubeta llena de agua donde se encuentran los transductores. Las ondas deben atravesar el agua de la cubeta y la pared del vidrio para llegar a la muestra.

Estos equipos tienen la limitación de que la intensidad de la onda se atenúa significativamente antes de llegar a la muestra. Además, la distribución de la energía es poco homogénea (depende de la posición del matraz en el baño). Se recomienda el uso de agitación mecánica adicional para mejorar la homogeneidad.

- Sistemas de extracción directa (sondas o cuernos ultrasónicos) : Son sistemas de alta intensidad (ultrasonido de potencia puro). El transductor (generalmente de titanio) se sumerge directamente dentro de la mezcla de reacción. Tiene la ventaja de que la energía se transmite directamente al medio sin barreras, logrando intensidades hasta 100 veces superiores a las de un baño de limpieza. Esto permite tiempos de extracción mucho más cortos y mayor ruptura celular.

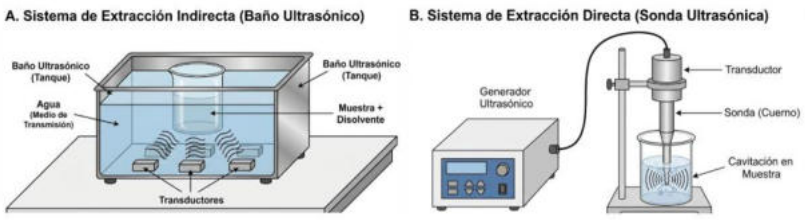


Figura 72. Sistema de extracción mediante ultrasonido. A. Extracción indirecta. B. Extracción directa.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

Para el escalado, se han desarrollado reactores de flujo continuo. Un hito en la ingeniería de estos equipos fue el reactor diseñado en Rumania en 1995 con una capacidad de 700 - 850 L. En pruebas comparativas con 12 hierbas distintas, este reactor logró obtener un 50% más de extracto en solo 6 horas de operación, en contraste con los 28 días requeridos por la maceración tradicional a 45 °C. Esto demuestra que la EAU no solo es viable a escala de laboratorio, sino que transforma radicalmente la productividad industrial.

4.14 Variables críticas del proceso

La EAU no es una técnica de "aplicación única"; su éxito depende de la calibración precisa de múltiples parámetros. Según los estudios de Palma & Barroso, para maximizar el rendimiento y garantizar la reproducibilidad, es imperativo controlar y optimizar las siguientes variables operativas: temperatura, volumen de disolvente, potencia del ultrasonido y duración del ciclo.

La **temperatura** es quizás la variable más compleja en la EAU. Un aumento moderado de la temperatura disminuye la viscosidad y la tensión superficial del disolvente, lo que facilita la formación de burbujas de cavitación (se requiere menos energía para romper la cohesión del líquido). Esto explica por qué, en ciertos estudios al operar a 60 ºC se maximiza la extracción, dado el aumento del número de burbujas de cavitación activas. Una de las ventajas competitivas más fuertes de la EAU es su capacidad para extraer compuestos que se destruirían con el calor de un Soxhlet o una destilación.

Sin embargo, el ultrasonido genera calor intrínseco debido a la fricción

molecular. Si la temperatura sube demasiado, aumenta la presión de vapor del disolvente dentro de la burbuja, lo que "amortigua" el colapso (cavitación menos violenta), reduciendo la eficiencia de ruptura celular. Además, el exceso de calor degrada metabolitos sensibles. Por ello, muchos sistemas modernos incluyen camisas de refrigeración para mantener el proceso controlado.

La relación entre **tiempo** y rendimiento no es lineal. Generalmente, hay una extracción inicial rápida seguida de una fase lenta. Un tiempo de exposición excesivo no solo es ineficiente energéticamente, sino que puede dañar la estructura química del extracto (oxidación o degradación).

Con respecto al disolvente de extracción, se busca un **volumen** tal que no se sature rápidamente, pero tampoco disipe excesivamente la energía. Cuando el volumen es muy bajo, el soluto puede saturar rápidamente el solvente, lo que reduce el gradiente de difusión y la eficiencia global. Mientras que un volumen demasiado alto puede diluir la energía de ultrasonido por unidad de volumen, reduciendo la eficacia de cavitación y aumentando el costo del proceso. Cabe resaltar que dentro de las ventajas de estas llamadas técnicas verdes, está el menor consumo de menstruo o disolvente de extracción.

En el factor **potencia**, esta determina la capacidad de cavitación (formación y colapso de burbujas), que es el mecanismo físico que acelera la extracción/disolución. Incrementos moderados de potencia mejoran la cavitación, rompen células y aumentan la transferencia de masa, lo cual acelera la liberación y disolución de componentes.

Mientras que potencias excesivas pueden disminuir la eficiencia porque generan demasiadas burbujas inútiles, conducen a aglomeración del solvente y pueden degradar compuestos sensibles por generar calor local intenso. Debe considerarse potencia de ultrasonido óptima que maximiza la eficiencia sin causar efectos adversos.

4.15 Ventajas, limitaciones y aplicaciones de la EAU

La EAU se posiciona como una técnica eficaz y versátil dentro de las metodologías de extracción no tradicionales, combinando simplicidad operativa con mejoras significativas en rendimiento y eficiencia. Esta técnica facilita la ruptura de las paredes celulares y mejora la transferencia de masa entre la matriz vegetal y el disolvente, lo que generalmente permite obtener mayores rendimientos de compuestos bioactivos en tiempos más cortos y con menor consumo de solventes que los métodos tradicionales.

El método destaca por su capacidad para operar a bajas temperaturas, lo que contribuye a preservar la integridad de metabolitos termolábiles y reducir la degradación química durante el proceso. La versatilidad del ultrasonido también permite su acoplamiento con diferentes disolventes y matrices vegetales, aumentando su aplicabilidad a una amplia gama de metabolitos, desde compuestos polares hasta semipolares.

Para dimensionar el impacto real de esta tecnología, es fundamental contrastar datos cuantitativos. A continuación, se presenta una recopilación de estudios que comparan la EAU con técnicas convencionales.

La tabla 6 resume los incrementos de rendimiento reportados en diversas matrices vegetales, destacando la superioridad cinética y productiva del ultrasonido.

Tabla 6. Análisis comparativo de eficiencia de extracción: ultrasonido frente a métodos convencionales.

Estudio / año	**Matriz vegetal (analito)**	**Método de comparación**	**Resultados / eficiencia relativa del ultrasonido**
Gao (2005)	*Saussurea medusa* Maxim (flavonoides)	Extracción con disolventes (T. amb)	70 veces más eficiente.
		Destilación	11 veces más eficiente.
		Soxhlet	35 veces más eficiente.
Rostagno et al. (2003)	Soja (isoflavonas)	Agitación con metanol/etanol	Incremento del rendimiento entre 6,4% y 25% superior al método tradicional.
Palma & Barroso (2002)	Semillas de uva (acido tartárico)	Maceración y mezclado	Misma cantidad de producto en 30 min (US) vs 120 min (tradicional). Eficiencia 4 veces mayor en tiempo.

Aunque la EAU se destaca por su simplicidad y bajo consumo energético, la intensidad de cavitación puede resultar insuficiente para matrices vegetales densas o altamente lignificadas. Además, exposiciones prolongadas pueden inducir la formación de radicales libres, con el consiguiente riesgo de oxidación de metabolitos sensibles.

A pesar de la evidencia sobre su eficiencia a escala de laboratorio, la implementación masiva del ultrasonido en la industria enfrenta ciertos desafíos técnicos que es necesario reconocer:

Aunque existen reactores grandes, la ultrasonificación se ha aplicado históricamente más a la obtención de productos de alto valor en volúmenes pequeños o medianos (química fina) que a la extracción en gran escala. La atenuación de la onda ultrasónica a medida que se aleja de la fuente hace difícil garantizar una cavitación uniforme en tanques de gran volumen, sin una ingeniería compleja de múltiples transductores.

Por otra parte, como se analizó en las variables de operación, el ultrasonido genera calor interno. En procesos continuos a gran escala, esto requiere sistemas de refrigeración robustos para evitar la degradación del producto, lo que añade costos energéticos al sistema.

Respecto a los efectos de las cavitaciones, en exceso provoca la erosión progresiva de las superficies metálicas de los transductores (especialmente en sondas de titanio), lo que puede contaminar el extracto con micropartículas metálicas y requiere un mantenimiento frecuente.

4.16 Extracción mediante fluido supercrítico (EFS)

Cagniard de la Tour descubrió el punto crítico en 1822. El punto crítico de una sustancia se define como la temperatura y presión a las cuales el estado líquido y gaseoso son indistinguibles; consecuentemente, al pasar ese punto se considerará un fluido

supercrítico (figura 73). En este punto las propiedades del fluido resultante se encuentran en una condición intermedia entre líquido y gas, donde la densidad del mismo se asemeja a la de un líquido mientras que la viscosidad se asemeja a un gas.

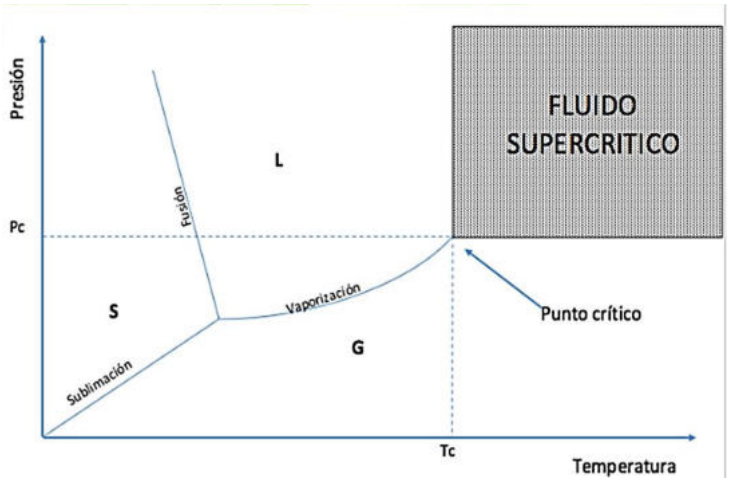


Figura 73. Diagrama de fases de fluidos.

Nota. Tc: Temperatura crítica; Pc: Presión crítica; S: Sólido; L: Líquido; G: Gaseoso. Tomado de Román et al., (2016).

Toda sustancia posee un diagrama de fases, correspondiente a la representación de las condiciones termodinámicas de equilibrio. Como se representan en la figura 73., los diagramas poseen tres líneas de acción: sublimación, fusión y vaporización, siendo esta última la que desaparece al alcanzar los puntos de presión y temperatura críticos, es decir, la sustancia no se licua, aunque aumente la presión ni se vaporiza, aunque aumente la temperatura.

Al trabajar por encima del punto crítico del solvente, la extracción supercrítica se presenta como una operación de transferencia de masa

altamente ajustable. Su principal fortaleza es la capacidad de modular propiedades de transporte, tales como la viscosidad y difusividad, mediante variaciones sutiles de presión y temperatura. Esta flexibilidad impacta directamente en la capacidad del fluido para disolver sustancias y en su especificidad para seleccionar los componentes deseados.

La principal ventaja de esta técnica es que minimiza el impacto ambiental, gracias a que la mayoría de los disolventes usados no son contaminantes; por consiguiente, los problemas como los asociados a los residuos, el uso de solventes orgánicos volátiles y la liberación de los mismos a la atmósfera se ven mitigados.

Otras ventajas de este método frente a la utilización de métodos de extracción convencionales son la posibilidad de obtener extractos libres de disolvente, tiempos de extracción menores, rendimientos mayores, seleccionar tanto las sustancias como la composición de los extractos cambiando ciertos parámetros de extracción y que, de forma general, el gasto energético se ve minimizado.

4.17 Etapas de la extracción con fluidos supercríticos

Dentro de la tecnología de fluidos supercríticos, existen dos estrategias operativas principales. La primera es la extracción selectiva, la cual se centra en ajustar la afinidad del solvente para capturar compuestos específicos; esto se logra modulando las condiciones termodinámicas (presión y temperatura) o alterando la química del fluido mediante cosolventes. La segunda estrategia es la separación selectiva, orientada a la etapa de recuperación. En este caso, se busca fraccionar los

extractos mediante una despresurización controlada o cambios graduales de temperatura, obligando a los solutos a precipitar de manera ordenada.

El proceso de extracción por medio de fluidos supercríticos consta, a grandes rasgos, de cuatro etapas:

Presurización: se lleva la presión de la sustancia por encima de la presión crítica del disolvente a emplear

Ajuste de temperatura: se aumenta o disminuye la temperatura, ya sea por medios físicos o mecánicos, por encima de la temperatura crítica

Extracción: el fluido, ya en condiciones supercríticas, se introduce en la cámara de alta presión donde se aloja la matriz sólida. Al entrar en contacto directo, el fluido arrastra y solubiliza los componentes deseados.

Separación: la mezcla sale del extractor y se somete a un cambio de condiciones, típicamente una descompresión rápida. Al caer la presión por debajo del punto crítico, el solvente se convierte en gas y libera el extracto, permitiendo su recolección limpia.

Esta extracción puede realizarse de forma discontinua o semicontinua, y de forma continua. La primera se aplica cuando se trata de extracciones sólido-líquido, por ende, se requiere una compresión y descompresión continuas; mientras que, la segunda se aplica cuando se trata de una extracción líquido-líquido.

El proceso (figura 74) comienza en un tanque de almacenamiento

donde se encuentra el fluido, generalmente dióxido de carbono (CO_2), en condiciones de presión y temperatura normales. Para iniciar el ciclo, el fluido pasa primero por un intercambiador de calor que asegura que esté en estado líquido, evitando problemas de cavitación, para luego ser impulsado por una bomba de alta presión que lo comprime por encima de su presión crítica. Inmediatamente después, el fluido circula a través de un calentador o baño térmico que eleva su temperatura por encima del punto crítico.

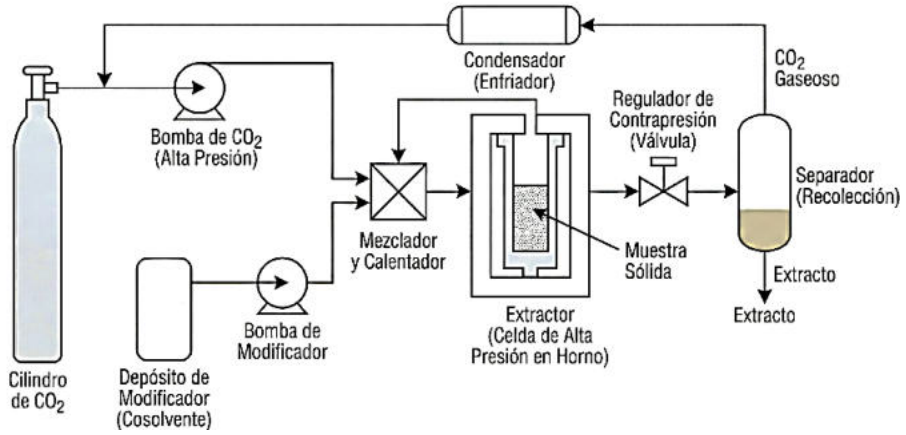


Figura 74. Diagrama de extracción con fluidos supercríticos (EFS).

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

Al superar tanto la presión como la temperatura crítica, la sustancia se transforma en un fluido supercrítico, adquiriendo propiedades híbridas como la alta densidad de un líquido y la alta difusividad de un gas. Una vez acondicionado, el fluido ingresa a la cámara de extracción, un recipiente de alta presión que contiene la materia prima o matriz sólida. Gracias a su baja viscosidad, el fluido penetra fácilmente en los poros de la matriz, disolviendo y arrastrando los compuestos de interés

o solutos. Esta etapa puede realizarse de forma estática o dinámica, y si los compuestos a extraer son polares, es posible inyectar un cosolvente (como el etanol) en la corriente antes de entrar al extractor para modificar la polaridad y aumentar la solubilidad.

La mezcla de fluido y extracto abandona el extractor y pasa a través de una válvula de expansión o regulador de contrapresión, donde se produce una reducción drástica de la presión. Esta descompresión se dirige hacia un separador; al bajar la presión (y a menudo modificar la temperatura), la densidad del fluido disminuye bruscamente, perdiendo su capacidad disolvente. Como resultado, el extracto precipita en el fondo del separador para su recolección, mientras que el CO_2 vuelve a su fase gaseosa y sale por el parte superior limpio de solutos. Finalmente, este gas pasa por un condensador para volver al estado líquido y ser recirculado al sistema, completando así el ciclo cerrado.

4.18 Disolventes y muestra

El conocimiento de las propiedades termodinámicas de los fluidos supercríticos y de su comportamiento en las proximidades del punto crítico permite un diseño adecuado tanto de las reacciones como de los procesos de separación. Si bien el empleo de fluidos puros facilita la identificación precisa de la región supercrítica y de sus propiedades características, en la práctica también es posible trabajar con sistemas multicomponente. Estos sistemas están conformados por el disolvente junto con otros componentes, tales como cosolventes, solutos extraídos, reactivos y productos de reacción. En consecuencia, el punto crítico del sistema ya no es único, sino que depende de la composición

de la mezcla.

El dióxido de carbono (CO_2) se ha consolidado como uno de los disolventes más usados en la actualidad, preferido por su capacidad para equilibrar la seguridad operativa con la eficiencia económica. Esta preferencia se justifica en que es un recurso abundante y de bajo costo que, al ser no inflamable y de baja toxicidad, garantiza un proceso limpio sin generar contaminación ambiental. Además de sus accesibles condiciones críticas, el CO_2, destaca por ser químicamente inerte y por su facilidad para separarse del extracto; esto permite obtener productos puros sin residuos, eliminando la necesidad de limpiezas posteriores y facilitando el reciclaje continuo del solvente dentro del sistema.

En la tabla 7 se muestran otros disolventes que también pueden ser considerados para llevar a cabo una extracción, junto con sus respectivas temperaturas y presiones críticas.

Tabla 7. Principales disolventes usados en la extracción con fluidos supercríticos.

Disolvente	Temperatura crítica (K)	Presión crítica (bar)
Dióxido de carbono	304,1	73,8
Agua	647,3	221,2
Metano	190,4	46
Etano	305,4	48,8
Propano	369,8	42,5

Etileno	282,4	50,4
Propileno	364,9	46,0
Metanol	512,6	80,8
Etanol	513,9	61,4
Acetileno	309,1	62,4
Butano	425,1	70,6
Éter	466,7	63,8
Amoniaco	405,5	113,5
Acetona	508,1	47,0
Ciclohexano	553,5	40,7
N-pentano	469,7	33,7
Tolueno	591,8	41,0

La elección del disolvente está fuertemente condicionada por la naturaleza química y la polaridad tanto del disolvente como de los solutos objetivo, bajo la premisa de que la afinidad química favorece la solubilidad. Si bien la capacidad de solvatación de un fluido supercrítico puede ajustarse modificando su densidad a través de la presión y la temperatura, la polaridad intrínseca sigue siendo una

limitante física. Dado que el disolvente más común, el CO_2, es apolar (similar al hexano), resulta ineficiente para extraer compuestos polares. Para superar esta barrera sin descartar el fluido, se recurre a la adición de cosolventes o modificadores (como etanol o agua) que alteran la polaridad de la mezcla y amplían el rango de compuestos extraíbles, aunque esto implica considerar una etapa posterior para separar dicho cosolvente del extracto final.

La seguridad industrial y la protección ambiental constituyen otro pilar decisivo en esta selección, impulsando la búsqueda de solventes verdes que sustituyan a los orgánicos tradicionales, además de la viabilidad del proceso en factores económicos y operativos, tales como la disponibilidad, el costo y la pureza del fluido en el mercado.

La extracción con fluidos supercríticos es una técnica versátil que se aplica principalmente a matrices vegetales sólidas, siendo las semillas y las hojas las partes más utilizadas, seguidas por frutos, raíces y cortezas. Para garantizar la eficacia del proceso, el pretratamiento de la muestra es una etapa crítica; esto implica generalmente la trituración o molienda para reducir el tamaño de partícula (usualmente entre 0,25 y 1,8 mm) y aumentar el área de contacto. Además, dependiendo de la naturaleza química de la muestra, se puede requerir la adición de modificadores o cosolventes; por ejemplo, para extraer sustancias polares como la naringenina de los cítricos o alcaloides como la colchicina de semillas, es necesario mezclar el CO2 con pequeños porcentajes de etanol o metanol (entre 3% y 15%), lo que permite alcanzar tasas de recuperación superiores al 97% que no serían posibles con el fluido puro.

4.19 Limitaciones

A pesar de sus numerosas ventajas, la extracción con fluidos supercríticos presenta desafíos económicos y técnicos significativos que restringen su aplicación generalizada, siendo la principal barrera los elevados costos de inversión inicial y mantenimiento. Esto se debe a que la operación a altas presiones exige el uso de equipos robustos, instalaciones complejas y sistemas de seguridad rigurosos, lo que afecta directamente la rentabilidad y suele limitar su uso comercial a productos de alto valor agregado. Además, existen dificultades operativas inherentes al manejo de la presión; por ejemplo, la alimentación continua de materias primas sólidas al extractor es técnicamente difícil debido a la diferencia de presión, lo que obliga frecuentemente a trabajar por lotes (sistemas discontinuos), generando pérdidas energéticas por los ciclos repetidos de compresión y descompresión.

Desde una perspectiva termodinámica y de proceso, la técnica también enfrenta complejidades, ya que el equilibrio de fases entre el soluto y el solvente puede ser difícil de predecir teóricamente, haciendo indispensable la realización de pruebas a escala piloto antes de escalar a nivel industrial para ajustar las variables. A esto se suma que, si bien el uso de cosolventes es útil para modificar la polaridad, estos pueden quedar como residuos en el extracto, requiriendo una etapa posterior de separación que añade complejidad operativa. Finalmente, dependiendo del fluido seleccionado, pueden surgir problemas de corrosión en los materiales de construcción, como ocurre notablemente con el agua supercrítica, lo que obliga al uso de aleaciones especiales y costosas.

4.20 Aplicaciones en la industria

A escala industrial, la aplicación más consolidada sigue siendo el descafeinado del café y la extracción de lúpulo para cervecería, procesos que aprovechan la selectividad del CO_2 para obtener productos limpios. Sin embargo, el método se ha expandido exitosamente a la obtención de lípidos, aceites esenciales y saborizantes a partir de plantas, logrando calidades superiores a las técnicas convencionales. Un ejemplo destacado es la extracción de aceite de avellana, donde se ha comprobado que el fluido supercrítico protege mejor los ácidos grasos poliinsaturados contra la oxidación en comparación con métodos químicos. Asimismo, la industria farmacéutica y nutracéutica utiliza esta técnica para aislar compuestos de alto valor, como glicósidos de *Citrus paradise* o derivados de *Colchicum autumnale*, aprovechando la rapidez y eficiencia que otorgan los modificadores polares.

En el ámbito de la innovación tecnológica, instituciones de reconocido prestigio como el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y el Centro Tecnológico AINIA, han desarrollado plantas piloto para la extracción con fluidos supercríticos que incorporan emisores de ultrasonido de alta potencia integrados en los extractores. La introducción de ondas elásticas en el medio genera ciclos de compresión y descompresión, así como fenómenos de cavitación y microagitación interna, lo que favorece la intensificación del proceso. La aplicación de esta tecnología híbrida en matrices vegetales, como la almendra, ha demostrado una aceleración significativa de la cinética de extracción y un incremento en el rendimiento de aceite, lo que

representa un avance relevante para la reducción de los tiempos de proceso y de los costos operativos en aplicaciones industriales.

4.21 Extracción con disolventes presurizados

La extracción con líquidos presurizados (PLE, por sus siglas en inglés), conocida también como extracción acelerada con disolventes (ASE, por sus siglas en inglés), es una técnica avanzada de preparación de muestras que emplea disolventes líquidos a temperaturas y presiones elevadas. A diferencia de los métodos convencionales, la PLE opera en un sistema cerrado donde se aplican temperaturas por encima del punto de ebullición atmosférico del disolvente, manteniéndolo en estado líquido mediante la aplicación de alta presión (generalmente entre 100 y 200 bar) (figura 75).

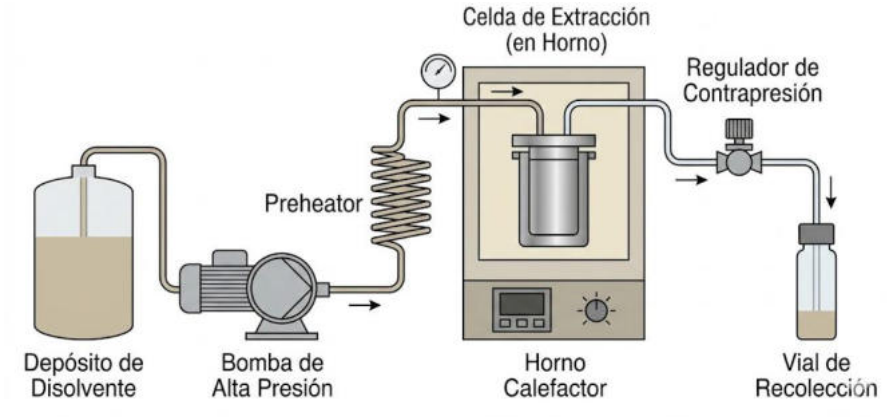


Figura 75. Sistema de extracción con líquido presurizado.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

El objetivo fundamental de esta técnica es maximizar la eficiencia del proceso extractivo, logrando cinéticas de desorción rápidas y seguras.

Al elevar la temperatura, se otorga suficiente energía térmica para vencer las fuerzas de cohesión entre el soluto y la matriz sólida, mientras que la presión elevada garantiza que el disolvente permanezca en fase líquida, permitiendo un contacto íntimo con los poros de la matriz.

El fundamento teórico de la PLE se cimenta en la manipulación termodinámica de las propiedades fisicoquímicas del disolvente y en la aceleración de la cinética de transferencia de masa. Al operar en un sistema cerrado, esta técnica permite elevar la temperatura del disolvente muy por encima de su punto de ebullición atmosférico, manteniéndolo en estado líquido mediante la aplicación de alta presión. Esta condición supercalentada incrementa la energía térmica del sistema, lo cual no solo favorece la solubilidad de los analitos, sino que también reduce drásticamente la viscosidad y la tensión superficial del fluido extractor. Como resultado, el disolvente adquiere una mayor capacidad para humectar la matriz sólida y penetrar profundamente en sus poros y microestructuras, accediendo a solutos que quedarían inalcanzables bajo condiciones ambientales.

Desde una perspectiva molecular, el aumento de la temperatura induce cambios críticos en la selectividad del disolvente, siendo el fenómeno más notable la disminución de la constante dieléctrica, especialmente en disolventes polares como el agua. Al debilitarse los enlaces de hidrógeno intermoleculares por acción del calor, un disolvente polar puede modificar su polaridad para comportarse de manera similar a un disolvente orgánico (por ejemplo, el agua a 250 °C presenta una constante dieléctrica similar a la del metanol o etanol a temperatura

ambiente). Esto otorga al método una versatilidad única, permitiendo la extracción de compuestos apolares o moderadamente polares utilizando disolventes que, en condiciones estándar, no serían adecuados, reduciendo así la necesidad de emplear reactivos tóxicos.

Paralelamente, la energía térmica suministrada juega un papel vital en la cinética de desorción. El calor ayuda a vencer la energía de activación necesaria para romper las fuerzas de interacción (como fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno y atracciones dipolo-dipolo) que mantienen a los analitos retenidos en los sitios activos de la matriz. Al liberarse estas uniones, y sumado al incremento en la difusividad predicho por la ecuación de Einstein-Stokes (donde la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional a la viscosidad), los analitos migran rápidamente desde el interior de la partícula hacia el disolvente circundante, reduciendo los tiempos de extracción de horas a minutos.

Finalmente, la presión elevada, aunque tiene un efecto menor sobre la solubilidad directa en comparación con la temperatura, cumple una función mecánica y de equilibrio de fases indispensable. Su objetivo principal es elevar el punto de ebullición del disolvente para asegurar que permanezca en fase líquida, garantizando un contacto íntimo y continuo entre el sólido y el líquido, el cual es mucho más eficiente para la solvatación que el contacto con un gas o vapor. Además, esta presión hidráulica fuerza físicamente al disolvente a entrar en los poros de la matriz, superando la resistencia capilar y desplazando burbujas de aire atrapadas que podrían actuar como barreras para la extracción, asegurando así una recuperación exhaustiva de los compuestos de

interés.

4.22 Proceso de extracción

La metodología de extracción mediante líquidos presurizados comienza con una fase de preparación y acondicionamiento de la muestra, indispensable para garantizar la eficiencia del proceso difusivo. El material vegetal o sólido debe someterse a un proceso de secado y molienda fina para reducir el tamaño de partícula, lo cual incrementa significativamente el área superficial de contacto. Posteriormente, es práctica común mezclar la muestra homogeneizada con un agente dispersante inerte, como tierra de diatomeas o arena de mar lavada. Esta mezcla cumple una doble función mecánica: primero, previene la compactación excesiva de la muestra bajo las altas presiones de operación, y segundo, evita la formación de caminos preferenciales o canalizaciones que impedirían que el disolvente contacte uniformemente toda la matriz, asegurando así una extracción exhaustiva.

Una vez preparada, la mezcla se introduce en celdas de extracción de acero inoxidable, cuyos volúmenes pueden variar según la cantidad de muestra disponible. En los extremos de estas celdas se colocan filtros de celulosa o fibra de vidrio para retener las partículas sólidas y evitar la obstrucción de las líneas del sistema. El proceso se realiza en un equipo automatizado que introduce las celdas en un horno precalentado a la temperatura deseada. El sistema bombea el disolvente seleccionado hasta llenar la celda y eleva la presión hasta el nivel operativo, usualmente entre 100 y 200 bar. Esta presurización es vital

para mantener el disolvente en estado líquido a temperaturas superiores a su punto de ebullición atmosférico, favoreciendo la cinética de desorción.

El núcleo del proceso es la etapa estática, donde la muestra permanece en contacto con el disolvente caliente y presurizado por un tiempo determinado, comprendido entre 5 a 20 minutos. Durante este periodo, la alta energía térmica rompe las interacciones soluto-matriz y acelera la difusión de los analitos hacia el disolvente. Debido a la expansión térmica del fluido dentro de un volumen constante, la presión tiende a aumentar; para gestionar esto, el sistema cuenta con válvulas estáticas automáticas que se abren brevemente si se supera el umbral de presión programado, permitiendo que pequeñas cantidades de extracto fluyan hacia el vial de recolección y manteniendo la presión interna estable y segura.

Tras finalizar el tiempo estático, el equipo bombea un volumen adicional de disolvente fresco a través de la celda (conocido como volumen de lavado o flush, típicamente el 60% del volumen de la celda) para arrastrar los analitos ya disueltos hacia el vial de recolección. Inmediatamente después, se inyecta gas inerte, comúnmente nitrógeno (N_2), a alta presión. Esta purga tiene como objetivo expulsar mecánicamente todo el disolvente residual atrapado en la matriz y en las tuberías del sistema, asegurando no solo la recuperación cuantitativa de los analitos para evitar pérdidas, sino también dejando la muestra sólida seca.

4.23 Ventajas y limitaciones

La principal fortaleza de la PLE radica en su notable eficiencia cinética y operativa, la cual representa un salto cualitativo respecto a los métodos clásicos. Al combinar altas temperaturas con presión, la técnica logra romper las fuerzas de desorción y acelerar la difusión de los analitos de manera drástica, permitiendo completar procesos exhaustivos en cuestión de minutos (usualmente entre 10 y 20), en contraste con las largas horas requeridas por un sistema Soxhlet o una maceración convencional. Esta velocidad no solo optimiza el flujo de trabajo en el laboratorio, permitiendo procesar un mayor número de muestras por día, sino que también conlleva una reducción significativa en el consumo de disolventes orgánicos. Al requerir menores volúmenes para alcanzar recuperaciones cuantitativas, la PLE se alinea estrechamente con los principios de la ¨Química Verde¨, disminuyendo tanto los costos operativos asociados a la compra de reactivos como el impacto ambiental derivado de la gestión de residuos químicos.

Más allá de la velocidad, esta técnica ofrece una versatilidad fisicoquímica excepcional gracias a la capacidad de modificar las propiedades del disolvente mediante la temperatura. Esta característica permite al investigador sintonizar la selectividad del proceso sin necesidad de cambiar el tipo de disolvente, logrando, por ejemplo, que el agua o el etanol adquieran capacidades de solvatación propias de disolventes más apolares y tóxicos. Adicionalmente, el diseño instrumental de los equipos de PLE, al ser sistemas cerrados y automatizados, protege la integridad de la muestra. Al realizar la extracción en un ambiente inerte y protegido de la luz, se minimiza la degradación oxidativa o fotolítica de compuestos sensibles,

garantizando que el perfil químico obtenido sea fiel a la composición original de la matriz, al tiempo que la automatización asegura una elevada reproducibilidad al eliminar la variabilidad introducida por la manipulación manual.

No obstante, la naturaleza térmica del método impone su limitación más crítica: la posible degradación de compuestos termolábiles. Dado que el fundamento de la técnica implica trabajar a temperaturas que suelen superar los 100 °C, existe un riesgo inherente de alterar estructuralmente moléculas sensibles al calor, como ciertas vitaminas, antioxidantes o proteínas. Aunque es posible optimizar el proceso reduciendo la temperatura, esto a menudo compromete la eficiencia de la extracción o requiere tiempos más largos, lo que obliga al analista a encontrar un delicado equilibrio entre el rendimiento de extracción y la preservación de la identidad química del analito. Por lo tanto, para cada nueva matriz o compuesto de interés, es indispensable realizar estudios previos de estabilidad térmica para descartar la formación de artefactos o productos de degradación.

Paradójicamente, la alta eficiencia de solvatación que define a la PLE puede convertirse en un arma de doble filo en términos de selectividad. Las condiciones drásticas de presión y temperatura incrementan la solubilidad no solo de los analitos de interés, sino también de una amplia gama de compuestos interferentes presentes en la matriz (co-extracción), como lípidos, ceras o pigmentos. Esto da lugar a extractos sucios o muy complejos que frecuentemente requieren etapas posteriores de limpieza o purificación (como extracción en fase sólida o filtración adicional) antes de poder ser

analizados mediante cromatografía, lo cual puede añadir tiempo y coste al análisis global. Finalmente, la implementación de esta tecnología implica una barrera económica considerable, ya que el costo de adquisición y mantenimiento de los equipos automatizados de alta presión es sustancialmente mayor que el de la vidriería de laboratorio tradicional, restringiendo su uso a laboratorios con recursos suficientes o necesidades de alto rendimiento.

4.24 Aplicaciones de la extracción con líquidos presurizados (PLE)

La extracción con líquidos presurizados ha impulsado su implementación más allá del análisis ambiental, siendo una herramienta en la industria alimentaria y farmacéutica para el descubrimiento y recuperación de principios activos.

En un estudio sobre la planta *Lysimachia clethroide*, se aplicó la PLE para optimizar la recuperación de 5 flavonoides mayoritarios. El proceso consideró variables operativas como tipo de disolvente, temperatura, presión, tiempo de extracción y volumen de lavado para lograr una extracción eficiente. La condición óptima empleó una mezcla acuosa de acetonitrilo al 50 %, una temperatura de extracción de 100 °C y una presión de 1500 psi, obteniéndose extracciones completas de los metabolitos objetivo (Liu et al., 2006).

Se realizó una investigación en las hojas de *Lippia citriodora*, comparando el efecto de la PLE frente a métodos convencionales, para recuperar compuestos bioactivos a partir de sus hojas. Utilizando un diseño experimental basado en superficie de respuesta, se optimizaron

temperatura, proporción de solvente (mezcla de etanol y agua) y tiempo de extracción para maximizar el rendimiento y la recuperación de los metabolitos. Se identificaron condiciones óptimas (200 °C con ~46 % etanol) que permitieron una extracción eficiente de los metabolitos de interés, evidenciando la superioridad de PLE frente a extracciones tradicionales (Herrero et al., 2010).

En un estudio con la alga marina *Laminaria ochroleuca*, la extracción con disolvente presurizado se aplicó para obtener fracciones ricas en ácidos grasos insaturados y compuestos fenólicos. Se emplearon diferentes disolventes de distinta polaridad (hexano, acetato de etilo, etanol y mezcla etanol:agua (1:1) bajo condiciones presurizadas, demostrando que la mezcla etanol:agua proporcionó el rendimiento global más alto. Los extractos obtenidos contenían proporciones significativas de ácidos grasos útiles desde el punto de vista nutricional y funcional, lo que demuestra la utilidad de PLE en la valorización de biomasa vegetal/litoral (Custodio et al., 2019).

La evaluación crítica de la extracción con líquidos presurizados frente a las técnicas clásicas revela una evolución tecnológica sustancial orientada a la eficiencia cinética y la sostenibilidad ambiental. El punto de referencia ha sido invariablemente el método Soxhlet, el cual se distingue por mantener la muestra en contacto repetido con disolvente fresco. Sin embargo, esta técnica tradicional presenta desventajas operativas notables, principalmente la extensa duración de los procesos que puede prolongarse desde 4 hasta 24 h para lograr recuperaciones exhaustivas. En contraste, la tecnología de fluidos presurizados logra rendimientos analíticos comparables o superiores en intervalos de

tiempo drásticamente reducidos, usualmente entre 10 y 20 min. Esta aceleración no es fortuita, sino consecuencia directa de la termodinámica del sistema, pues al trabajar con líquidos supercalentados se incrementa la difusividad y se disminuye la viscosidad, fenómenos que no pueden aprovecharse en un sistema Soxhlet limitado por el punto de ebullición del disolvente a presión atmosférica.

Otro aspecto diferenciador crucial es la protección de la integridad química de los analitos. Los métodos convencionales como la maceración o el Soxhlet operan generalmente en sistemas abiertos o expuestos a la presencia de oxígeno y luz durante largos periodos, lo que favorece reacciones de oxidación y fotodegradación en compuestos sensibles. La extracción presurizada, al ser un sistema automatizado y cerrado que purga el oxígeno mediante el uso de gas inerte, ofrece un ambiente protegido que preserva la identidad original de la muestra. Adicionalmente, el consumo de solventes orgánicos se reduce significativamente en el método presurizado, lo que no solo disminuye los costos asociados a la compra y gestión de residuos químicos, sino que alinea el trabajo de laboratorio con los principios de la "Química Verde".

Los estudios comparativos realizados por Triaux et al. (2021) y Olabinjo y Oliveira (2020) evidencian el potencial de la extracción con líquidos presurizados (PLE) como una técnica de extracción acelerada eficiente para la obtención de compuestos volátiles y bioactivos a partir de matrices alimentarias y vegetales. Triaux et al. (2021) compararon la hidrodestilación, la extracción con líquido presurizado y

el espacio de cabeza estático para la recuperación de terpenos y terpenoides en diversas especias y alimentos aromáticos, demostrando que el método de extracción influye de manera significativa en la composición cualitativa y cuantitativa de los extractos. Si bien el espacio de cabeza presentó las mayores concentraciones y los límites de detección más bajos, los autores destacan que la PLE permite una extracción eficaz de terpenoides bajo condiciones controladas de presión y temperatura, con ventajas operativas frente a la hidrodestilación convencional.

Por su parte, Olabinjo y Oliveira (2020) evaluaron el rendimiento de extracción y la actividad antioxidante del aceite esencial de cáscaras de naranja dulce obtenidos mediante PLE, Soxhlet e hidrodestilación. Los resultados mostraron que la PLE alcanza rendimientos moderadamente altos en tiempos de extracción reducidos y presenta la mayor capacidad antioxidante frente al radical DPPH, atribuida a la coextracción de compuestos fenólicos y taninos. En conjunto, estos trabajos confirman que la PLE se posiciona como una técnica de extracción acelerada capaz de optimizar el tiempo, el rendimiento y las propiedades funcionales de los extractos, permitiendo además ajustar las condiciones del proceso según la matriz y el objetivo analítico o tecnológico.

4.25 Turboextracción

La turboextracción, también denominada turbólisis, es una técnica de extracción sólido–líquido basado en la aplicación de altas fuerzas de cizallamiento mecánico mediante equipos de agitación de alta

velocidad, como los homogeneizadores tipo Ultra-Turrax (figura 76). El proceso se fundamenta en la generación de gradientes de velocidad elevados, que promueven la fragmentación progresiva del material vegetal, la ruptura de las paredes celulares y el incremento del área superficial efectiva, favoreciendo así la transferencia de masa hacia el disolvente.

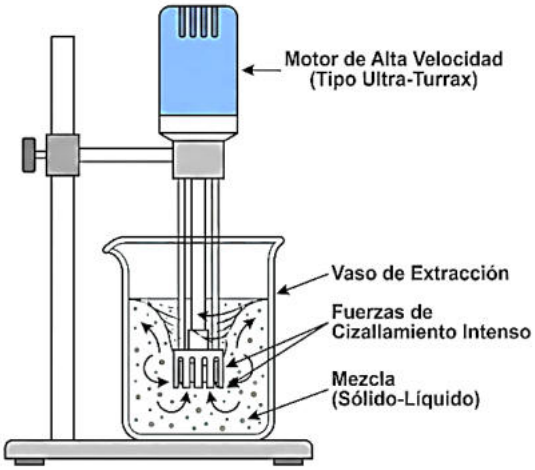


Figura 76. Esquema de turboextracción con homogeneizador de alto cizallamiento.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

La acción mecánica intensa mejora el contacto sólido–líquido y acelera la difusión de los metabolitos a través de las estructuras celulares dañadas, lo que se traduce en una liberación rápida de los compuestos bioactivos. Como resultado, se alcanzan tiempos de extracción del orden de minutos, con rendimientos comparables o superiores a los obtenidos mediante maceración dinámica u otros métodos convencionales, pero con menor duración del proceso y reducción de

la exposición prolongada a condiciones térmicas desfavorables.

Durante la operación se generan fenómenos de cavitación hidrodinámica, cuyo colapso contribuye adicionalmente a la disrupción celular, de manera análoga a lo observado en la extracción asistida por ultrasonido. No obstante, cuando el material vegetal presenta un grado de molienda adecuado, las diferencias en el rendimiento entre la extracción clásica y la turboextracción pueden resultar poco significativas.

4.26 Adecuación de la materia vegetal

La preparación adecuada de la muestra vegetal es un factor determinante para la eficiencia y reproducibilidad del proceso de turboextracción. Generalmente, el material vegetal se somete a secado controlado, con el objetivo de reducir la humedad hasta niveles que eviten la degradación microbiológica y enzimática, sin afectar la integridad de los metabolitos de interés. Un contenido de humedad elevado puede modificar la polaridad efectiva del disolvente y disminuir la eficiencia de extracción, mientras que una desecación excesiva puede provocar colapso estructural del tejido vegetal, dificultando la liberación de los compuestos bioactivos.

La humedad del material vegetal también está estrechamente relacionada con la estabilidad térmica y mecánica de los metabolitos especializados. Durante la turboextracción, las fuerzas de cizallamiento y la fricción mecánica pueden generar incrementos locales de temperatura, lo que resulta crítico para compuestos termolábiles. Un contenido de humedad adecuado puede actuar como amortiguador

térmico, reduciendo el riesgo de degradación, mientras que metabolitos con baja resistencia mecánica pueden verse afectados si no se optimizan las condiciones operativas del proceso.

El tamaño de partícula del material vegetal es otro parámetro clave en la preparación de la muestra. Aunque suele realizarse una molienda previa, la turboextracción se caracteriza por una reducción adicional del tamaño de partícula durante el proceso, debido a las fuerzas de cizallamiento aplicadas. Estudios reportan que partículas de tamaño intermedio son más adecuadas que partículas extremadamente finas, ya que estas últimas pueden incrementar la viscosidad del sistema, dificultar la transferencia de masa y complicar la separación sólido-líquido posterior, afectando la eficiencia global del proceso.

4.27 Selección de disolventes

La selección del disolvente en la turboextracción debe basarse en criterios fisicoquímicos y biológicos, considerando la naturaleza química de los metabolitos a extraer y la compatibilidad del disolvente con el método. Los disolventes más utilizados son el agua, el etanol y las mezclas hidroalcohólicas, debido a su capacidad para solubilizar una amplia gama de metabolitos especializados, su baja toxicidad y su aceptación en aplicaciones farmacéuticas y alimentarias.

Las mezclas hidroalcohólicas resultan particularmente adecuadas para la turboextracción, ya que permiten ajustar la polaridad del medio extractor y favorecen la extracción de compuestos polares y semipolares, como polifenoles, flavonoides y glucósidos. Además, estos disolventes presentan baja viscosidad y buena penetración en la

matriz vegetal, lo que optimiza la transferencia de masa bajo condiciones de alta agitación. En diversos estudios se ha observado que concentraciones intermedias de etanol (50–70 %) ofrecen un equilibrio óptimo entre rendimiento de extracción y selectividad.

Desde el punto de vista del mecanismo de extracción, la turboextracción favorece el uso de disolventes con alta capacidad de solvatación y rápida difusión, capaces de responder eficientemente a la liberación brusca de solutos inducida por la ruptura celular. Esto permite maximizar el rendimiento en tiempos cortos y minimizar la degradación de compuestos sensibles, lo que representa una ventaja significativa frente a métodos de extracción más prolongados.

4.28 Ventajas y limitaciones

La turboextracción presenta diversas ventajas que la convierten en una alternativa atractiva frente a métodos convencionales de extracción sólido–líquido. Una de las principales ventajas es la reducción significativa del tiempo de extracción, ya que la intensa acción mecánica permite alcanzar el equilibrio sólido–líquido en pocos minutos, en comparación con las horas requeridas por técnicas como la maceración estática o dinámica. Esta disminución del tiempo de proceso se traduce en una mayor productividad y eficiencia operativa.

Otra ventaja relevante de la turboextracción es su alta eficiencia de extracción, atribuida a la disrupción celular y a la reducción progresiva del tamaño de partícula durante el proceso, lo que incrementa el área de contacto y mejora la transferencia de masa. Este método ha demostrado ser especialmente eficaz para la extracción de metabolitos

polares y semipolares, como glucósidos, polifenoles y flavonoides, cuando se emplean disolventes como agua o mezclas hidroalcohólicas.

Desde el punto de vista operativo, la turboextracción ofrece la ventaja de requerir equipos relativamente simples y de fácil escalado a nivel de laboratorio y planta piloto, lo que permite su implementación en contextos académicos e industriales sin una inversión tecnológica excesivamente elevada. Además, al realizarse generalmente a temperatura ambiente, se reduce el riesgo de degradación térmica de compuestos termolábiles, preservando la calidad del extracto final.

No obstante, la turboextracción también presenta limitaciones que deben considerarse. La aplicación de altas fuerzas de cizallamiento puede provocar la degradación mecánica de ciertos metabolitos sensibles, especialmente cuando se emplean velocidades elevadas o tiempos de extracción prolongados, lo que hace necesario un control riguroso de las condiciones operativas. Además, la fricción mecánica puede generar incrementos locales de temperatura que, si no se controlan adecuadamente, podrían afectar la estabilidad de algunos compuestos bioactivos.

Otra desventaja importante es la posible formación de suspensiones altamente viscosas, particularmente cuando se utilizan tamaños de partícula muy finos o mayor uso de materia vegetal, lo que puede dificultar la separación sólido–líquido y aumentar la complejidad de las etapas posteriores de filtración o clarificación del extracto. Asimismo, al tratarse de un proceso discontinuo, la turboextracción puede presentar limitaciones en sistemas de producción continua a gran

escala, en comparación con métodos diseñados específicamente para operación continua.

4.29 Aplicaciones del método

Martins et al., (2017), emplearon este método para la extracción de glucósidos como el esteviósido y rebaudiósido A de hojas secas y en polvo de *Stevia rebaudiana,* una matriz vegetal rica en glucósidos diterpénicos de interés alimentario y farmacéutico. La extracción se llevó a cabo utilizando un homogeneizador tipo Ultra-Turrax bajo condiciones de alta velocidad de agitación 20,000 rpm, a temperatura de 23 °C, durante 18 min y empleando como disolvente una mezcla hidroalcohólica etanol-agua (EtOH 70%), seleccionada por su adecuada polaridad para este tipo de metabolitos, y manteniendo una relación del 10% de materia vegetal con respecto al disolvente. Los autores reportaron que la turboextracción permitió obtener rendimientos de 4,98 % para esteviósido y 2,70 % para rebaudiósido A, en tiempos significativamente menores en comparación con la maceración convencional, atribuyendo estos resultados a la eficiente disrupción celular y al incremento del área de contacto sólido-líquido generado por las fuerzas de cizallamiento del proceso.

Acorde a la investigación realizada por Mano-Sousa y colaboradores (2022), la turboextracción se perfila como una alternativa altamente eficiente para la obtención de compuestos bioactivos de *Cannabis sativa,* particularmente en contextos donde la producción local de extractos medicinales es limitada y los costos de importación resultan elevados. La evaluación comparativa frente a técnicas convencionales,

como la extracción ultrasónica, evidencia un desempeño superior de la turboextracción en términos de rendimiento de cannabinoides, especialmente cuando se emplea etanol como solvente. El uso de este disolvente no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que además se ajusta a los principios de sostenibilidad y a las recomendaciones internacionales para la reducción del uso de solventes tóxicos y ambientalmente persistentes. Con lo anterior se constata que este método no tradicional junto al uso de etanol, constituye una estrategia técnicamente sólida, económicamente accesible y ambientalmente responsable, capaz de facilitar el acceso a extractos de Cannabis con potencial aplicación medicinal.

En el estudio realizado por Kaiser et al. (2013) con la especie *Uncaria tomentosa* (uña de gato), se demuestra que los métodos de extracción comúnmente empleados pueden inducir fenómenos no deseados, como la isomerización de alcaloides oxindólicos, afectando la integridad química y, por ende, la actividad biológica de los extractos obtenidos. Los resultados ponen de manifiesto que la aplicación de fuerzas mecánicas elevadas y tiempos de contacto reducidos, contribuye a minimizar transformaciones estructurales de metabolitos sensibles. Este aspecto es particularmente relevante en el ámbito de la fitoquímica, donde la preservación del perfil cualitativo de compuestos bioactivos resulta crítica para la correcta caracterización química y farmacológica de las especies vegetales. En este contexto, la turboextracción se consolida como una técnica adecuada que favorece el desarrollo de metodologías más eficientes, selectivas y compatibles con los principios de calidad y estandarización exigidos en el estudio de productos naturales.

4.30 Otras técnicas de extracción no tradicionales

4.30.1 Extracción eléctrica o asistida por alto voltaje (HVED)

La extracción eléctrica o asistida por alto voltaje (HVED, siglas en inglés) es una técnica no térmica e innovadora que permite intensificar la extracción de metabolitos vegetales mediante la aplicación de pulsos eléctricos de alta energía en medios acuosos (figura 77). Su funcionamiento se basa en la ruptura dieléctrica del agua y la formación de un canal de plasma entre electrodos sumergidos, lo que da lugar a fenómenos simultáneos como ondas de choque, cavitación, turbulencia intensa y generación de especies reactivas. La acción combinada de estos efectos provoca una disrupción mecánica eficaz de paredes y membranas celulares, incrementando significativamente la permeabilidad del material vegetal y reduciendo las resistencias a la transferencia de masa en comparación con métodos convencionales.

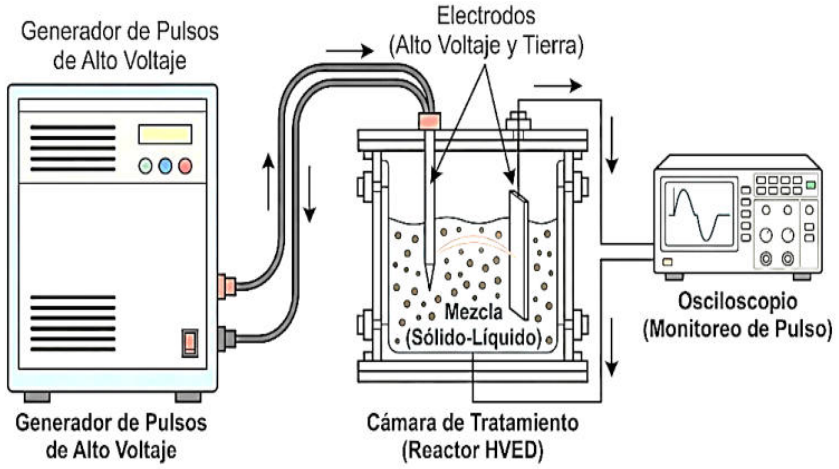


Figura 77. Sistema de extracción asistida por alto voltaje (HVED).

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

El proceso HVED se caracteriza por un impacto térmico global reducido, ya que, aunque se generan microzonas con temperaturas y presiones extremas durante las descargas, estas ocurren en intervalos muy breves, lo que limita la degradación de compuestos termosensibles. Esta condición favorece la obtención de extractos con mayor integridad química y actividad biológica. La técnica se aplica principalmente en sistemas discontinuos a escala de laboratorio, donde es posible un control preciso de los parámetros eléctricos, y su comportamiento puede considerarse análogo a una turboextracción intensificada en la que la energía eléctrica sustituye o complementa la agitación mecánica.

La selección del disolvente en HVED es un aspecto clave, ya que el proceso requiere medios conductores, generalmente agua o sistemas hidroalcohólicos. El uso de etanol u otros cosolventes permite ajustar la polaridad y mejorar la solubilidad de compuestos fenólicos y semipolares en general, al tiempo que se reduce el empleo de disolventes orgánicos tóxicos. En este sentido, la HVED se alinea con los principios de la Química Verde, especialmente cuando se combina con disolventes seguros y sostenibles.

Entre sus principales ventajas se destacan la elevada eficiencia de disrupción celular, la preservación de metabolitos termolábiles, la reducción del consumo de disolventes orgánicos y su compatibilidad con operaciones posteriores de separación y concentración. Sin embargo, su aplicación industrial presenta limitaciones asociadas al consumo energético, la complejidad del diseño del reactor y de los electrodos, la posible generación de reacciones oxidativas no deseadas

y los costos iniciales del equipamiento de alto voltaje. Por ello, su implementación a gran escala requiere una optimización cuidadosa de los parámetros operativos y una evaluación técnica y económica integral.

4.31 Extracción asistida por enzimas

La extracción asistida por enzimas (EAE, por sus siglas en inglés) es una tecnología novedosa de extracción que mejora la recuperación de compuestos bioactivos mediante la hidrólisis enzimática de la pared celular vegetal, incrementando la permeabilidad de la membrana plasmática y facilitando la liberación de componentes intracelulares. Las paredes celulares, constituidas principalmente por lignina, celulosa, pectinas y proteínas estructurales, confieren rigidez al tejido vegetal y, al mismo tiempo, actúan como una barrera para la extracción de metabolitos localizados en organelos como las vacuolas, plastidios o asociados al entramado polisacárido–lignina mediante enlaces de hidrógeno, lo que limita la eficacia de los métodos convencionales.

En la EAE se emplean enzimas como α-amilasa, celulasa, pectinasa y proteasa, cuya selección adecuada permite actuar de forma específica sobre los componentes estructurales de la pared celular y optimizar la liberación de metabolitos de interés. Diversos estudios han demostrado que esta estrategia posibilita la extracción de compuestos que no pueden recuperarse eficientemente mediante técnicas tradicionales, como se ha evidenciado en la obtención de polifenoles a partir de subproductos vegetales tras la degradación selectiva de pectinas, utilizando pectinasas.

Entre las principales ventajas de la EAE se destacan, las propias de los métodos no tradicionales: el menor consumo de disolventes, el carácter ambientalmente amigable del proceso y el empleo de condiciones suaves de operación, lo que contribuye a reducir el uso de solventes nocivos, acelerar el proceso extractivo y aumentar el rendimiento. No obstante, su aplicación a escala industrial presenta limitaciones asociadas al elevado costo de las enzimas, a requisitos específicos de control ambiental y a la disponibilidad comercial restringida de ciertos biocatalizadores, factores que condicionan su viabilidad económica y operativa.

La tendencia actual en la farmacognosia se orienta hacia la implementación de sistemas híbridos que integran la acción enzimática con tecnologías de intensificación de procesos, tales como la EAU (figura 78) o la EFS; estas combinaciones logran sinergias que optimizan los rendimientos extractivos y reducen significativamente los tiempos de operación. No obstante, la eficacia de estos procesos integrados está intrínsecamente ligada a un control riguroso de variables fisicoquímicas, especialmente el pH y la temperatura, para evitar la inactivación enzimática y asegurar que el pretratamiento biotecnológico se traduzca en una mayor pureza y estabilidad de los fitofármacos obtenidos.

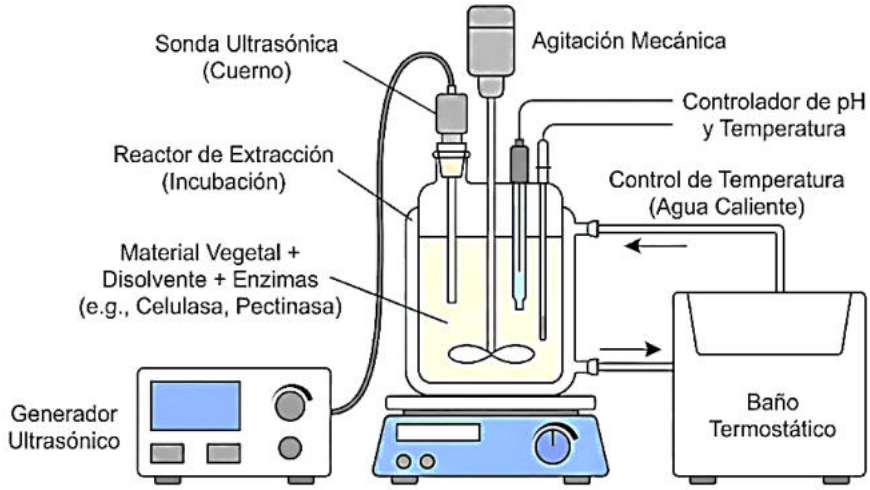


Figura 78. Sistema de extracción asistida por enzimas y ultrasonido.

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

Otros estudios han informado sobre nuevas tecnologías ecológicas, pero se han reportado pocos estudios y aplicaciones relacionadas. Dichas técnicas son: la extracción asistida por infrarrojos (EAI), la extracción flash (EF).

En la EAI, después de que la sustancia a extraer absorbe ondas de luz infrarroja, su energía fotónica interna se convierte en energía de vibración molecular o rotacional, lo que provoca un aumento de la temperatura interna de la sustancia y, por consiguiente, de la solubilidad del extracto objetivo (Xiang et al., 2022). En comparación con los métodos de extracción tradicionales, la EAI presenta una mayor tasa y eficiencia de extracción, así como un menor costo de inversión y consumo energético que otras tecnologías ecológicas. Sin embargo, no ofrece ninguna ventaja en la extracción de compuestos térmicamente inestables y puede desencadenar fácilmente diversas

reacciones químicas.

La EF es un método que utiliza fuerza de cizallamiento rotacional de alta velocidad y percolación molecular de gran movimiento para fragmentar rápidamente las materias primas vegetales en partículas, aumentando así considerablemente el área de contacto entre las materias primas y los disolventes, y mejorando la eficiencia de la extracción (Xiafei et al., 2021). Este método puede utilizarse para la extracción en condiciones normales de temperatura y es compatible con compuestos térmicamente inestables; sin embargo, es difícil lograr una producción industrial a gran escala. Aunque la EF no es estrictamente lo mismo que la turboextracción, tienen mucho en común. La denominación flash se utiliza cuando se quiere enfatizar la rapidez extrema del proceso, es decir la EF puede considerarse un caso particular de la turboextracción, diferenciándose principalmente por la duración del proceso y el enfoque operativo, más que por un principio físico distinto

Tabla 8. Técnicas de extracción más utilizadas en investigaciones fitoquímicas.

Técnica de extracción	Principio de operación	Ventajas	Desventajas / Limitaciones	Aplicaciones más frecuentes
Maceración	Contacto	Sencilla, bajo costo, no requiere equipos complejos, amplia aplicabilidad	Tiempo largo, bajo rendimiento, alto consumo de solvente	Extractos vegetales básicos, estudios fitoquímicos.
Percolación	Paso lento y continuo del solvente a través del material vegetal	Mayor eficiencia que maceración	Consumo elevado de solvente, proceso relativamente lento	Extractos concentrados, preparados farmacéuticos, para producciones a escala piloto o industrial
Digestión	Maceración	Aumenta la velocidad de extracción	Riesgo de degradación térmica y pérdida de compuestos volátiles	Drogas vegetales con metabolitos

Infusión	Contacto breve con solvente caliente	Rápida y simple	Extracción incompleta y riesgo de degradación térmica y pérdida de compuestos volátiles. Útil en compuestos polares	Preparaciones medicinales, tisanas
Decocción	Ebullición del material vegetal en agua	Adecuada para matrices duras	Riesgo de degradación térmica y pérdida de compuestos volátiles. Sólo para compuestos polares.	Para extracción de compuestos polares presentes en raíces, cortezas y semillas
Reflujo	Extracción continua con recuperación del solvente	Alta eficiencia,	No apta para compuestos sensibles al calor.	Investigación fitoquímica, para la extracción de compuestos

Soxhlet	Extracción	Alta eficiencia,	No apta para compuestos sensibles al calor	Metabolitos poco polares y termorresistente

Tabla 9. Técnicas de extracción más utilizadas en investigaciones fitoquímicas.

Técnica de extracción	Principio de operación	Ventajas	Desventajas / Limitaciones	Aplicaciones más frecuentes
Hidrodestilación	Volatilización condensación	No usa solventes orgánicos	Sólo para compuestos volátiles, degradación térmica	Aceites esenciales
Extracción asistida por ultrasonido (EAU)	Cavitación ultrasónica que rompe paredes celulares y mejora la difusión	Rápida, ahorro de solvente, baja temperatura o controlada	Escalado industrial limitado	Extracción de diversos metabolitos, sobre todo si son termolábiles.
Extracción asistida por microondas (EAM)	Calentamiento dieléctrico interno del material vegetal y ruptura celular	Alta eficiencia, tiempos cortos	Riesgo térmico	Extracción de metabolitos polares
Extracción	Solvatación selectiva con fluidos en estado supercrítico (CO_2)	Sin residuos, alta pureza	Equipos costosos, no aplica para compuestos polares	Aceites esenciales y aromas
Extracción	Uso de solventes a alta presión y temperatura	Alta eficiencia, menor tiempo	Posible degradación térmica	Metabolitos de alto valor

Turboextracción	Cizallamiento mecánico de alta velocidad	Muy rápida, alto rendimiento	Difícil escalado industrial	Extractos farmacéuticos y nutracéuticos
Extracción eléctrica	Electroporación	Bajo calentamiento, alta eficiencia	Equipos especializados, alto costo	Extractos farmacéuticos y nutracéuticos

Nota: Los metabolitos considerados como de alto valor son aquellos que poseen una alta demanda comercial**,** precio elevado por unidad de masa y, generalmente, baja concentración natural o procesos de extracción/purificación complejos**.**

4.32 Elementos de cierre del capítulo

1. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre los métodos de extracción convencionales y los no tradicionales en términos de sostenibilidad?

Los métodos tradicionales (maceración, Soxhlet, etc.) suelen requerir tiempos prolongados y grandes volúmenes de solventes generalmente orgánicos. Los métodos no tradicionales se alinean con la "Química Verde", ya que buscan reducir el consumo de disolventes, minimizar el tiempo de operación, disminuir el gasto energético y mejorar la selectividad, protegiendo la integridad de los compuestos.

2. Explique el fenómeno de "cavitación acústica" y a qué técnica de extracción está asociado.

Está asociado a la extracción asistida por ultrasonido (EAU). Consiste en la formación, crecimiento y colapso implosivo de microburbujas en el disolvente debido a ondas de presión. Este colapso cerca de la superficie vegetal genera microchorros y ondas de choque que rompen mecánicamente las paredes celulares, facilitando la liberación de los metabolitos al medio.

3. En la extracción asistida por microondas (EAM), ¿cuáles son los dos mecanismos principales mediante los cuales se genera el calentamiento interno de la muestra?

Los mecanismos son la rotación dipolar (alineación de moléculas polares con el campo electromagnético) y la conducción iónica (movimiento de iones en la solución). Ambos procesos generan calor por fricción interna, provocando el aumento de la presión de vapor dentro de la célula, hasta causar su ruptura.

4. ¿Por qué el dióxido de carbono (CO_2) es el solvente más utilizado en la extracción por fluidos supercríticos (EFS)?

Por sus propiedades fisicoquímicas ideales: tiene una temperatura crítica baja (31.1 °C), lo que protege compuestos termolábiles; es químicamente inerte, no tóxico, no inflamable, económico y se elimina fácilmente al reducir la presión, dejando un extracto libre de residuos de solvente.

5. Defina el estado de "fluido supercrítico" y mencione qué ventaja ofrece en términos de transferencia de masa.

Es un estado de la materia que ocurre cuando una sustancia supera su

presión y temperatura críticas, adquiriendo una densidad similar a la de un líquido (alta solvatación) y una viscosidad y difusividad similares a las de un gas (alta penetración en la matriz). Esto permite una extracción rápida y eficiente.

6. ¿En qué consiste la turboextracción y cuál es su principal ventaja mecánica?

Es una técnica que utiliza fuerzas de cizallamiento de alta velocidad mediante una hélice o agitador de alta revolución (vórtice). Su ventaja es que combina la reducción simultánea del tamaño de partícula de la droga vegetal con la agitación vigorosa, lo que maximiza el área de contacto y acelera drásticamente la transferencia de solutos.

7. ¿Cuál es el papel de las enzimas en la extracción asistida por enzimas y qué tipo de compuestos se suelen recuperar con este método?

Las enzimas (como celulasas, pectinasas o proteasas) actúan degradando o hidrolizando los polímeros de la pared celular (celulosa, pectina, lignina) que retienen los metabolitos. Se utiliza frecuentemente para recuperar aceites esenciales, polifenoles y pigmentos atrapados en matrices vegetales complejas.

8. Explique el principio de la extracción mediante descargas eléctricas de alto voltaje (HVED).

Se basa en la aplicación de pulsos eléctricos breves que inducen la formación de poros en la membrana celular (electroporación) o la ruptura física de la estructura mediante ondas de choque mecánicas y

fragmentación química, facilitando la difusión de los compuestos internos hacia el solvente.

9. ¿Qué limitaciones económicas y técnicas enfrentan actualmente estas tecnologías para su implementación masiva?

Las principales limitaciones incluyen la alta inversión inicial en equipos sofisticados, la complejidad técnica del escalado industrial (pasar del laboratorio a la producción a gran escala) y la necesidad de personal altamente capacitado para controlar parámetros operativos críticos y evitar la degradación de los extractos.

10. De acuerdo con lo analizado en relación a cada método de extracción no tradicional, ¿para qué tipo de metabolitos son especialmente eficaces estas técnicas?

Son especialmente eficaces para la obtención de metabolitos de alto valor biológico como polifenoles, flavonoides, alcaloides, terpenos y carotenoides, especialmente cuando estos son sensibles a la oxidación o a las altas temperaturas de los métodos convencionales. Aunque técnicamente estas herramientas pueden aplicarse a casi cualquier matriz vegetal, no son "universales" en términos de eficiencia. La elección depende de la constante dieléctrica de la mezcla y la polaridad del metabolito objetivo: Por ejemplo:

- Selectividad por polaridad: La EFS con CO_2 puro es excelente para compuestos lipofílicos (grasas, ceras, terpenos). Para extraer metabolitos polares como glucósidos o saponinas, se requiere añadir codisolventes (modificadores) como etanol o metanol, lo

que altera la selectividad del proceso.

- Afinidad por el disolvente (EAM): La extracción por microondas requiere que el solvente o la matriz vegetal tengan moléculas polares capaces de vibrar con el campo electromagnético. Si se intenta extraer un compuesto no polar usando un solvente no polar (como hexano) en EAM, la eficiencia será nula a menos que se use un material absorbente intermedio.

- Integridad estructural: Para macromoléculas como proteínas o enzimas (en aplicaciones biotecnológicas), la EAU a baja potencia son preferibles, ya que el calor generado por las microondas podría desnaturalizar las estructuras cuaternarias.

En resumen, la preferencia no está dada solo por el metabolito, sino por la naturaleza fisicoquímica de la matriz vegetal. Mientras que el ultrasonido es quizá la técnica más versátil por su efecto mecánico de cavitación, el fluido supercrítico es la más selectiva y limpia para compuestos de baja polaridad.

CAPÍTULO V

5 SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS EN LA EXTRACCIÓN DE METABOLITOS ESPECIALIZADOS

El concepto de mezclas eutécticas, donde una mezcla de compuesto tiene un punto de fusión más bajo que los de sus componentes individuales, ha sido conocido por un largo tiempo. A inicios del siglo XXI, Abbott y colaboradores descubrieron que ciertas mezclas de sales orgánicas y donadores de hidrógeno (como urea o ácidos carboxílicos) podrían formar líquido en temperaturas relativamente bajas (80-100°C). Estas fueron denominadas solventes eutécticos profundos (DES o *Deep Eutectic Solvent*), una familia de disolventes flexibles y ecológicamente amigables. Los DES son un posible sustituto para los disolventes orgánicos convencionales debido a que son fácilmente sintetizados desde sustancias naturales. Líquidos con bajo punto de fusión con características fisicoquímicas ajustables son producidos vía combinaciones eutécticas de donadores de enlaces de hidrógeno (HBD) y aceptores de enlaces de hidrógeno (HBA), dando como resultado DES, los cuales tienen propiedades fisicoquímicas ajustables. DES son naturalmente biodegradables, relativamente seguros y sostenibles, lo cual los convierte en una excelente elección para síntesis ecoamigables de materiales sofisticados y extracción de productos bioactivos. DES en combinación con otros métodos de extracción constituyen una estrategia poderosa para incrementar tanto la selectividad como el rendimiento en la obtención de metabolitos especializados útiles desde fuentes naturales.



Figura 79. Disolventes eutécticos profundos (DES).

Fuente: Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

5.1 Fundamentos de disolventes eutécticos profundos (DES)

Los disolventes eutécticos se forman cuando dos o más componentes sólidos, un aceptor de enlace de hidrógeno (*Hydrogen Bond Acceptor*, o HBA por sus siglas en inglés) y un donante de enlace de hidrógeno (*Hydrogen Bond Donor*, o HBD) se combinan en una proporción molar específica que da lugar a una reducción de sus puntos de fusión. Este fenómeno es conocido como efecto eutéctico y permite que la mezcla permanezca en estado líquido a temperaturas de fusión inferiores a las de sus componentes individuales. Cuando esta reducción del punto de fusión es considerable, el disolvente resultante se denomina disolvente eutéctico profundo (DES o *Deep Eutectic Solvent*).

Los DES fueron reportados por primera vez en 2003 de acuerdo a Abbott et al. quienes estudiaron las propiedades de mezclas 1:2 de

cloruro de colina (ChCl) (un HBA) y urea (un HBD). El punto de congelación de esta mezcla eutéctica fue reportado de 12 °C, que es considerablemente inferior al de sus constituyentes (Nota: los puntos de fusión de cloruro de colina y la urea son 302 y 133 °C, respectivamente), propiedades que permite utilizar la mezcla como disolvente a temperatura ambiente (Figura 80).

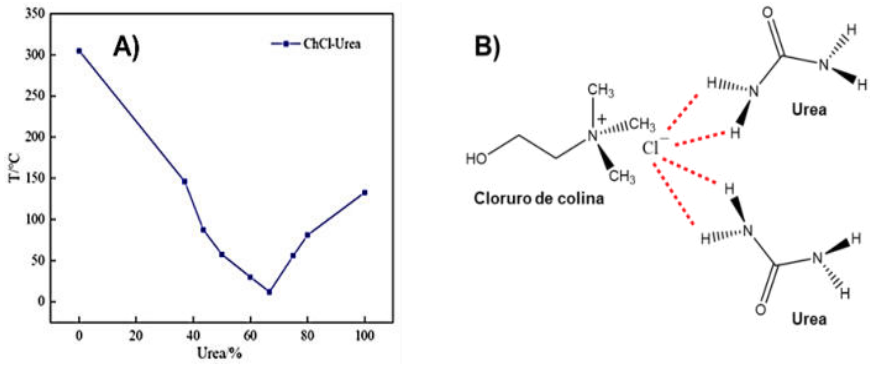


Figura 80. A) Dependencia del punto de congelación con la proporción molar para diferentes mezclas eutécticas de cloruro de colina con urea.

Fuente: Tomado de Niu et al. (2022) y B) Esquema de la interacción entre cloruro de colina y urea.

A diferencia de los líquidos iónicos, que se componen exclusivamente de iones y requieren procesos de síntesis y purificación complejas, los DES suelen ser sintetizados mediante una mezcla simple y condiciones de calentamiento suaves, lo que los hace menos costosos, escalables para aplicaciones industriales y "amigables" con el medio ambiente.

Los disolventes eutécticos tienen ventajas no sólo en sus procesos de preparación, sino también en que sus propiedades fisicoquímicas son modulables. Al ser fabricados utilizando distintas proporciones

molares de HBA y HBD, se pueden diseñar disolventes con características específicas en propiedades de interés industrial como viscosidad, polaridad, hidrofilicidad o hidrofobicidad. Entre los HBA más comunes utilizados para preparar DES se encuentran las sales de amonio cuaternario, como la betaína, la acetilcolina y el ya mencionado cloruro de colina. Por otro lado, los HBD más comunes en estas síntesis pueden variar desde amidas como urea o acetamida, hasta ácidos carboxílicos como ácido malónico, ácido cítrico, así como alcoholes (glicerol o etilenglicol), azúcares (fructosa, glucosa, xilitol) y aminoácidos. Esta versatilidad permite crear disolventes para tareas específicas adaptados a procesos químicos concretos, como la extracción, la catálisis o las aplicaciones electroquímicas.

Una de las áreas en la que encontramos mayor aplicación de los DES es en la química verde, en la que se utilizan como medios de reacción para síntesis orgánica e inorgánica. En este tipo de reacciones se obtienen altos rendimientos, buena selectividad y se minimizan los residuos generados en dichos procesos. Por otro lado, en el tratamiento de biomasa, los DES han demostrado alta eficacia en la deslignificación de materiales lignocelulósicos y en la extracción de compuestos de valor agregado como la celulosa, la hemicelulosa y los aceites esenciales. Además, se emplean en productos farmacéuticos para la solubilización de fármacos y en química analítica como disolventes de extracción en técnicas de preparación de muestras como la extracción líquido-líquido.

Los DES pueden ser descritos de acuerdo a la siguiente fórmula general $Cat^{+}X^{-}_{z}Y$ donde: Cat^{+} es en principio cualquier catión de

amonio, fosfonio, o sulfonio. X es una base de Lewis, generalmente un anión halogenuro. El complejo de especies aniónicas está formado entre X^- y un ácido de Lewis o de Brønsted representado con Y (*z* se refiere al número de moléculas que interactúan con el anión) (Tabla 1).

Para facilidad de comprensión Cat^+X^- es la especie aceptora de enlaces de hidrógeno (HBA), y Y es la especie donadora de enlaces de hidrógeno (HBD). Uno de los Cat^+X^- más utilizado en aplicaciones prácticas es el cloruro de colina ChCl.

En resumen, los DES representan una clase de disolventes sostenibles que combinan simplicidad, seguridad y funcionalidad. A medida que la comunidad científica mundial avanza hacia prácticas más sostenibles, los disolventes eutécticos se están convirtiendo en la alternativa de primera elección en muchos procesos como los descritos anteriormente**.**

Tabla 10. Fórmulas generales para la clasificación de DES.

Tipo	Fórmula General	Términos	Ejemplo
Tipo I	$Cat^+X^-zMCl_x$	M = Zn, Sn, Fe, Al, Ga, In	ChCl + $SnCl_2$
Tipo II	$Cat^+X^-zMCl_x.yH_2O$	M = Cr, Co, Cu, Ni, Fe	ChCl + $FeCl_3.6H_2O$
Tipo III	Cat^+X^-zRZ	R = porción orgánica Z = $CONH_2$, COOH, OH	ChCl + Urea

Tipo IV	$MCl_x + RZ = MCl_{x-1}^{+} \cdot RZ + MCl_{x+1}^{-}$	M = Al, Zn R = porción orgánica Z = $CONH_2$, OH	$ZnCl_2$ + Urea

Un subconjunto de los DES, los disolventes eutécticos naturales profundos (NADES) son una clase de disolventes ecológicos que presentan alta selectividad, baja toxicidad y respeto al medio ambiente, lo que los hace adecuados para diversas aplicaciones en campos como la revalorización de lodos activados provenientes de aguas residuales, producción de biodiésel, biorremediación de suelo, el desarrollo de sensores, procesamiento de alimentos, fabricación de celulosa, así como en electroquímica. Los NADES son un tipo específico de DES cuyos componentes se derivan de fuentes naturales como azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos y cloruro de colina. Los NADES han evolucionado a partir de estudios iniciales sobre los DES y ahora se reconocen como una clase distinta de disolventes ecológicos derivados de componentes naturales y renovables. Se forman mediante la combinación de HBD y HBA, presentes a menudo en organismos vivos, para crear una mezcla líquida a temperaturas relativamente bajas. Esta evolución se debe a la necesidad de disolventes más respetuosos con el medio ambiente y sostenibles en diversas aplicaciones.

Los NADES son un tema de actualidad en la química verde. Estos disolventes presentan alta capacidad de solubilización, reutilización, propiedades ajustables, preparación sencilla, biodegradabilidad, seguridad, alta disponibilidad y bajo coste de las materias primas para

sintetizarlos, lo que los convierte en excelentes candidatos para aplicaciones analíticas. Cabe mencionar que estos DES se diseñan y sintetizan de acuerdo a una aplicación específica, por esta razón no hay mezclas DES disponibles comercialmente. A lo largo de este capítulo se usará el término DES para referirse tanto a NADES como a DES.

5.1.1 Síntesis y preparación de DES/NADES

Los componentes esenciales de DES/NADES se encuentran disponibles comercialmente. Por lo general, se tratan al vacío o a alta temperatura para la eliminación del agua antes de su uso. La preparación de DES consiste en suministrar los componentes HBA/HBD en una proporción determinada y establecer la entropía de mezclado en la matriz mediante tratamientos de calentamiento o homogeneización. Como se ha indicado antes, tanto DES como NADES se sintetizan típicamente combinando HBA común (es decir, cloruro de colina, betaína y diversas sales de amonio) y HBD [es decir, urea, azúcares, ácidos orgánicos (como ácido cítrico y ácido láctico) y polioles (como glicerol y etilenglicol)], mediante calentamiento y agitación, o mediante otros métodos como la ultrasonicación o la irradiación por microondas. El proceso consiste en mezclar los componentes, a veces con una pequeña cantidad de agua, y calentar hasta obtener un líquido transparente y homogéneo. El método y las condiciones específicas dependen de las propiedades deseadas y de los componentes utilizados.

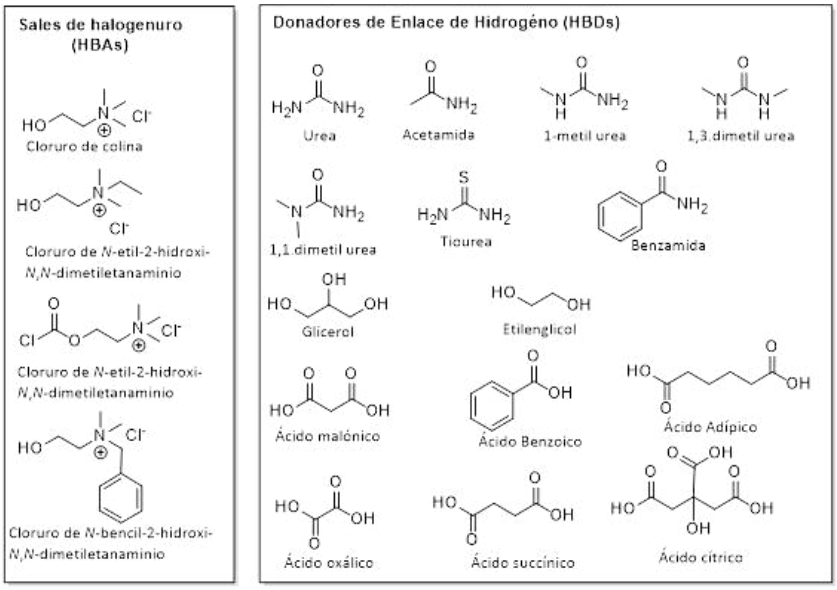


Figura 81. Estructuras de las sales de halogenuro (HBAs) y donadores de hidrógeno (HBDs) utilizados en la síntesis de DES.

Los métodos de síntesis más comunes son:

(i) Calentamiento y agitación: Este es un método simple y ampliamente utilizado en el que los componentes se mezclan y calientan (generalmente en un baño de agua) mientras se agita hasta que se forma una solución transparente

(ii) Ultrasonido: El uso de ondas ultrasónicas para asistir en el proceso de mezcla puede acelerar la formación de los DES

(iii) Irradiación por microondas: La aplicación de energía de microondas también puede ser una forma eficiente de sintetizar DES

(iv) Molienda mecánica: Algunos NADES pueden prepararse moliendo los componentes en un mortero.

(iv) Mecanosíntesis. Aunque este método no es usual combinado con DES, Rubin y colaboradores (2021) reportaron el uso de una nueva síntesis ecológica y eficiente de polímeros de betaciclodextrina (βCD), basada en la combinación de mecanoquímica NADES. Los NADES representan un sustituto ecológico de los disolventes a base de aceite, pero presentan ciertas criticidades intrínsecas en su uso y producción, principalmente relacionadas con las dificultades técnicas de mezclar reactivos sólidos para obtener un líquido de alta viscosidad. Además, las síntesis de polímeros βCD reportadas se realizan al vacío, lo que constituye una limitación importante para un posible escalado de la reacción.

Entre los factores que influyen en la síntesis, podemos mencionar:

(a) Relación de componentes: La relación molar de HBD y HBA afecta significativamente las propiedades de los DES resultantes

(b) Temperatura: La temperatura y la duración del calentamiento afectan la reacción y el producto final, y

(c) Presencia de agua: Añadir una pequeña cantidad de agua a veces puede ser beneficioso para la síntesis y puede influir en las propiedades.

5.1.2 Propiedades físicoquímicas de los DES/NADES

Los DES presentan propiedades fisicoquímicas únicas como densidad, temperatura de fusión (1.3.1), densidad (1.3.2), viscosidad (1.3.3), tensión superficial (1.3.4), conductividad (1.3.5), y polaridad (1.3.6). Debido a que es posible producir DES “a la medida” utilizando

diferentes proporciones molares de HBA/HBD, es decir que se puede personalizar un DES de acuerdo a las aplicaciones buscadas. Además de la proporción molar, las propiedades fisicoquímicas pueden ser afectadas por la pureza de HBA/HBD, así como el contenido de humedad, el método y la temperatura de preparación. Las propiedades de los DES no solo sirven para caracterizarlos, sino que son útiles para diseñar las operaciones unitarias en procesos industriales.

Existen pocos estudios que han tratado de comprender el comportamiento como fluidos de líquidos iónicos y DES. Sin embargo, como una forma de aproximarse a este comportamiento se utilizan modelos que toman en cuenta el movimiento de los iones en alta temperatura de los líquidos iónicos que pueden ser considerada sales fundidas. Además, otro aspecto que se ha considerado es la observación a nivel experimental, que tanto el volumen líquido (espacio ocupado por las moléculas de HBA/HBD) como el volumen libre del líquido (espacio vacío en un líquido que no está ocupado por moléculas) aumentan de tamaño cuando una sal se encuentra en estado fundido. Considerando todo lo anterior, la teoría de huecos propone que, en estado fundido, un material iónico contiene espacios vacíos que se originan a partir de fluctuaciones térmicamente generadas en la densidad local. Los huecos se distribuyen aleatoriamente en tamaño y localización, y están sometidos a un constante flujo. El radio característico de los vacíos promedio (r) se encuentra correlacionado con la tensión superficial del líquido Υ, mediante la siguiente ecuación (ec. 1):

$$4\pi r^2 = \frac{3.5kT}{\gamma}$$ Ec. 1

Donde k es la constante de Boltzman y T la temperatura absoluta.

El tamaño promedio de los huecos en sales fundidas es de dimensiones similares a las de los iones correspondientes, de modo que es relativamente fácil para un ión pequeño moverse dentro del sitio vacante. De esta manera la teoría de huecos describe el comportamiento de los DES como fluidos.

5.1.3 Temperatura de fusión (T_f)

Un DES es un líquido que proviene de la combinación de dos sólidos. Este líquido se caracteriza por un menor punto de congelación que el de sus componentes individuales. Esto no significa que todos los DES sean líquidos a temperatura ambiente, sin embargo, todos los DES conocidos presentan puntos de fusión por debajo de 150 °C. En un trabajo de Smith y colaboradores (2014) afirman que cuanto más fuerte es la capacidad de formar enlaces de hidrógeno entre el HBA y HBD, más bajo será el punto de fusión. Usando un mismo HBA se pueden obtener DES con puntos de congelamiento por debajo de la temperatura ambiente (25° C), sólo haciendo cambios en el HBD utilizado para la mezcla, por ejemplo: Al combinar cloruro de colina, con diferentes HBD (urea, glicerol, ácido malónico, D-Sorbitol). De manera análoga, para un HBD en específico se puede variar ampliamente el punto de congelamiento combinándolo con diferentes HBA. Por ejemplo para la urea (un HBD), usando una proporción molar de 2:1 con diferentes HBA, se han conseguido DES con puntos

de congelamiento en un rango de entre -38 y 113 °C usando cloruro de *N*-etil-2-hidroxi-*N,N*-dimetiletanaminio y bromuro de tetraetilamonio, respectivamente. Así mismo, diferentes proporciones molares para una mezcla con las mismas proporciones de HBA/HBD, puede generar DES con diferentes puntos de congelamiento.

5.1.4 Densidad

Los valores de densidad de los DES oscilan entre 1,0 y 1,3 g/cm^3. Los DES basados en cloruro de colina muestran valores de densidad que alcanzan hasta 1.6 g/cm^3. Los DES que tienen sales metálicas tienen densidades entre valores de 1,3-1,6 g/cm^3. Durante la preparación de DES adicionando soluciones de HBD sobre soluciones de HBA, el tamaño promedio de los huecos cambia, resultando de esta forma en un cambio también en la densidad. Se puede afirmar que la densidad de un DES puede ser el resultado de la dinámica de interacciones intermoleculares y volumen libre en el DES.

Existen, al menos, tres factores que influencian directamente la densidad de un DES, y son:

1) *La naturaleza de HBD:* La cantidad de grupos $^-$OH en un HBD ocasiona que este forme mayor número de enlaces de hidrógeno con los HBA, escenario que ocasiona una reducción en el volumen libre, aumentando la densidad. Otro factor de origen similar que afecta la densidad de los DES es la longitud de la cadena en el caso de que el HBD sea un diácido. Un incremento en la longitud de cadena da lugar a una reducción de la densidad. Por ejemplo, para un diácido C2 cómo lo es el ácido oxálico la

densidad está en 1,259 g/cm^3, mientras que el ácido C5 como lo es el ácido glutárico la densidad tiene un valor de 1,188 g/cm^3.

2) *La relación molar de HBA a HBD*. La relación molar o composición de HBA:HBD puede ser usada para manipular la densidad de DES. Por ejemplo, se conoce que para una serie de DES en base de ChCl:Ácido cítrico la densidad aumenta a medida que aumenta la proporción del ácido cítrico y disminuye a medida que aumenta la proporción de ChCl.

3) *La temperatura*: Como es usual en líquidos no eutécticos, también la densidad de los DES disminuye cuando aumenta la temperatura, debido, principalmente, a la expansión térmica y movimiento molecular.

5.1.5 Viscosidad

La viscosidad es una medida de la fricción interna o resistencia que experimenta un fluido en movimiento, también se define como la resistencia de un fluido a la deformación a una determinada velocidad de cizalladura. Si un DES puede ser aplicado como medio de reacción, la viscosidad es una propiedad determinante para la selección de un DES a nivel industrial, debido a los fenómenos de transporte de masa y energía que se requieren para diseñar los procesos.

La mayoría de los DES estudiados tienen viscosidades superiores a 100 cP, valor mayor que el del agua a temperatura ambiente. Es importante indicar que los valores de viscosidad determinados para los DES con la misma composición tienen discrepancias entre ellos. Esto

se ha atribuido a: 1) a diferentes metodologías experimentales para determinar la viscosidad; 2) diferencias en la preparación de los DES y 3) la presencia de impurezas.

El principal factor para que los DES tengan una viscosidad mayor a la del agua podría estar relacionado a la presencia de interacciones de enlace de hidrógeno de forma extensiva entre los componentes. La densa red de DESs reduce el movimiento de especies libres en el DES. Para que los DES sean aplicados como disolventes verdes requieren disminuir su viscosidad. Otros aspectos que hacen que los DES tengan alta viscosidad son:((i) interacciones electrostáticas o de Van der Waals, (ii) el gran tamaño de los iones, y los bajos valores de volúmenes de espacios vacíos y (iii) el volumen libre.

La viscosidad de los DES depende de cuatro factores:

1) La naturaleza de los componentes HBA y HBD de los DESs: Por ejemplo, en DESs con el mismo HBA cloruro de colina ChCl el valor de la viscosidad cambia dependiendo del HBD con que se combine, si es etilenglicol en una relación HBA:HBD 1:4 toma valores por debajo de 100 cP a 20 °C, pero si prepara utilizando como HBD un monosacárido como el sorbitol la viscosidad toma valores de 12 730 cP a 30 °C, en una relación HBA:HBD 1:1.

2) Proporción molar HBA:HBD. Los valores de viscosidad disminuyen a medida que aumenta la proporción de HBD

3) El contenido de agua en el DES. La viscosidad disminuye si el contenido de agua es mayor.

4) La temperatura. En general al aumentar la temperatura la viscosidad disminuye, DESs con altas viscosidades pueden ser utilizados en altas temperaturas.

5.1.6 Tensión superficial

La tensión superficial en un DES es muy alta y es fuertemente dependiente de la intensidad de las fuerzas intermoleculares entre HBDs y HBAs. En general, los DESs presentan valores de tensión superficial mayores a los de los disolventes tradicionales, y similares a los valores de los líquidos iónicos. La tensión superficial en los DES aumenta a medida que disminuye la temperatura. Con respecto a la proporción molar de HBA a menor proporción de este en el DES, se obtendrá una mayor tensión superficial debido al debilitamiento de los enlaces de hidrógeno del HBD. La naturaleza del catión en HBA afecta la tensión superficial notablemente. Por ejemplo, si se compara la longitud de la cadena en los DESs formados sales de amonio cuaternario/glicerol se tienen valores de 52 y 46 mN/m^2 para cloruro de tetrabutilamonio/glicerol y bromuro de tetrapropilamonio/glicerol, respectivamente.

5.1.7 Conductividad

La conductividad iónica para los DES es relativamente baja con valores menores a 1 mS/cm a temperatura ambiente, para la gran mayoría de los mismos. Para DESs donde el HBD es etilenglicol o imidazol y el HBA cloruro colina tienen conductividades más altas, 7,81 mS/cm a 20 °C y 12 mS/cm a 60 °c, respectivamente. Esto debido a su baja viscosidad (Ramon & Guillena, 2020). La relación entre

conductividad iónica y la viscosidad en un DES es inversamente proporcional, a mayor viscosidad la movilidad iónica está restringida. La conductividad iónica puede modularse cambiando las proporciones molares de HBA y HBD.

5.1.8 Polaridad

Esta propiedad no ha sido estudiada ampliamente para los diferentes DES. Algunos autores han determinado esta propiedad utilizando sondas electrocrómicas, como la betaína pigmento 33. Con este pigmento determinan el factor ET (30). Un valor alto de ET (30) indica que el disolvente es más polar. Para DESs compuestos de ChCl/úrea (1:2), ChCl:glicerol (1:2) y ChCl/etilenglicol (1:1) se han encontrado valores de ET (30) superiores a los de alcoholes de cadena corta.

5.2 Aplicaciones de los DES/NADES en la extracción de metabolitos especializados

5.2.1 Polifenoles totales

En este primer ejemplo se evaluó la eficiencia de extracción de fenoles totales de las cáscaras de toronja, utilizando diversos DES basados en el HBA ácido láctico, donde el DES a base de ácido láctico:glucosa permitió que la extracción aumentará en un factor de 1,3 con respecto a la extracción con agua y de 1,1 con respecto a etanol al 50%. Lo más notable es el aumento en la extracción del flavonoide naringina con un factor de 3,24 veces mayor con el DES ácido láctico:glucosa (1,864 ± 0,079 g/100 g materia seca) con respecto al agua (0,575 ± 0,040 g/100 g materia seca). Estudios similares usando como sustrato cáscara de

naranja y DES basado en ChCl también demostraron una gran eficiencia en la extracción de compuestos bioactivo.

Por otro lado, para la extracción de compuestos polifenólicos del aceite de oliva se ha utilizado DES con base ChCl como HBA combinado con azúcares, alcoholes, ácidos orgánicos, y urea, como HBD. Aquellos con mayor actividad biológica, oleaceina y oleocantal, se extrajeron con un incremento del 20-33% y del 67,9-68,3% al utilizar los DESs de ChCl/xilitol (relación molar 2:1) and ChCl/1,2-propanodiol (relación molar 1:1), con respecto a la extracción utilizando una la mezcla de metanol 80% v/v. Comparando los tres sistemas de extracción se tienen los siguientes valores para polifenoles totales: 189,7 ± 13,4, 139,7 ± 13,6 y 139,6 ± 3,1 mg/kg para ChCl/xilitol, ChCl/1,2-propanodiol y metanol 80% v/v, respectivamente.

Las hojas de la morera blanca son utilizadas en varios países de Asia en el campo de la medicina tradicional y se ha encontrado que poseen actividad antihiperglucémica, antiinflamatoria, y antimicrobiana. En un estudio se probaron un total de 12 de tipos de DES basados en cloruro de colina, betaina, y L-prolina como HBA; y urea, etilenglicol, glicerol, ácido cítrico, ácido DL-málico, ácido láctico y ácido levulínico, como HBD. Esto para la extracción de compuestos fenólicos de las hojas antes mencionadas, obteniéndose el mejor rendimiento de extracción con el DES de cloruro de colina:ácido cítrico con respecto a la extracción con metanol (método clásico), con valores de 22,66 mg/g y 15,29 mg/g, respectivamente. La eficiencia de extracción de diferentes disolventes para este sistema procede de la

siguiente forma: DES basados en ChCl> DESs basados en betaína≈MeOH> DESs basados en prolina > agua. Otros DES basados en ChCl han sido usados como mejoradores de liofilización de tirosol e hidroxitirosol, entre otros compuestos bioactivos.

Un método alternativo basado en NADES para extracción de ácidos fenólicos (y de otros compuestos bioactivos especiales) a partir de sustratos de *Quercus suber* (corcho) fue reportado por Freitas et al. (2022). Los resultados revelaron mayores rendimientos de extracción al utilizar NADES en lugar de disolventes agresivos como el dioxano. El proceso de extracción se rige por diversos parámetros fisicoquímicos, como el pH, la polaridad, la viscosidad y la densidad, así como por el método de extracción. Los NADES ácidos, compuestos de ácido láctico y glicerol o citrato de sodio, extrajeron una mayor cantidad de compuestos aromáticos, terpenoides, ácidos grasos y sus derivados. Las mezclas eutécticas más básicas, compuestas de lactato de sodio y un poliol (etilenglicol o glicerol), extrajeron predominantemente compuestos polares de bajo peso molecular. La gama de extractos que abarcan los NADES desarrollados, junto con su no toxicidad, bajo precio y facilidad de preparación, los posicionan como una alternativa ecológica para la extracción de compuestos de alto valor añadido del corcho.

5.2.2 Flavonoides

Los flavonoides baicalina, wogonósido, baicaleina y wogonina son los componentes bioactivos más abundantes de la especie *Radix scutellariae* utilizada en la medicina tradicional china para tratar

variedad de enfermedades como diarrea, inflamación, y hepatitis. Estos flavonoides muestran una actividad antiviral, antitumoral, anticonvulsionante, antialergénica, antiinflamatoria, ansiolítica y antioxidante. Se ha desarrollado una metodología que combina NADES con extracción asistida por microondas para obtener un extracto enriquecido en estos flavonoides. El NADES se compone de ChCl y ácido láctico en diferentes proporciones molares (1:2, 3:1, 2:1, 1:1, 1:3, 1:4). Los flavonoides baicalina, wogonosido, baicaleína y wogonina fueron obtenidos 4,0, 3,8, 4,6 y 4,3 veces de lo que ese obtuvo usando etanol al 60%, respectivamente. Cabe resaltar que los flavonoides fueron recuperados del NADES después de un tratamiento con la resina macroporosa ME-2.

La rutina es considerada uno de los flavonoides más importantes en la industria farmacéutica, debido a sus actividades farmacológicas destacadas. El *Fagopyrum tataricum Gaerth* (trigo sarraceno tártaro) se considera la mayor fuente de rutina natural. La extracción eficiente con NADES puede permitir aprovechar este flavonoide con mayor rendimiento. Para esto se probaron NADES con base a ChCl y glicerol como HBAs, y varios aminoácidos, azúcares y alcoholes como HBD. El NADES ChCl:glicina fue el que mostró mayor capacidad de extracción con 6,5 mg rutina/g materia vegetal seca. La solubilidad de la rutina en este NADES es 142 ± 3 mg/mL. Este valor es superior al que muestra en metanol 80% (disolvente usado frecuentemente) 97± 4 mg/mL.

Los frutos cítricos como naranjas, toronjas, mandarinas, limones, son ampliamente usados por su jugo. Se estima que aproximadamente se

generan 40 millones de toneladas de estos desechos, y cerca del 50% son cáscaras. Las mismas son fuente de compuestos bioactivos como flavonoides, pectina, aceites esenciales, y fibra dietética. Se preparó un grupo de DES basados en ChCl como HBA, para la extracción simultánea de flavonoides polimetoxilados PMFs, y glicósidos de flavonoides GoFs, variando la polaridad del HBD. Después de probar varias mezclas se optimizó una mezcla ternaria de ChCl:ácido levulínico: *N*-metilurea 1:1,2:0,8 para lograr un rendimiento de 18,75 mg/g PMFs y 47,07 mg/g GoFs, a partir de cáscaras de cítricos. Se utilizaron acetato de etilo y butanol para recuperar los compuestos con un rendimiento mayor al 86%.

5.2.3 Alcaloides

Los disolventes eutécticos profundos (DES) se han convertido en una de las mejores opciones para el desarrollo de metodologías de extracción eficiente de alcaloides. Los alcaloides, que podemos encontrar en plantas, hongos, bacterias y organismos marinos, como la quinina, la atropina, la vincristina y la morfina, se utilizan ampliamente en medicina. Desafortunadamente, su extracción a través de métodos tradicionales implica el uso de disolventes tóxicos, un alto consumo de energía y una baja selectividad.

Como ya se comentó en un subcapítulo anterior, los DES presentan propiedades fisicoquímicas ajustables, esta característica junto con su baja volatilidad, su biodegradabilidad y su capacidad para romper las paredes celulares de las plantas, resultan en una solución prometedora para realizar la extracción selectiva de los alcaloides deseados. Li y

colaboradores (2021) desarrollaron un DES de ChCl y fenol (1:3) para la extracción de berberina y palmatina de *Coptis chinensis*. En condiciones optimizadas (60 °C, 30 min), el método basado en extracción con DES asistido por ultrasonido produjo un 100% más de berberina que usando etanol y un 20% más que al utilizar metanol. Esta mejora en la extracción se puede atribuir a la capacidad del donador de puente de hidrógeno para interactuar con las moléculas de alcaloides, aumentando su solubilidad en el medio iónico DES.

De manera similar, He y colaboradores (2023) informaron del uso de un DES de cloruro de colina y etilenglicol (1:2) que permitió realizar la extracción de los alcaloides bioactivos fangchinolina (FAN), tetrandrina (TET), y (TA) de *Stephania tetrandra*. En condiciones optimizadas (52 °C, 82 min, ultrasonido) se logró la obtención de 7,23, 13,36, 20,59 mg/g para FAN, TET y TA respectivamente. Notablemente, el sistema DES utilizado en esta investigación resultó ser 2,2, 3,3 y 4,1 veces más eficientes que los sistemas de extracción convencionales basados en metanol, etanol 95% y agua, respectivamente.

Un ejemplo notable del uso de DES en la extracción de alcaloides fue reportado recientemente por Yu y colaboradores (2023). En este trabajo se realizó la extracción de los alcaloides skimmianina, dictamina y evodiamina de la hierba china *Evodia lepta.* Dicha extracción se realizó utilizando un sistema bifásico en el que el residuo con los alcaloides se disolvió con acetato de etilo y se puso en contacto con el DES ácido levulinico–glicerol–K_2HPO_4. La fase acuosa del DES con baja viscosidad permitió la extracción masiva de alcaloides

de las células vegetales, y los compuestos extraídos se transfirieron *in situ* y se concentraron en la fase hidrofóbica de acetato de etilo (Figura 82). La extracción bifásica redujo la acumulación de alcaloides en la fase acuosa y mejoró la eficiencia de la extracción, logrando un total de alcaloides con rendimiento de 757,71 μg/g, un 587,45 % superior al obtenido mediante la extracción tradicional con metanol.



Figura 82. Extracción de alcaloides de Evodia lepta utilizando un sistema bifásico DES ácido levulinico–glicerol–K2HPO4 y acetato de etilo.

Fuente: Tomado de Yu et al., 2023.

La aplicación de los DES también se ha ampliado a los compuestos estimulantes y xantínicos. Ruesgas-Ramón y colaboradores (2020) estudiaron la eficiencia de los DES para la extracción de biomoléculas a partir de residuos agrícolas del café y el cacao. Emplearon varios tipos de DES, de ellos, los basados en ChCl fueron los más eficaces,

concretamente el ácido láctico:ChCl (proporción molar 2:1), adicionalmente se demostró que la capacidad de extracción de los DES fue mayor usando extracción acoplada a ultrasonido (3 min/ciclo de trabajo constante (200 W), en comparación con extracción convencional con agitación (1 h/30 min). Se identificaron a la cafeína, la teobromina y el ácido clorogénico, como los principales compuestos bioactivos. Por otro lado, se ha reportado el uso de un DES ternario (TDES) de ChCl:ácido:oxálico:propilenglicol (1:1:1) para extraer cafeína, teobromina, teofilina y catequina de los residuos del té verde. Este TDES impregnado en una matriz polimérica mostró una excelente interacción con los alcaloides de baja polaridad, logrando alta especificidad y selectividad, lo que ofrece una nueva perspectiva para el reconocimiento y la separación de compuestos bioactivos (Figura 83).

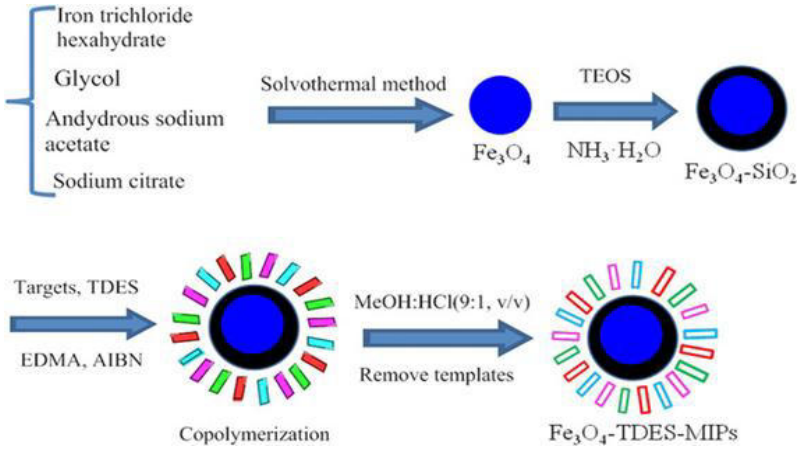


Figura 83. Sistema de extracción de alcaloides basado en un disolvente eutéctico ternario (TDES) impregnado en una matriz polimérica magnética.

Fuente: Tomado de (Li & Row, 2018).

El desarrollo de metodologías de extracción eficientes de alcaloides de la vinca ha significado un reto para los químicos debido a la baja concentración en sus fuentes naturales. Los DES se han utilizado en la extracción de alcaloides indólicos de *Catharanthus roseus*, una fuente clave de los agentes anticancerígenos vinblastina y vincristina. Kaur y colaboradores (2025), realizaron un estudio sistemático utilizando varios DES basados en ChCl con diferentes HBD basados en ácidos carboxílicos (ácido cítrico, ácido oxálico), aminas (urea, 1-naftilamina), alcoholes (glicerol, etilenglicol) y azúcares (D-glucosa, sacarosa), lo que dio lugar a la formación de ocho DES. Entre las diversas formulaciones de DES probadas, se identificó que la combinación de ChCl y ácido cítrico era el disolvente más eficaz para la extracción de vinblastina, mientras que la mezcla de ChCl y ácido oxálico resultó ser superior para la vincristina. Como resultado de su estudio, la cantidad total de vinblastina y vincristina cuantificada fue del 5,87 %, lo que es superior al 0,005 % de alcaloides de la vinca obtenido mediante métodos convencionales.

Además de las técnicas de extracción DES asistidas por ultrasonidos y microondas, se han implementado técnicas de extracción acopladas con el uso de enzimas para mejorar la transferencia de masa y reducir el tiempo de procesamiento. Rao y colaboradores (2024) combinaron la hidrólisis enzimática (celulasa) con un conjunto de 50 DES basados en urea y diferentes HBD como azúcares, alcoholes, ácidos carboxílicos, aminoácidos y amidas. Resultados de microscopía electrónica de barrido (SEM) demostraron que el sistema de celulasa-Ur/Pa destruye por completo la pared celular de *Zanthoxylum nitidum*, con una excelente tasa de extracción.

A pesar de los avances en el uso de DES y NADES asistidos por microondas, ultrasonido, fluidos supercríticos o con enzimas para la extracción de alcaloides, siguen existiendo retos, como la alta viscosidad de algunos DES, los métodos de recuperación poco eficientes y la falta del entendimiento de las interacciones entre los alcaloides y los DES a nivel molecular. Sin embargo, el número creciente de investigaciones en este ámbito en los años recientes confirma que los DES no sólo son viables, sino que en muchas ocasiones son superiores a los disolventes tradicionales en la extracción de alcaloides, ya que combinan una alta eficiencia con beneficios medioambientales y económicos.

5.2.4 Aceites esenciales

Los aceites esenciales (AE) son mezclas volátiles complejas de metabolitos especializados derivados principalmente de plantas aromáticas, estas mezclas contienen terpenos, terpenoides, fenilpropanoides y otros derivados oxigenados. Los aceites esenciales son utilizados en las industrias farmacéutica, cosmética, sanitaria, alimentaria, agrícola y de fragancias. Son apreciados por sus propiedades antimicrobianas, antivirales, antifúngicas, antiparasitarias, antioxidantes, antiinflamatorias y aromaterapéuticas. Su extracción se basa en métodos tradicionales como la destilación al vapor, la hidrodestilación o la extracción con disolventes utilizando compuestos orgánicos volátiles como el hexano o el etanol. Dichos métodos de extracción tradicionales son tan agresivos que dan lugar a degradación térmica y baja selectividad. En este contexto, los disolventes eutécticos profundos han surgido como herramientas innovadoras y altamente

eficientes para su extracción. A diferencia de otros componentes bioactivos, se ha reportado el uso de DES no sólo para la extracción sino también para el almacenamiento y administración de aceites esenciales debido a su capacidad para actuar como barreras físicas y como eliminadores de radicales.

El uso de los DES en la extracción de AE ha cobrado impulso debido a su capacidad para mejorar la transferencia de masa y aumentar el rendimiento, al tiempo que preserva la integridad de los compuestos termolábiles. A diferencia de la destilación al vapor, la cual puede degradar los componentes sensibles al calor, los métodos basados en DES funcionan a temperaturas más bajas y protegen los componentes volátiles.

En la actualidad, uno de los métodos más eficaces de extracción es la asistida por ultrasonidos (EAU) combinada con DES. Zhu y colaboradores (2025) recientemente reportaron el uso de DES de cloruro de colina y ácido láctico (1:2) para extraer aceite esencial de *Zanthoxylum bungeanum*. El método DES-EAU logró un rendimiento del 27% superior al de la hidrodestilación convencional, pero lo más importante es que la evaluación de la actividad antimicrobiana del AE obtenido, rompió la cutícula de la planta y facilitó la liberación de aceite de los tricomas glandulares, al tiempo que minimizó la oxidación y la isomerización. Esto permitió la obtención de un AE rico en α-terpineol el cual inhibe el crecimiento de cepas bacterianas patógenas, al dañar la estructura de las membranas celulares, alterar las funciones fisiológicas celulares e inducir la escisión del ADN. Las concentraciones inhibitorias mínimas (CIM) reportadas fueron de 1,41

y 2,81 mg/ml para *Staphylococcus aureus* y *Escherichia coli,* respectivamente. Estos valores de CIM son muy prometedores si se compara con los obtenidos para α-terpineol puro (*S. aureus* 0,7, *E. coli* 1,4 mg/ml), benzoato de sodio (*S. aureus* 7,19, *E. coli* 28,75 mg/ml) y sorbato de potasio (*S. aureus* 7,50, *E. coli* 30,00 mg/ml), utilizados en el mismo estudio.

Tanto los DES hidrofóbicos (HDES), así como los HNDES, los cuales están diseñados de la siguiente forma: como HBD ácidos grasos de cadena larga ó alcoholes; y como HBA monoterpenos, sesquiterpenos y terpenoides. Todos estos han surgido como una alternativa eficiente para la extracción de aceites esenciales.

Bechis y colaboradores (2022) usaron cinco diferentes HDES derivados de fenoles y terpenoides como fase de extracción para el enriquecimiento de otros compuestos volátiles naturales sin utilizar cosolventes tóxicos (Tabla 2), esta extracción fue seguida de un análisis directo por CG-FID (Cromatografía de gases con detector FID) de la fase rica en HDES. Con esta metodología se logró una extracción cuasi cuantitativa del aceite esencial de diferentes fragancias comerciales. Además de que la extracción acoplada a CG-FID permitió la determinación cuantitativa de analitos de relevancia comercial como linalool, citronelol, geraniol e hidroxicitronelal.

Tabla 11. Lista de los cinco HDES utilizados en la extracción de aceites esenciales acoplada a CG-FID.

HBA	HBD	Relación Molar

Timol	Carvacrol	1:1
Timol	Eugenol	1:1
Terpinen-4-ol	Mentol	1:1
Anetol	Mentol	1:1
Timol	Cumarina	1:1

Fuente: Bechis y colaboradores (2022).

Además, se ha explorado la extracción de AEs usando DES asistida por enzimas. Zhang y colaboradores (2025) reportaron el uso de un DES basado en ChCl:ácido cítrico (1:0,97), 73% de agua, 0,5% de celulasa y a temperatura de 45 °C para la extracción del AE de *Litsea cubeba*. En comparación con la destilación por arrastre de vapor, este método aumentó el rendimiento de aceite esencial del 3,20% al 4,70% y permitió identificar 79 compuestos, incluyendo cinco nuevos incluyendo acetato de α-terpinilo y ácido geránico. El aceite extraído mostró alta actividad antifúngica contra *Aspergillus flavus*, con hasta un 100% de inhibición. En la Figura 84 se muestran los resultados del análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB) de la morfología del micelio de *Aspergillus flavus* al ser tratado con AE de *Litsea cubeba* extraído con diferentes DES, destacando la alta actividad antifúngica del ya mencionado DES basado en ChCl:ácido cítrico.

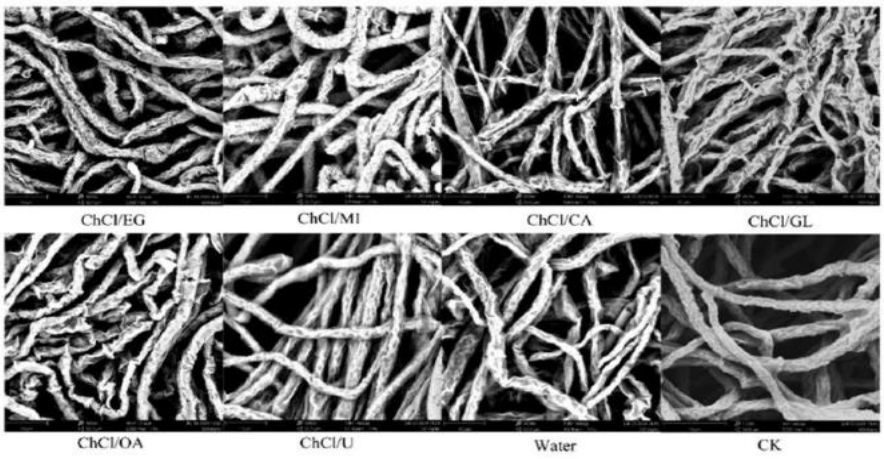


Figura 84. Micrografías SEM de la morfología del micelio de Aspergillus flavus.

Fuente: Tomado de (Zhang et al., 2025)

Al ser tratado con aceite esencial de Litsea cubeba extraído con agua, DES compuesto por cloruro de colina y etilenglicol (ChCl/EG), ácido málico (ChCl/MA), ácido cítrico (ChCl/CA), glicerol (ChCl/GL), ácido oxálico (ChCl/OA) y urea (ChCl/U).

Explorando nuevas aplicaciones, Huang y colaboradores (2025), usaron NADES (mezclas de betaína y ácidos orgánicos) como alternativas "verdes" a DES sintéticos, en sus estudios de recuperación de lípidos a partir de algas, con la finalidad de producir biodiesel. Se demostró que la producción de dióxido de carbono asociada al proceso era menor que cuando se usaron DES sintéticos. En un intento de desarrollar procesos alternativos para la extracción de tiofeno, piridina y tolueno (compuestos no polares), Abu Hatab et al. (2020) usaron NADES basados en betaína para extraer dichos compuestos de n–decano, con resultados alentadores, que han hecho promover el escalamiento del proceso.

- Estabilización y conservación de aceites esenciales (AE) usando DES

Los AE son muy susceptibles a la degradación por la luz, el calor y el oxígeno debido a la presencia de terpenos insaturados. Los DES han demostrado efectos protectores al actuar como barreras físicas y eliminadores de radicales. Stanojević y colaboradores (2021) demostraron que los AE de *Rosmarinus officinalis* obtenidos por hidrodestilación con un tratamiento previo con un DES llamado glicelina (ChCl:glicerol, 1:2) permitió la obtención de un AE con mayor rendimiento y estabilidad. La composición del AE se determinó utilizando las técnicas cromatográficas como CG-EM y GC-FID, revelando la presencia de alcanfor, verbenona y borneol (33,3%, 12,2% y 8,3%, respectivamente). La actividad antioxidante del AE pretratado con DES determinada por ensayos con DPPH, demostró un aumento del 10% con respecto al AE sin pretratamiento, lo cual habla de la conservación de la integridad química de la red de enlaces de hidrógeno de los DES, probablemente restringe la movilidad molecular e inhibe las vías oxidativas.

Además, los DES pueden servir como conservantes ecológicos en formulaciones a base de AE, reduciendo la necesidad de antioxidantes sintéticos como el butilhidroxianisol (BHA) y el butilhidroxitolueno (BHT). Sus propiedades antimicrobianas inherentes (especialmente en los DES ácidos o fenólicos) se sinergizan con la bioactividad de los AE, mejorando la vida útil y el rendimiento funcional.

5.2.5 Taninos

Los DES/NADES pueden extraer eficazmente taninos de diversos materiales vegetales, como residuos de cereza de café, subproductos del algodón y semillas de uva. Se pueden utilizar para aislar taninos con diversos fines, como aplicaciones agrícolas, procesamiento de alimentos y desarrollo farmacéutico. La eficiencia de extracción de taninos ha sido optimizada ajustando el tipo y la composición de los DES, así como parámetros como la temperatura, el tiempo y la relación líquido-sólido.

Las interacciones de enlaces de hidrógeno entre los componentes de los DES y los taninos desempeñan un papel crucial en el proceso de extracción, influyendo en la solubilidad y la estabilidad. Como se describió antes, los DES se forman mezclando HBD y HBA, lo que da como resultado una mezcla con un punto de fusión más bajo que sus componentes individuales. Al controlar la composición específica de los DES, se pueden adaptar para mejorar la extracción de ciertos tipos de taninos y antocianinas.

Se están realizando investigaciones para explorar más a fondo el potencial de los DES en la extracción de taninos y optimizar su uso en diversos procesos industriales. Se están combinando técnicas avanzadas como la EAU con DES para mejorar la eficiencia y la velocidad de la extracción. El uso de DES/NADES en la extracción de taninos también se está investigando por su potencial para el desarrollo de nuevos alimentos funcionales, productos farmacéuticos y otros productos de origen biológico (de Hoyos-Martínez et al., 2019; Kovač et al., 2022; Sukor et al., 2021)

5.2.6 Antocianinas

Los DES se utilizan cada vez más para extraer antocianinas, ofreciendo una alternativa más sostenible y eficiente a los disolventes orgánicos tradicionales, no solo por ser biodegradables y derivar de recursos renovables (lo que los convierte en una opción más respetuosa con el medio ambiente), sino también porque han demostrado mejorar la estabilidad y la actividad antioxidante de las antocianinas extraídas. Los DES pueden personalizarse para obtener propiedades específicas, lo que permite una mejor extracción de antocianinas de diversas fuentes. Pueden mejorar la estabilidad de las antocianinas, ya que protege a estas de la degradación causada por factores ambientales. Los DES pueden aumentar la solubilidad de las antocianinas, lo que resulta en mayores rendimientos de extracción. Por ejemplo, los DES de ChCl-ácido oxálico se ha identificado como un disolvente particularmente eficaz para la extracción de antocianinas. El uso de DES/NADES en la extracción de antocianinas es relevante para diversas industrias, como la alimentaria, la farmacéutica y la cosmética.

En la industria alimentaria, los DES/NADES pueden utilizarse para extraer antocianinas de frutas y verduras para su uso como colorantes alimentarios naturales o ingredientes funcionales. En la industria farmacéutica y cosmética, los DES pueden utilizarse para obtener antocianinas por sus posibles beneficios para la salud dada sus propiedades antioxidantes.

Un reto asociado a los DES es su alta viscosidad, que puede afectar la

transferencia de masa durante la extracción. Sin embargo, esto se puede solucionar añadiendo una pequeña cantidad de agua a los DES, lo que reduce la viscosidad y mejora la eficiencia de la extracción. Otro reto es la posible dificultad para separar las antocianinas extraídas, de los DES, pero técnicas como la cromatografía pueden utilizarse para solucionarlo. En conclusión, los DES/NADES ofrecen un enfoque prometedor y sostenible para la extracción de antocianinas, con el potencial de mejorar la eficiencia, la estabilidad y la aplicabilidad en diversas industrias.

5.3 Otras aplicaciones de DES en Química

5.3.1 Cromatografía

Los DES se utilizan cada vez más en cromatografía, tanto como fases móviles como estacionarias. Se utilizan en la extracción líquido-líquido, la microextracción en fase líquida y como aditivos de fase móvil en cromatografía líquida de alta eficiencia (CLAE). Los DES ofrecen ventajas como biodegradabilidad, baja toxicidad y propiedades ajustables, lo que los hace atractivos para la química analítica ecológica. Se han utilizado para extraer eficientemente compuestos bioactivos de fuentes naturales, como polifenoles y otros productos naturales. El cambio reversible de polaridad o hidrofilicidad/hidrofobicidad de los disolventes conmutables simplifica enormemente la capacidad de recuperación en aplicaciones de extracción. A menudo, el rendimiento de los DES en la extracción es mayor que el de los disolventes tradicionales. Los DES se utilizan como disolventes en técnicas de microextracción en fase líquida

(LPME por sus siglas en inglés), ofreciendo un enfoque ecológico y eficiente para la preparación de muestras. Con frecuencia, los DES también se han utilizado como fases móviles y estacionarias alternativas en separaciones realizadas por CLAE, ya que mejoran la selectividad y la eficiencia de la separación. Los DES son biodegradables, menos tóxicos y, a menudo, están compuestos por componentes naturales, en consonancia con los principios de la química verde. Las propiedades de los DES se pueden adaptar ajustando la proporción y el tipo de componentes, lo que permite la optimización para separaciones específicas. Los DES pueden mejorar la extracción de compuestos específicos y el rendimiento de la separación en técnicas cromatográficas.

La alta viscosidad supone un reto importante al utilizar DES como fases móviles en CLAE. La baja volatilidad y los problemas de corte UV pueden limitar su uso con ciertos detectores. La estabilidad de los DES, especialmente en soluciones acuosas y como fases estacionarias, requiere mayor investigación. A pesar de estos desafíos, los DES son muy prometedores para el avance de la química analítica y la promoción de prácticas sostenibles en cromatografía.

5.3.2 Macromoléculas

Los DES/NADES se utilizan para solubilizar, estabilizar y extraer macromoléculas como proteínas, ADN, ARN y polisacáridos, lo que abre nuevas posibilidades en diversos campos. Pueden disolver macromoléculas que de otro modo serían insolubles, como ciertos polisacáridos y lignina, que son cruciales en diversos procesos

biológicos y aplicaciones industriales. Esto es particularmente útil en la extracción de compuestos bioactivos de fuentes naturales. Los DES/NADES pueden proteger macromoléculas como enzimas, ADN y ARN de la degradación, actuando potencialmente como medio de almacenamiento o agente protector durante diversos procesos. Estos disolventes también pueden actuar como transportadores en sistemas de administración de fármacos como nanopartículas o liposomas. Pueden servir como medio adecuado para reacciones enzimáticas, mejorando potencialmente la estabilidad y la actividad enzimática. Los DES, además, se están aplicando en cosmética gracias a su biocompatibilidad y capacidad para solubilizar y estabilizar diversos ingredientes.

Tabla 12. Ventajas, desventajas y limitaciones de los DES.

Categoría	Descripción
Ventajas	• Son biodegradables, ecológicos y de baja toxicidad. • Se preparan fácilmente mediante mezclado y calentamiento suave. • Sus propiedades fisicoquímicas (viscosidad, polaridad, densidad, hidrofilicidad/hidrofobicidad) son altamente modulables ajustando el tipo de HBA/HBD y sus proporciones molares. • Presentan alta estabilidad térmica y baja volatilidad. • Permiten una alta selectividad y eficiencia de extracción de metabolitos especializados • Mejoran la solubilidad de compuestos hidrofóbicos y protegen moléculas sensibles (enzimas, ADN, aceites esenciales).

	• Compatible con métodos modernos de extracción: ultrasonido, microondas, fluidos supercríticos, hidrólisis enzimática.
Desventajas	• Alta viscosidad, que dificulta el transporte de masa y reduce eficiencia de extracción sin añadir agua o aplicar energía (ultrasonido, microondas). • Baja conductividad en la mayoría de formulaciones. • Sus propiedades pueden variar significativamente según pequeñas diferencias en pureza, humedad o método de preparación. • Pueden requerir etapas adicionales para recuperación y separación del extracto, lo que aumenta complejidad operativa.
Limitaciones	• No existe un DES universal: cada mezcla debe diseñarse específicamente para un tipo particular de metabolito o proceso. • La separación de los compuestos extraídos del DES puede ser difícil si no se aplican técnicas adicionales (cromatografía, resinas macroporosas, sistemas bifásicos). • Muchos DES todavía no están disponibles comercialmente, lo que requiere su preparación *in situ.* • Persisten vacíos en el entendimiento molecular de las interacciones DES–solutos, lo cual limita la predicción teórica de resultados. • Falta de estandarización sobre propiedades fisicoquímicas, ya que estudios reportan valores inconsistentes debido a metodologías variadas.

5.4 Elementos de cierre del capítulo

1. ¿Todos los DES son líquidos a temperatura ambiente?

No necesariamente, la única condición para que una mezcla sea un

DES es que su punto de fusión sea mucho menor que los componentes que lo conforman.

2. ¿Por qué la viscosidad de los DES es una propiedad tan importante al diseñarlos y/o prepararlos?

La viscosidad es una propiedad importante en los DES debido a que se relaciona con los fenómenos de transporte de masa y energía que se requieren para diseñar procesos industriales donde los DES se usan como medio de reacción.

3. ¿Se puede utilizar el mismo DES para extraer con mayor eficiencia todo tipo de metabolitos especializados?

No. Esto debido a que los diferentes tipos de metabolitos especializados interactúan de forma diferente con cada tipo de DES. Los DES se diseñan de tal forma de favorecer cierto tipo de interacciones moleculares, que no necesariamente deben ser compatibles con todas las familias de metabolitos especializados

4. ¿Cómo qué componente de un DES puede usarse la glucosa?

Puede usarse como un donante de enlace de hidrógeno (*Hydrogen Bond Donor*, o HBD), debido a los 5 grupos OH que tiene en su estructura.

5. ¿El uso de los DES supone que ya no se utilicen los disolventes tradicionales?

No. El uso de DES supone mejores y mayores rendimiento que los disolventes tradicionales. Sin embargo, no los reemplaza del todo. Esto

debido a que muchas se requiere un paso de recuperación de un extracto de DES.

CAPÍTULO VI

6 MÉTODOS AVANZADOS DE SECADO DE EXTRACTOS

En la farmacognosia contemporánea, la estabilización de extractos naturales representa un desafío crítico para preservar la bioactividad de los metabolitos especializados frente a la degradación. Técnicas avanzadas como el secado por aspersión y la liofilización permiten transformar matrices líquidas en productos sólidos particulados, optimizando su manejo, transporte y vida útil. Estos métodos no solo eliminan el solvente, sino que a menudo actúan como procesos de microencapsulación que protegen la integridad química de los fitofármacos frente a factores externos como la luz.

El secado por aspersión es una técnica de deshidratación ultrarrápida que convierte mezclas líquidas en polvos finos mediante la aspersión del fluido en una corriente de aire caliente. Este proceso ocurre en milisegundos, lo que minimiza el daño térmico al mantener la temperatura del producto por debajo de la del gas debido al enfriamiento evaporativo superficial. El equipo se articula a través de sistemas de alimentación, atomización (boquillas o discos), una cámara de secado y un ciclón para la separación eficiente de las partículas. Para garantizar un producto estable y fluido, se emplean excipientes como la maltodextrina y la goma arábiga, que forman matrices protectoras alrededor de los bioactivos, mejorando su solubilidad y facilitando su posterior formulación farmacéutica.

Por otro lado, la liofilización o criodesecación se fundamenta en la sublimación del agua desde un estado previamente congelado bajo

condiciones de vacío profundo, operando estrictamente por debajo del punto triple del agua. Este método se desarrolla en tres fases sucesivas: congelación controlada, secado primario (sublimación del hielo) y secado secundario (desorción del agua ligada molecularmente), permitiendo alcanzar niveles de humedad residual inferiores al 2%. Es considerado el estándar de oro para sustancias altamente termolábiles, pues evita el estrés calórico y preserva casi intactas las propiedades moleculares, estructurales y organolépticas. El uso de crioprotectores y agentes de pared como la trehalosa, la inulina o las ciclodextrinas es vital para elevar la temperatura de transición vítrea (Tg), evitar el colapso estructural del producto y proteger compuestos volátiles o sensibles en extractos naturales y productos biotecnológicos.



Figura 85. Métodos avanzados de secado en farmacognosia.

Fuente. Imagen creada con inteligencia artificial y revisada por los autores.

6.1 Secado por aspersión en la obtención de extractos vegetales

6.1.1 Definición y principios del secado por aspersión

El secado por aspersión o también denominado secado por aspersión, es un proceso de deshidratación rápida, utilizado para transformar mezclas líquidas en productos secos (polvo), mediante la pulverización del líquido en una corriente de aire caliente. Sin embargo, cuando se procesan extractos con disolventes orgánicos o mezclas hidroalcohólicas en las que la proporción de alcohol supera el 20 %, es estrictamente necesario sustituir el aire atmosférico por una corriente de gas inerte (nitrógeno) para suprimir el oxígeno del sistema y anular el riesgo de explosión o ignición de los vapores. Es una de las técnicas más antiguas de encapsulación, remontándose sus inicios a los años 1930, donde las primeras aplicaciones se enfocaron en la microencapsulación de sabores, utilizando goma acacia como material de pared o encapsulante. La evaporación ocurre en fracciones de segundo, permitiendo minimizar la degradación térmica de compuestos sensibles, sean de origen natural o sintético. El esquema general que representa a un secador por aspersión se presenta en la figura 86.

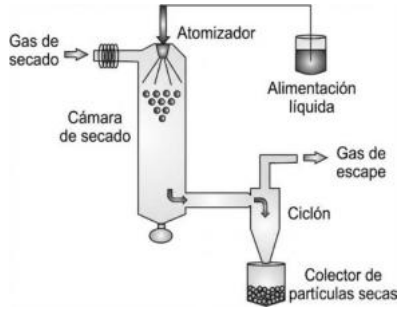


Figura 86. Partes de un equipo de secado por aspersión.

Fuente: Pilotech (https://www.shpilotech.com/es/Secador-por-aspersi%C3%B3n-a-escala-piloto/).

Es un proceso que consta de 3 etapas. Primero tiene lugar la aspersión del líquido en finas gotas mediante boquillas o discos rotatorios. Al contacto instantáneo de estas gotas con una corriente de aire caliente se logra una evaporación rápida del disolvente, para finalmente recolectar las partículas secas formadas. Debido a su eficiencia, reproducibilidad y capacidad de escalar a nivel industrial, el secado por aspersión se utiliza ampliamente en las industrias farmacéutica, alimentaria y cosmética, especialmente para encapsular extractos, obtener micropartículas funcionales o mejorar la estabilidad y vida útil de ingredientes bioactivos.

La microencapsulación es una tecnología de formulación que implica la formación deliberada de una estructura de recubrimiento o matriz alrededor de un núcleo activo, con el fin de proteger, liberar de forma controlada o enmascarar ciertas propiedades del núcleo. En el secado por aspersión, las partículas obtenidas no siempre presentan una verdadera cápsula con una barrera física bien delimitada. De hecho, en la mayoría de los casos se forman micromatrices amorfas o parcialmente organizadas, donde el o los compuestos activos quedan dispersos dentro de una red continua del agente portador (por ejemplo, maltodextrina, goma arábiga, etc.). En otras palabras, lo que se obtiene en muchos casos son micropartículas y no cápsulas núcleo-recubrimiento en el sentido estricto del término. Por tanto, aunque el secado por aspersión puede utilizarse como una técnica de microencapsulación, no todo producto obtenido por este método puede clasificarse como una microcápsula verdadera. El uso del término debe ir acompañado de una caracterización adecuada (por ejemplo, análisis morfológico, perfil de liberación, protección frente a factores externos)

que evidencie una función encapsulante. En caso contrario, es más correcto referirse simplemente a micropartículas o microesferas, evitando una atribución funcional que podría no estar justificada.

6.2 Fundamento físico

Durante el proceso de secado por aspersión, el líquido atomizado en forma de gotas finas entra en contacto con un flujo de gas caliente y seco, lo que provoca una evaporación muy rápida del disolvente. Este fenómeno genera una transferencia de calor intensa desde el gas hacia las gotas, iniciando la evaporación en la superficie y causando un efecto de enfriamiento que mantiene la temperatura del material por debajo de la temperatura del gas. Esta rápida evaporación no solo acelera el secado, sino que también protege compuestos sensibles al calor, como vitaminas y proteínas, ya que el producto rara vez alcanza temperaturas que causen una degradación de los metabolitos. La diferencia entre la temperatura de entrada del gas y la de salida es clave para estimar la eficiencia del secado y controlar la humedad residual del polvo resultante.

La transferencia de masa ocurre simultáneamente con la de calor, ya que el vapor de agua generado durante el secado debe difundirse desde el interior de la partícula hacia el entorno. En sistemas como el NSD (*nano spray drying*) que son nuevas actualizaciones en la tecnología del secado por aspersión, el flujo de gas es laminar y la cámara de secado está diseñada para evitar turbulencias, lo cual mejora la estabilidad del proceso y reduce pérdidas por deposición en las paredes. Las condiciones del secado, como la tasa de flujo del gas, la

concentración de sólidos, y la temperatura de entrada, influyen directamente en la velocidad de evaporación y en el tamaño final de las partículas. En general, el control preciso de las condiciones permite obtener productos con bajo contenido de humedad, partículas más uniformes y una mejor conservación de los compuestos activos.

6.2.1 Equipo y fases del proceso de secado por aspersión

El equipo de secado por aspersión se concibe como un sistema integrado de operaciones unitarias diseñado para la transformación instantánea de una alimentación fluida en un producto sólido particulado. Estructuralmente, el equipo se articula a través de cuatro subsistemas funcionales principales (figura 1):

1. **Sistema de suministro y alimentación**: Constituido generalmente por una bomba peristáltica encargada de transportar la matriz líquida (solución, emulsión o suspensión) con un flujo volumétrico constante y controlado hacia el dispositivo de aspersión.

2. **Sistema de aspersión**: Representa el componente crítico del proceso (comúnmente una boquilla de dos fluidos o disco rotatorio). Su función es dispersar el fluido en un espectro de gotas finas, incrementando exponencialmente la superficie específica disponible para optimizar la transferencia de calor y masa.

3. **Cámara de secado**: Es el recinto cilíndrico donde se produce el contacto entre la nube atomizada y la corriente de gas caliente

(típicamente aire en flujo co-corriente). En esta etapa ocurre la evaporación instantánea del solvente, permitiendo la formación de la corteza sólida de la partícula y protegiendo el núcleo activo de la degradación térmica.

4. **Sistema de separación y recolección**: Conformado habitualmente por un ciclón que, mediante fuerzas inerciales y centrífugas, segrega las partículas sólidas de la fase gaseosa húmeda. El producto final se deposita en un recipiente colector, mientras que el gas es evacuado a través de un sistema de aspiración y filtrado.

5. **Sistema de condensación y ciclo cerrado (*Inert Loop*):** Esta es una adecuación de seguridad indispensable al trabajar con disolventes orgánicos o niveles de alcohol superiores al 20 %. A diferencia del proceso acuoso convencional donde el aire se libera al ambiente, el nitrógeno saturado de vapores inflamables se redirige a un condensador criogénico (que puede operar hasta a -20 °C) para recuperar el disolvente en estado líquido. Esto permite que el gas inerte retorne limpio y seco al calefactor, cerrando el circuito.

El estudio de los fundamentos y procesos de la aspersión y secado proporcionan el control de los parámetros del producto, así como la optimización e innovación tecnológica en el área farmacéutica u otras industrias, desde escalas de investigación hasta una producción comercial.

Las fases del proceso pueden agruparse en tres secciones: aspersión,

formación de partículas y recogida de partículas (figura 87).

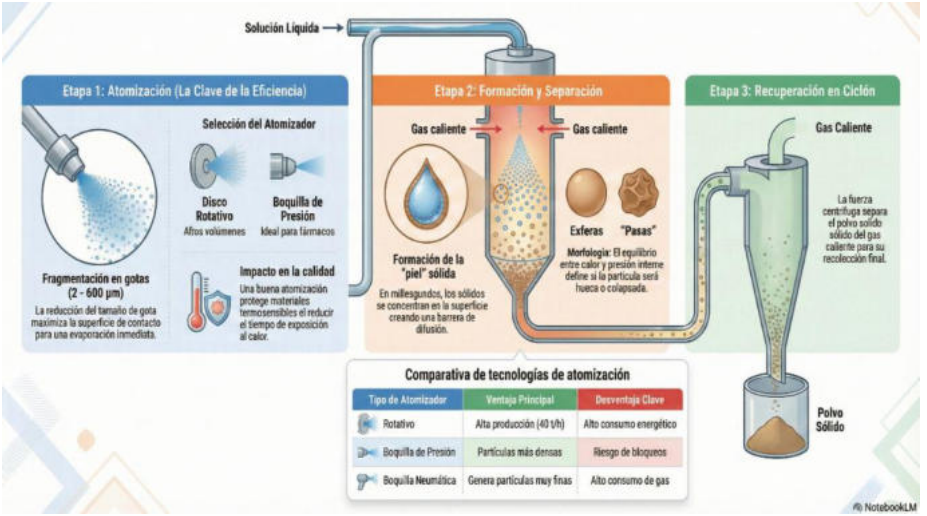


Figura 87. Etapas del secado por aspersión.

Fuente. Imagen creada mediante inteligencia artificial y revisada por los autores.

1. Aspersión o atomización

La aspersión es una de las etapas más críticas en el proceso de secado por aspersión, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso y en las propiedades finales del polvo obtenido. Durante esta fase, la solución líquida se transforma en finas gotas mediante dispositivos especializados. El tamaño de estas gotas, que puede oscilar entre 2 y 600 µm dependiendo del sistema utilizado, afecta directamente el intercambio de calor y masa y, en consecuencia, la velocidad de evaporación. Aunque la disminución del tamaño de gota incrementa la superficie de contacto y acelera el secado, los métodos tradicionales de atomización generan partículas en el rango micrométrico (>1 µm). Esto resulta insuficiente para aplicaciones como la encapsulación de

compuestos bioactivos, donde se requieren sistemas submicrométricos para mejorar la estabilidad y biodisponibilidad del ingrediente activo.

Los atomizadores se clasifican según el tipo de energía utilizada para generar las gotas. Existen tres tipos fundamentales: los atomizadores de rueda giratoria o disco, que emplean energía centrífuga; los de boquilla neumática, que utilizan energía cinética mediante un gas comprimido; y los de boquilla presurizada, que se basan en la presión hidráulica para descomponer el líquido.

Los atomizadores rotativos, por ejemplo, son adecuados para altos volúmenes de producción (hasta 40 t por hora) y pueden manejar líquidos de alta viscosidad. No requieren bombas de alta presión y permiten controlar fácilmente el tamaño de las gotas ajustando la velocidad de rotación. No obstante, presentan ciertas desventajas como la formación de depósitos en las paredes, la incorporación de aire en las gotas, un elevado consumo energético y mayores necesidades de mantenimiento.

En el caso de los atomizadores de boquilla a presión, el líquido se fuerza a través de un pequeño orificio a presiones entre 1 y 30 MPa. Este sistema es más simple de operar, consume menos energía, genera menos depósitos y produce partículas con menor inclusión de aire. Sin embargo, su capacidad es limitada, puede presentar bloqueos por desgaste, y no es adecuado para líquidos muy viscosos o con sólidos suspendidos. Por su parte, las boquillas neumáticas utilizan aire comprimido para atomizar líquidos espesos o abrasivos, generando partículas muy finas, pero con un elevado consumo energético.

Dentro de las aplicaciones farmacéuticas, las boquillas más comunes son las de dos fluidos y las de remolino a presión. Las boquillas de dos fluidos utilizan un gas comprimido para atomizar el líquido, siendo especialmente útiles para producir partículas muy pequeñas como las requeridas en formulaciones inhalables. No obstante, tienen limitaciones para su uso a gran escala debido al alto consumo de gas. En contraste, las boquillas de remolino a presión operan solo con presión hidráulica, permitiendo mayores caudales de pulverización y mayor eficiencia en entornos industriales. Estas últimas tienden a generar partículas con mejores características de tamaño y densidad, lo cual es deseable en la fabricación de formas farmacéuticas orales.

En todos los tipos de boquillas, el proceso de aspersión comienza cuando el líquido pasa a través del orificio, generando láminas o chorros que se fragmentan en filamentos y luego en gotas individuales debido a inestabilidades superficiales. Las variables críticas que afectan esta etapa incluyen la distribución del tamaño de gota, la densidad del rociado, el ángulo de dispersión y la velocidad del fluido. Estas propiedades determinan cómo interactúan las gotas con el gas caliente de secado y, por tanto, el tamaño final de las partículas, un parámetro clave para el rendimiento del producto y su manufactura.

Una buena aspersión trae consigo múltiples beneficios: permite un secado más rápido, mejora la eficiencia térmica y proporciona un mayor control sobre la morfología y el tamaño de las partículas. Esto resulta especialmente relevante cuando se trabaja con materiales termosensibles, ya que reduce el tiempo de exposición al calor y ayuda a preservar la integridad de los compuestos activos. No obstante, uno

de los retos más comunes sigue siendo la alta dispersión en el tamaño de las gotas, lo que puede ocasionar un secado no uniforme, en el cual algunas partículas se sobrecalientan mientras que otras pueden permanecer húmedas.

Dado que no existe un tipo de atomizador universal, la elección del sistema adecuado dependerá de las propiedades del líquido de alimentación, el tipo de producto deseado y los requisitos específicos del proceso. Para superar las limitaciones de los sistemas convencionales, se han desarrollado tecnologías más avanzadas como los atomizadores rotativos con rodamientos magnéticos, los atomizadores ultrasónicos capaces de generar gotas nanométricas y los sistemas de aspersión por combustión pulsada, los cuales ofrecen mejoras tanto en eficiencia energética como en la calidad del producto final.

2. Formación de partículas

La formación de partículas en el secado por aspersión inicia cuando las gotas atomizadas de la mezcla de compuestos activos y excipiente o encapsulante entran en contacto con el gas caliente dentro de la cámara de secado. Este encuentro ocurre en milisegundos y desencadena una evaporación rápida del disolvente en la superficie de cada gota. Como resultado, los sólidos disueltos, principalmente el encapsulante, se concentran en la periferia y forman una película superficial. Esta película actúa como una barrera física que dificulta la salida del disolvente restante, haciendo que la evaporación pase a depender del proceso de difusión a través de dicha capa. Todo este proceso de

transformación ocurre en menos de un segundo y determina directamente las características iniciales de la partícula sólida.

Durante el secado, el comportamiento de la partícula cambia según las condiciones térmicas. Si el secado es rápido y la temperatura de la gota se mantiene cerca o por encima del punto de ebullición del disolvente, la presión interna mantiene la partícula inflada, dando lugar a una morfología esférica y hueca. En cambio, si el secado es más lento o a menor temperatura, la presión de vapor dentro de la gota no es suficiente para mantener la estructura, por lo que la piel colapsa, generando partículas arrugadas tipo "pasa". Este equilibrio entre la velocidad de evaporación, la formación de la piel y la difusión del disolvente define la morfología, densidad y tamaño final de las partículas. Estas características pueden simularse mediante modelos de dinámica de fluidos computacional, los cuales ayudan a predecir con precisión el comportamiento de las partículas bajo distintas condiciones de operación. Así, el conocimiento detallado de estas fases permite optimizar el proceso de secado y obtener polvos con propiedades adecuadas para su posterior formulación.

3. Separación de partículas

El proceso de separación de partículas en el secado por aspersión comienza una vez que las gotas líquidas han sido transformadas en partículas sólidas dentro de la cámara de secado. Estas partículas, suspendidas en el gas caliente de secado (como aire o nitrógeno), son dirigidas hacia un sistema recolector, comúnmente un ciclón de flujo inverso. Al ingresar tangencialmente al ciclón, el flujo de gas crea un

vórtice giratorio que empuja las partículas hacia las paredes internas del ciclón debido a la fuerza centrífuga. Como estas partículas son más densas que el gas, comienzan a descender por las paredes hasta llegar a la parte inferior cónica, donde son recolectadas en un recipiente o se descargan de manera continua.

Mientras esto ocurre, el gas limpio “ahora con menos partículas” se dirige hacia el centro del vórtice y asciende para salir por la parte superior del ciclón a través de un conducto de escape. Para garantizar una recolección eficiente, el diseño del ciclón debe estar optimizado, lo cual implica ajustar parámetros geométricos y operativos como la velocidad del gas, el tamaño de las partículas y la caída de presión. En el sector farmacéutico, esta etapa es crítica debido al alto valor de los productos, por lo que se busca maximizar el rendimiento mediante herramientas como la dinámica de fluidos computacional, que permite predecir y mejorar el desempeño del ciclón en distintas escalas de producción.

6.3 Parámetros operativos críticos

Los parámetros operativos críticos son esenciales para optimizar el proceso del secado por aspersión y garantizar la calidad del producto final, mismo que estará determinado por: las condiciones del aire de secado, el grado de contacto entre el aire caliente y las gotas de la sustancia dentro de la cámara de secado, así como el tipo de atomizador empleado.

- Temperatura de entrada y salida

La temperatura de entrada es uno de los parámetros más críticos del secado por aspersión, ya que determina la velocidad de evaporación de la humedad superficial del líquido atomizado y, por ende, la formación de partículas.

Es recomendable seleccionar la temperatura más alta posible para reducir al mínimo el contenido de humedad del producto, siempre que no se comprometan los compuestos activos por efecto del calor. Una temperatura elevada en la entrada también contribuye a evitar la formación de grumos, la adhesión de partículas a las paredes de la cámara de secado y el colapso de la microestructura.

Una temperatura de entrada elevada permite una evaporación rápida, lo que reduce el tiempo de permanencia de las gotas en la cámara y ayuda a preservar la integridad de ciertos compuestos bioactivos, sin embargo, si la temperatura es demasiado alta, puede producirse la degradación de componentes sensibles como vitaminas, compuestos químicos con capacidad antioxidante o aromas, lo que compromete la funcionalidad del producto. Por ello, en procesos de microencapsulación de compuestos bioactivos, se recomienda trabajar con temperaturas más moderadas, acompañadas de estrategias de protección como el uso de matrices poliméricas.

La temperatura de entrada no solo afecta la tasa de evaporación, sino que también influye en la morfología de las partículas, temperaturas de entrada más altas pueden resultar en partículas más densas y menos porosas, lo que puede ser desfavorable para aplicaciones que requieren una rápida disolución o liberación del fármaco. La temperatura de

entrada puede variar dependiendo del tipo de material y la configuración específica del equipo, dependiendo de la sensibilidad térmica del material a secar.

La temperatura de salida es la temperatura del aire que sale del secador después de haber pasado por el proceso de secado, es una variable que no se puede controlar directamente con el manejo del equipo, sino que es consecuencia de otros factores como la temperatura de entrada del gas, el caudal del gas y la concentración de sólidos en el líquido. La temperatura de salida guarda relación con humedad residual en el producto, un aumento en la temperatura de salida puede indicar una mayor evaporación, pero también puede afectar la composición química del producto.

Estudios refieren que temperaturas de salida entre 70 °C y 100 °C son ideales para mantener la integridad de los compuestos sensibles al calor. Temperaturas de salida más altas pueden resultar en una mayor formación de aglomerados durante el almacenamiento, lo que puede afectar la fluidez del polvo.

- Caudal de gas de secado (aire/nitrógeno)

Se refiere a la cantidad de aire (o gas de secado) que fluye a través del secador, lo que es fundamental para la eficiencia del proceso de secado. Es un factor clave en la transferencia de calor y masa, cuanto mayor sea el caudal de alimentación, mayor será el tamaño de partícula del producto final. Además, el uso de caudales de alimentación altos aumenta el contenido de humedad; por lo tanto, se debe establecer una mayor diferencia entre la temperatura de entrada y la de salida. Un

caudal de aire adecuado asegura que las partículas se mantengan en suspensión y se evapore la humedad de manera eficiente, garantizando que las gotas atomizadas se sequen completamente antes de alcanzar las paredes de la cámara o el sistema de recolección. Cuando el equipo opera con disolventes orgánicos, este caudal corresponde a nitrógeno, lo que obliga a tener en cuenta sus propiedades termodinámicas (como el calor específico y la densidad), que difieren de las del aire. En estas condiciones, el control del flujo gaseoso requiere adicionalmente la purga previa y el monitoreo continuo de oxígeno para mantener el sistema por debajo del límite inferior de explosividad (usualmente < 6 %).

Si bien, un caudal de aire alto puede mejorar la eficiencia de secado, también puede aumentar el riesgo de oxidación y degradación térmica de los productos sensibles. Un caudal de aire de 600 L/h es común en aplicaciones de secado de productos alimenticios, mientras que, en aplicaciones farmacéuticas, se pueden utilizar caudales de hasta 1000 L/h para mejorar la eficiencia.

En contraste, un caudal de aire insuficiente puede resultar en un secado incompleto, lo que lleva a un aumento en la humedad residual del producto final, aspecto crítico ya que puede afectar la estabilidad y la eficacia de los ingredientes activos.

El modo de flujo del aire (co-corriente, contracorriente o mixto) también afecta el perfil de secado. En configuraciones co-corriente, el aire caliente y las gotas se mueven en la misma dirección, lo que proporciona un secado más suave y uniforme, ideal para productos

sensibles. En contracorriente, el aire caliente se encuentra con las partículas ya secas, lo que puede mejorar la eficiencia térmica, aunque con riesgo de sobrecalentamiento.

- Velocidad de alimentación o bombeo

Es la tasa a la que se introduce la disolución o suspensión en el secador, este parámetro afecta directamente el tamaño de las gotas generadas y, por lo tanto, el tamaño final de las partículas. Una mayor velocidad de bombeo puede resultar en un aumento del tamaño de las gotas, lo que a su vez puede llevar a un aumento en el tamaño de las partículas finales.

Se refiere que velocidades de alimentación de 5 a 15 mL/min son comunes, un aumento en la velocidad de bombeo puede llevar a un aumento en el tamaño de las gotas de hasta un 20%, lo que puede resultar en partículas más grandes y menos uniformes.

La literatura sugiere mantener la temperatura de salida como referencia para ajustar la velocidad de alimentación, una disminución de esta temperatura indica exceso de líquido y la necesidad de reducir dicha velocidad.

En procesos de microencapsulación, la alimentación debe mantenerse constante y uniforme para garantizar la homogeneidad del producto final y la reproducibilidad del proceso. Adicionalmente, la viscosidad del fluido y el tipo de bomba (peristáltica, de membrana, etc.) pueden influir en la estabilidad del caudal.

- Tamaño de gota y su influencia

El tamaño de la gota es un factor crítico en el proceso de secado por aspersión, ya que influye en la tasa de evaporación y en la distribución del tamaño de las partículas.

En las gotas más pequeñas el líquido tiende a evaporarse más rápidamente, lo que puede resultar en partículas más finas. El tamaño de la gota puede ser controlado mediante la presión del atomizador y el tipo de boquilla utilizada. Por ejemplo, el uso de boquillas de dos fluidos puede generar gotas con un diámetro promedio de 10 a 30 μm, lo que es ideal para aplicaciones de inhalación.

En procesos de encapsulación de compuestos bioactivos, el control del tamaño de gota es esencial para lograr partículas que protejan eficazmente al activo durante el almacenamiento y liberación controlada en aplicaciones posteriores

6.4 Relación entre los parámetros de salida y de entrada

La influencia de los parámetros de entrada sobre las variables de salida en el secado por aspersión es fundamental para optimizar la calidad del producto final. A continuación, se presenta un resumen de cómo estos parámetros afectan el proceso:

Temperatura de entrada del aire caliente: Mejora la eficiencia del secado, aumenta la temperatura de salida y se reduce el contenido de humedad residual. Colateralmente, se reduce la pegajosidad de producto a las paredes del secador. Sin embargo, temperaturas demasiado altas pueden provocar la degradación térmica de compuestos sensibles de metabolitos como los polifenoles, vitaminas y

proteínas.

Flujo de alimentación: Un flujo alto puede resultar en gotas más grandes y menor tiempo de residencia, lo que incrementa la humedad residual y el tamaño de las partículas. Además, se disminuye la temperatura de salida del aire, ya que existe mayor cantidad de disolvente para evaporar. Un flujo bajo permite mejor secado, pero puede disminuir la eficiencia del proceso.

La concentración de sólidos en la alimentación: un mayor contenido de sólidos favorece el rendimiento de la encapsulación al acelerar la formación de la matriz protectora. Sin embargo, este incremento eleva la viscosidad de la solución, lo que puede comprometer la homogeneidad de la aspersión. Respecto a las propiedades del producto, una mayor carga de sólidos permite obtener polvos con menor humedad residual; no obstante, debe considerarse que, al reducirse la carga evaporativa, la temperatura de salida tiende a incrementarse, lo que exige un control riguroso para proteger metabolitos termolábiles.

Humedad del aire: Al aumentar la humedad del aire se incrementa la humedad residual del producto final, lo cual conlleva a que el polvo se pegue a las paredes del secador.

Presión de aspersión o velocidad del gas atomizador: A mayor presión, se obtienen gotas más pequeñas y partículas más finas.

6.5 Influencia de los disolventes orgánicos en el secado por aspersión

El empleo de disolventes orgánicos (como etanol, metanol o acetona) en lugar de soluciones acuosas modifica sustancialmente la transferencia de masa y calor durante la aspersión. Esta transición impacta en cuatro aspectos del proceso:

- Perfil térmico y temperatura de salida: Debido a que los solventes orgánicos poseen un calor latente de vaporización considerablemente inferior al del agua, el gas de secado experimenta una menor pérdida de energía térmica durante la evaporación. En consecuencia, manteniendo constantes la temperatura de entrada y el flujo de alimentación, la temperatura de salida tiende a incrementarse de manera significativa.

- Morfología y tamaño de partícula: La alta volatilidad de estos solventes acelera la formación prematura de una corteza sólida en la superficie de la gota (secado rápido). Este fenómeno suele inducir un incremento en el tamaño de las partículas finales debido a la expansión de los vapores internos atrapados, lo que genera microesferas huecas o de baja densidad aparente, a pesar de que el tamaño inicial de la gota suele ser menor por la baja tensión superficial del disolvente orgánico.

- Eficiencia del proceso y humedad residual: La baja afinidad de los solutos por el solvente y la alta presión de vapor de este último favorecen una desolvatación más profunda, reduciendo drásticamente la humedad (o contenido de solvente) residual en el polvo. Asimismo, la rápida transición del estado líquido al sólido minimiza la fase "pegajosa" del producto, reduciendo la

adherencia en las paredes de la cámara y optimizando el rendimiento de recuperación en el ciclón.

6.6 Excipientes utilizados en el secado por aspersión

En el contexto del secado por aspersión, un excipiente o *carrier* es una sustancia inerte añadida a una formulación líquida para facilitar su aspersión, secado y posterior recuperación en forma de polvo. Estos excipientes no solo permiten el procesamiento eficiente del material, sino que también cumplen funciones fundamentales para conservar la integridad, bioactividad y propiedades físico-químicas del ingrediente activo, como extractos vegetales, compuestos farmacéuticos o alimentos funcionales. Su elección depende de múltiples factores, incluyendo la naturaleza del compuesto activo, el tipo de secador utilizado y las características deseadas en el producto final.

En los procesos de secado por aspersión, los excipientes actúan como agentes de recubrimiento o soporte estructural para los compuestos bioactivos que se desea encapsular. Su función principal es proteger el principio activo durante el proceso térmico, mejorar la estabilidad del polvo final y facilitar su manejo, conservación y liberación. Entre los excipientes más utilizados destacan los polisacáridos, derivados de almidón, azúcares y compuestos celulósicos, seleccionados por su alta solubilidad en agua, baja higroscopicidad y buena capacidad para formar matrices protectoras estables.

Maltodextrina: un polisacárido derivado de la hidrólisis del almidón, es uno de los excipientes más utilizados en la industria alimentaria y farmacéutica debido a su bajo costo, sabor neutro, alta solubilidad en

agua y buena capacidad para formar películas delgadas. Su eficiencia para encapsular compuestos fenólicos ha sido ampliamente validada, aunque presenta limitaciones en términos de resistencia a la humedad y capacidad de formar barreras frente a gases o luz. Por esta razón, suele combinarse con otros excipientes, como la goma arábiga, para mejorar la eficiencia de encapsulación y estabilidad del producto.

Goma arábiga: es un exudado vegetal complejo rico en polisacáridos y glicoproteínas, destaca por su excelente capacidad emulsificante y formadora de película, siendo especialmente eficaz para encapsular compuestos lipofílicos y aceites esenciales. Su estructura ramificada permite una buena dispersión del activo en la matriz y ofrece propiedades funcionales que protegen al núcleo frente a la oxidación. No obstante, su disponibilidad puede ser limitada y su costo más elevado en comparación con otros agentes, por lo que su uso suele reservarse para aplicaciones específicas de alta exigencia.

Almidones modificados: los tratados con anhídrido octenil succínico (OSA), han ganado popularidad como excipientes encapsulantes debido a su mayor resistencia térmica y capacidad de formar matrices más estables frente a la humedad. Estos almidones presentan una estructura anfifílica, lo que les permite formar emulsiones estables y ofrecer una liberación controlada del principio activo. Su uso ha sido reportado con éxito para encapsular compuestos fenólicos y aromas volátiles, reduciendo la degradación de estos durante el almacenamiento.

Ciclodextrinas: especialmente la β-ciclodextrina, son oligosacáridos

cíclicos con capacidad para formar complejos de inclusión con moléculas lipofílicas, aumentando su solubilidad y estabilidad. Su estructura hidrofílica externa e hidrofóbica interna permite encapsular compuestos de baja polaridad, favoreciendo la protección frente a la oxidación y mejorando la biodisponibilidad en sistemas biológicos. Aunque su costo es más elevado, son excipientes valorados en formulaciones nutracéuticas y farmacéuticas por su versatilidad y eficacia.

Celulosa microcristalina y sus derivados, como la hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), se utilizan por su capacidad de formar películas resistentes, mejorar la cohesividad del polvo y proporcionar estabilidad física a largo plazo. Estos compuestos, derivados de la celulosa, son poco solubles en agua, pero ofrecen excelentes propiedades reológicas que favorecen la dispersión del principio activo y reducen la aglomeración durante el almacenamiento. En aplicaciones farmacéuticas, estos excipientes son particularmente útiles para lograr liberaciones controladas y proteger sustancias sensibles al pH gástrico.

La elección del agente encapsulante o material de recubrimiento es un proceso crítico para el que se deben considerar tanto las características del agente como las del extracto a trabajar. La preparación de la solución alimentadora se da en dependencia del compuesto bioactivo a encapsular, sea este hidrofílico o hidrofóbico. Cuando se trata de un compuesto hidrofílico el agente encapsulante debe disolverse en un medio adecuado (comúnmente agua); por el contrario, para encapsular compuestos hidrofóbicos mediante secado por aspersión, se requiere la

formación previa de una emulsión aceite en agua, en la que el compuesto bioactivo se disperse con la ayuda de un surfactante junto con el agente encapsulante polimérico.

Para la correcta selección del agente encapsulante deben considerarse también las propiedades fisicoquímicas del agente, tales como su solubilidad en agua, viscosidad, higroscopicidad, capacidad de formar películas, la estabilidad térmica y la compatibilidad con el compuesto que encapsulará. De igual manera, el agente encapsulante debe ser capaz de aumentar la temperatura de transición vítrea (Tg) y brindar una protección adecuada a los compuestos sensibles al calor y la oxidación. Cabe recalcar que la transición vítrea puede considerarse como la temperatura a la cual un material, comúnmente sólido y amorfo es capaz de cambiar de un estado vítreo (duro y frágil) a un estado gomoso o pegajoso.

La compatibilidad entre extracto (compuestos bioactivos) y excipiente es un criterio esencial en el diseño de formulaciones. La interacción entre ambos puede determinar la viabilidad del proceso de secado por aspersión y la calidad del producto final. Factores como pH, polaridad, estabilidad térmica y presencia de grupos funcionales reactivos deben evaluarse para evitar:

- Reacciones químicas no deseadas (oxidación, hidrólisis, caramelización).
- Disminución de la bioactividad del extracto.
- Formación de partículas amorfas inestables o de difícil manejo.

Técnicas como análisis térmico diferencial (DSC), espectroscopía infrarroja (FTIR) y microscopía electrónica pueden emplearse para estudiar la interacción entre el excipiente y los compuestos activos.

6.7 Ventajas y desventajas del secado por aspersión

Las características del secado por aspersión le proporcionan diferentes ventajas para el manejo y la obtención de diversos productos tanto para industria alimentaria como farmacéutica, entre los cuales se destacan:

- El control de diferentes parámetros para el producto final como la morfología, densidad, propiedades de flujo, dispersabilidad y granulometría, permiten la obtención de polvos granulares o aglomerados; la configuración de la temperatura de secado y el tiempo de contacto facilitan la preservación de los componentes bioactivos de interés, por ende, se pueden obtener productos con una calidad constante;

- La versatilidad de esta tecnología permite transformar soluciones, suspensiones o emulsiones en sólidos estables en una sola etapa, asegurando la inocuidad microbiológica del producto final. Al minimizar la manipulación y reducir instantáneamente la actividad de agua, se preserva la estabilidad de los extractos vegetales; los productos secados por aspersión poseen una buena estabilidad, evitando procesos bioquímicos no deseados como el pardeamiento y la oxidación, y una vida útil relativamente larga, a la vez que son fáciles de almacenar y preparar; se pueden manejar grandes volúmenes manteniendo un buen control del

proceso, permitiendo trabajar tanto a pequeña escala como gran escala de manera eficiente.

Pese a las ventajas indiscutibles que posee el secado por aspersión, se pueden encontrar también algunas desventajas y desafíos que pueden limitar su aplicabilidad, o en su defecto, necesitar de ajustes para llevar a cabo el proceso. Uno de los principales problemas asociados es la formación de una estructura amorfa, la cual es un estado inestable desde el punto de vista termodinámico, en condiciones de no equilibrio producto de la eliminación del medio de dispersión, de la masa fundida por enfriamiento o por subenfriamiento. Es de ahí que, las formas amorfas tienen una estabilidad menor en comparación a las cristalinas a raíz de los cambios bruscos de la viscosidad, calor especifico, relación mecánica y volumen molecular, que dificultan o imposibilitan el reordenamiento alineado de las moléculas para cristalizar.

Con este fundamento, el secado por aspersión posee una limitación importante con mezclas ricas en azúcares y ácidos orgánicos, que al pasar por la aspersión se producen finas gotas en las que se evapora rápidamente el disolvente y el producto pasa a ser un sirope y finalmente un sólido. Sin embargo, durante el secado, las gotas pueden resultar con una textura plástica y, por consiguiente, pegajosa, afectando en gran medida a la fluidez, calidad y estabilidad del producto final.

A estas limitaciones se suma la alta complejidad técnica y los elevados costos operativos cuando el extracto vegetal obliga al uso

de disolventes orgánicos o mezclas que superan el 20 % de alcohol. Transitar de un diseño convencional a uno de ciclo cerrado (*Inert Loop*) implica acoplar sistemas de monitorización de gases, condensadores de refrigeración profunda (chillers) y un consumo constante de gas inerte, lo que encarece sustancialmente el proceso frente al secado de extractos puramente acuosos.

6.8 Ejemplos de aplicaciones del secado por aspersión en extractos vegetales

El secado por aspersión fue eficaz para valorizar la pulpa de cupuaçu, permitiendo obtener microencapsulados con excelentes propiedades fisicoquímicas y funcionales. La mejor formulación incluyó una mezcla de inulina y maltodextrina como material de pared, logrando alta eficiencia de encapsulación, estabilidad del producto, baja humedad (1,35 %), baja actividad de agua (0,22) y alta solubilidad (93,26 %). Además, se obtuvieron microcápsulas con morfología esférica y lisa, ideales para alimentos. La formulación óptima permitió encapsular hasta el 97,96 % de ácido ascórbico y el 71,09 % de compuestos fenólicos, con una liberación intestinal del 76,7 % del ácido ascórbico, lo que demuestra su potencial en alimentos funcionales con liberación controlada (Acosta et al., 2023).

Dicha técnica también fue aplicada exitosamente para la microencapsulación de extractos de cálices de *Hibiscus sabdariffa L.*, logrando productos en polvo con alto contenido de compuestos fenólicos y antocianinas, además de buena capacidad antioxidante. Este proceso permitió obtener micropartículas estables y manipulables,

adecuadas para su uso potencial en alimentos funcionales o fitofármacos.

Las mejores condiciones fueron obtenidas a 150 °C de temperatura de entrada y con la mezcla de encapsulantes goma arábiga/maltodextrina en proporción 60/40 (G60/MD40). Bajo esta combinación, se alcanzó el mayor contenido de fenoles totales y antocianinas en el producto final. Además, se observó que esta mezcla proporcionó una mejor retención de los compuestos bioactivos, incluso comparado con extractos concentrados por rotoevaporación.

Por otro lado, cuando se usó la mezcla G40/MD60 (mayor proporción de maltodextrina), también a 150 °C, se obtuvo la mejor capacidad antioxidante (equivalente a Trolox), lo que resalta la influencia de la matriz encapsulante sobre la bioactividad del producto. Asimismo, el secado por aspersión produjo polvos de menor humedad residual al trabajar con temperaturas de entrada de 190 °C, aunque esto podría comprometer la integridad de compuestos sensibles al calor, como los polifenoles (Campo-Fernández et al., 2021).

En una investigación realizada con la cáscara de *Hylocereus polyrhizus* (pitaya roja), se optimizó el secado por aspersión de un extracto de la cáscara de pitaya, utilizando un diseño de compuesto central con metodología de superficie de respuesta, evaluándose el efecto de la temperatura de entrada (155–175 °C), temperatura de salida (75–85 °C) y la concentración de maltodextrina DE10 (8–22% p/p) en las características del polvo obtenido. Los polvos presentaron alta retención de betacianinas, baja actividad de agua y propiedades

favorables de color, solubilidad e higroscopicidad. Los modelos obtenidos fueron significativos ($p<0,05$) con altos valores de determinación (R^2 entre 0,896 y 0,979). La concentración de maltodextrina fue la variable más influyente, mientras que la temperatura de salida tuvo el menor efecto. La región óptima de operación se estimó en una temperatura de entrada de 165 °C, salida de 80 °C y 15% de maltodextrina (Bakar et al., 2013).

6.9 Liofilización como opción de secado de extractos naturales

6.9.1 Generalidades

La liofilización, también denominada secado por congelación o criodesecación, es un método de desecación que consiste en eliminar el agua de un material previamente congelado mediante la sublimación directa del hielo bajo condiciones de vacío. El proceso se desarrolla en tres etapas sucesivas: congelación, secado primario o sublimación y secado secundario o desorción.

Al evitar el uso de altas temperaturas, este método resulta especialmente adecuado para sustancias termolábiles, como compuestos nutracéuticos, metabolitos de extractos vegetales, principios activos farmacéuticos e ingredientes alimentarios, que suelen protegerse con materiales formadores de pared como disacáridos, gomas o maltodextrinas. La liofilización se emplea ampliamente tanto en la industria alimentaria, donde contribuye a preservar propiedades nutricionales y organolépticas, como en la industria farmacéutica, donde permite conservar ingredientes activos y elaborar formas farmacéuticas como polvos inyectables y liofilizados

orales.

Además, este proceso ofrece ventajas técnicas y comerciales significativas: permite conservar productos sin necesidad de cadena de frío, con contenidos de humedad residuales inferiores al 15 % y elevada estabilidad microbiológica; minimiza el encogimiento del producto y mantiene su aspecto, textura, sabor, aroma y características nutricionales y logra extraer más del 95 % del agua presente. Estas características no solo prolongan la estabilidad y facilitan la reconstitución rápida del producto, sino que también incrementan su valor agregado, al reducir costos de almacenamiento y transporte, así como posibilitar el manejo de volúmenes significativamente mayores sin refrigeración.

6.9.2 Fundamento del método

La liofilización o secado por congelación, se fundamenta en los principios físico-químicos que rigen los cambios de estado de la materia, particularmente del agua, que es el componente mayoritario de la mayoría de los productos alimentarios, biológicos y farmacéuticos. Toda sustancia puede existir en tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso y las transiciones entre ellos dependen de la temperatura y la presión, que afectan directamente la energía cinética de las moléculas y, por ende, la cohesión interna del material (figura 88). En los puntos que constituyen las curvas existen dos fases en equilibrio, y en las áreas que están delimitadas por las curvas se presenta solo una fase.

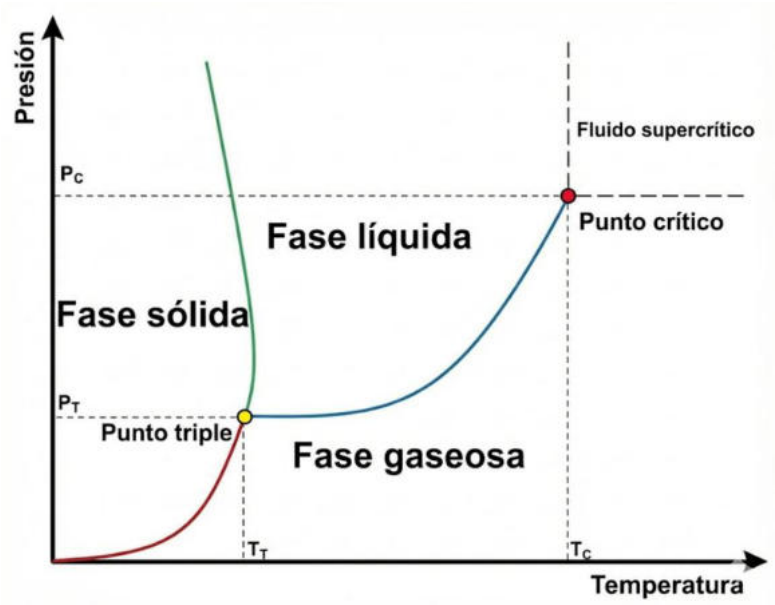


Figura 88. Diagrama de estado físico del agua. Pc y Tc: Presión y temperatura crítica. PT y TT: Presión y temperatura del punto triple.

El proceso de liofilización se basa en la sublimación del agua, es decir, la transición directa del hielo a vapor sin pasar por el estado líquido. Este fenómeno solo es posible si la operación se realiza por debajo del punto triple del agua (273,16 K/0,0099 °C y 616,73 Pa/4,579 mm Hg), donde coexisten las tres fases (figura 3).

Al aplicar condiciones de vacío y temperatura controladas, el hielo presente en el producto sólido sublima y el vapor se deposita en las paredes del condensador, permitiendo deshidratar el material sin someterlo a altas temperaturas que puedan desnaturalizar proteínas o degradar compuestos termolábiles.

En soluciones complejas, como aquellas que contienen sales o solutos diversos, la temperatura y la presión de sublimación deben ajustarse

cuidadosamente para evitar la fusión intersticial y garantizar la cristalización total del agua, alcanzando el punto eutéctico. Este punto representa la temperatura mínima a la cual todos los componentes de la solución están completamente congelados, y es crítico para el éxito del proceso. El control de este parámetro se realiza mediante técnicas como la resistividad eléctrica y el análisis térmico diferencial, que permiten identificar el momento exacto de cristalización del sistema y evitar daños al producto durante la sublimación.

En síntesis, la liofilización es un proceso termodinámico que combina control de temperatura y presión con conocimientos de la fase sólida y vapor del agua, asegurando la conservación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del material tratado. Este fundamento permite su aplicación segura y eficiente en la industria farmacéutica, alimentaria y biotecnológica.

6.9.3 Excipientes utilizados para el secado por liofilización

En la liofilización de productos farmacéuticos y extractos naturales, los principios activos rara vez se liofilizan solos. El objetivo es crear una matriz sólida que inmovilice al Ingrediente Farmacéutico Activo (IFA), previniendo su degradación física (agregación, desnaturalización) y química (hidrólisis, oxidación) tanto durante el proceso como en el almacenamiento.

El diseño de una formulación liofilizada para extractos naturales no solo busca la estabilidad química, sino también la manejabilidad tecnológica del polvo resultante. Muchos extractos de frutas y plantas son ricos en azúcares de bajo peso molecular (glucosa, fructosa) y

ácidos orgánicos, los cuales poseen una temperatura de transición vítrea (*Tg*) extremadamente baja. Si liofilizamos estos extractos puros, obtendremos un material pegajoso ("sticky") o colapsado debido a la depresión del punto de congelación y la fusión incipiente.

Para evitar el fenómeno de *caking* (aglomeración por absorción de humedad) y la pérdida de volátiles, se utilizan **ela xtracción**materiales de pared. A continuación, se detallan los excipientes de mayor uso en productos naturales, seguidos de los coadyuvantes clásicos.

1. Carbohidratos poliméricos y agentes de pared (esenciales en extractos)

Estos excipientes son fundamentales para elevar la *Tg* de la mezcla, encapsular compuestos volátiles y proporcionar estructura al "cake" liofilizado.

- **Maltodextrinas (MD):** Es el excipiente más utilizado en la liofilización de extractos naturales herbales, debido a su bajo costo y alta solubilidad. Se clasifican por su equivalente de dextrosa (DE). Para liofilización, se prefiere maltodextrinas con un DE bajo (< 20). Un DE menor implica cadenas más largas, lo que reduce la higroscopicidad del polvo final y aumenta la temperatura de transición vítrea, proporcionando mayor estabilidad contra el colapso estructural. Este excipiente disminuye la pegajosidad, mejora la fluidez del polvo y protege contra la oxidación al formar una matriz amorfa que encapsula los bioactivos.

- **Goma arábiga (GA):** Es considerada el de mayor interés para la encapsulación de polifenoles y aceites esenciales volátiles. Posee excelentes propiedades emulsificantes, lo que la hace ideal para extractos que contienen una fase lipídica (ej. oleorresinas). Actúa evitando la reacción de Maillard (pardeamiento) y reteniendo compuestos aromáticos volátiles que de otro modo se perderían con el vacío. Su principal desventaja es el costo elevado frente a las maltodextrinas.

- **Inulina:** Un polisacárido de fructosa que está ganando terreno como alternativa funcional a la goma arábiga y las maltodextrinas. Posee un valor agregado, además de actuar como agente de pared y crioprotector, la inulina es una fibra dietética con actividad prebiótica. Estudios recientes han demostrado su eficacia para proteger bacterias probióticas intestinales (como *Lactobacillus* y *Bifidobacterium*) durante la liofilización, mejorando su viabilidad postproceso.

- **Ciclodextrinas (*β*-CD):** Son oligosacáridos cíclicos con una estructura de cono truncado: hidrofílica por fuera e hidrofóbica por dentro. Se usan para la encapsulación molecular de compuestos lipófilos (ej. aceites esenciales). Protegen a estas moléculas de la oxidación, la luz y el calor, y son útiles para enmascarar sabores amargos típicos de ciertos fitofármacos.

2. Disacáridos: crioprotectores de estructuras biológicas

Aunque comunes en fármacos, son vitales en productos naturales para

proteger estructuras celulares (en probióticos o levaduras) y liposomas.

Dentro de este grupo se encuentran la trehalosa y la sacarosa. Actúan mediante la teoría del reemplazo de agua y la vitrificación. Son esenciales cuando el objetivo es preservar la integridad de membranas lipídicas (ej. Liposomas de lecitina de soja con extractos) o la actividad enzimática (ej. bromelina, papaína). La trehalosa destaca por su alta *Tg* y su capacidad superior para estabilizar bicapas lipídicas y proteínas durante la congelación, evitando la formación de cristales de hielo intracelulares que podrían romper las estructuras biológicas.

3. Otros excipientes farmacéuticos

Aunque menos protagonistas en extractos vegetales brutos, son cruciales si se trabaja con fracciones purificadas o formulaciones biotecnológicas mixtas.

- Agentes de carga cristalinos (manitol, glicina): se utilizan cuando el principio activo es muy potente y está en baja concentración. El manitol cristaliza y forma un esqueleto rígido que evita que la pastilla se colapse, mejorando la apariencia estética del producto.

- Polímeros sintéticos (PVP, PEG): la polivinilpirrolidona (PVP) se usa para inhibir la cristalización de ciertos activos y aumentar la viscosidad, elevando la *Tg* de la formulación.

- Buffers: como histidina y citrato. Son críticos para mantener el pH estable durante la congelación, ya que los cambios bruscos de pH pueden desnaturalizar péptidos o proteínas sensibles.

- Tensioactivos (polisorbatos): utilizados en concentraciones mínimas para evitar la agregación de proteínas en las interfaces hielo-agua.

En la tabla 13 se ilustra la aplicación de excipientes en el campo de los productos naturales.

Tabla 13. Excipientes para la liofilización de matrices naturales.

Excipiente	**Tipo**	**Aplicación principal en productos naturales**	**Ventaja clave**
Maltodextrina (DE < 20)	Polisacárido	Jugos de frutas, extractos acuosos, pulpas.	Eleva la *Tg*, reduce la higroscopicidad y evita el *caking* (aglomeración).
Goma arábiga	Goma natural	Aceites esenciales, oleorresinas, emulsiones.	Excelente emulsificante y retenedor de aromas volátiles.
Inulina	Fibra soluble	Probióticos, simbióticos, extractos funcionales.	Efecto crioprotector y con valor nutricional (prebiótico).
Ciclodextrina	Oligosacárido cíclico	Compuestos bioactivos lipófilos, enmascaramiento de sabor.	Encapsulación molecular ("huésped-anfitrión"), protección contra oxidación.

Trehalosa	Disacárido	Liposomas, enzimas, extractos ricos en proteínas.	Máxima protección de membranas y estructuras nativas (vitrificación).

6.9.4 Equipamiento

Un secador por congelación consta de varios partes que interactúan para llevar a cabo el proceso de liofilización de manera controlada y efectiva. Estas condiciones se alcanzan gracias a equipos especializados denominados liofilizadores, equipos complejos que integran cámara de secado, condensador, sistemas de refrigeración, fluido térmico y vacío, todos controlados de forma automática (Figura 89). El conocimiento detallado de sus componentes resulta esencial para optimizar ciclos de secado y garantizar la calidad del producto final, especialmente cuando se trata de plantas medicinales, extractos botánicos, productos farmacéuticos o alimentos funcionales.

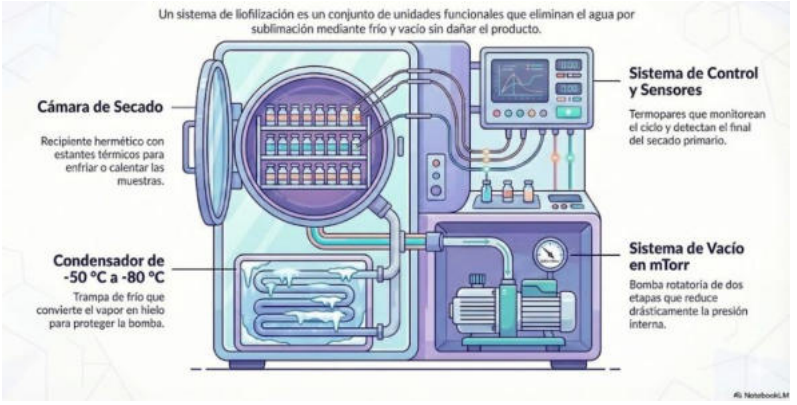


Figura 89. Esquema general de un equipo de liofilización.

Fuente. Imagen creada mediante inteligencia artificial y revisada por los autores.

- **Cámara de secado**

  La cámara de liofilización, también llamada gabinete o cabina, es un recipiente hermético al vacío, generalmente construido en acero inoxidable y con acabado interior altamente pulido para facilitar la limpieza y evitar contaminación. La cubierta exterior está revestida para minimizar pérdidas de frío y mejorar la eficiencia energética. Su función principal radica en alojar las bandejas donde se coloca el producto.

- **Estantes térmicamente controlados**

  Superficies que sostienen los contenedores con la muestra. Internamente están diseñados para permitir el flujo de un fluido térmico (como aceite de silicona), lo que posibilita un control preciso de la temperatura en fases tanto de congelación como de secado.

  Los estantes calefactados/refrigerados tienen múltiples funciones: congelar el producto (cuando el proceso no incluye precongelación externa); suministrar calor controlado durante la sublimación primaria y la desorción secundaria y servir de soporte mecánico para el material vegetal o para viales. Tiene tamaños variables, desde un único estante en equipos de investigación hasta superficies de varios m^2 en equipos industriales.

- **Sistema de fluido térmico**

  El proceso de liofilización requiere que el producto se congele

primero y luego se aplique energía en forma de calor durante las fases de secado del ciclo. Este intercambio de energía se realiza usualmente mediante la circulación de un fluido, habitualmente silicona, a través de los estantes a la temperatura deseada. Dicha temperatura se regula mediante intercambiadores de calor enfriados por compresores y resistencias eléctricas externas.

- **Condensador o trampa fría**

Dispositivo encargado de capturar el vapor de agua mediante congelación. Puede estar dentro o fuera de la cámara principal y se mantiene a temperaturas extremadamente bajas, entre -40 °C y -80 °C, para asegurar el arrastre y congelación del vapor. Colateralmente, tiene la función secundaria de evitar la migración del vapor hacia las bombas de vacío, prolongando su vida útil.

- **Sistema de refrigeración**

Incluye compresores y refrigerantes que enfrían tanto los estantes como el condensador. En equipos industriales, puede usarse refrigeración en cascada con diferentes fluidos refrigerantes para alcanzar temperaturas muy bajas (de -40 °C a -80 °C) con rapidez, evitando la formación de cristales de hielo grandes que deterioren la matriz vegetal

- **Sistema de vacío**

El vacío profundo es esencial para que la sublimación ocurra a baja temperatura. El sistema está conformado por bombas de

vacío (rotativas, de paletas u otras), válvulas y tuberías que permiten mantener presiones reducidas imprescindibles para la sublimación del hielo. El nivel de vacío requerido es entre 50–100 μbar durante la sublimación primaria.

- **Sistema de control automatizado**

  Incluye sensores de temperatura y presión, y software para automatizar, registrar y monitorizar el ciclo completo.

La evolución tecnológica actual de los liofilizadores apunta hacia:

1. Procesos más cortos, seguros y reproducibles, gracias a sensores precisos y control avanzado.

2. Menor consumo energético mediante optimización térmica y vacío eficiente.

3. Flexibilidad en el escalado industrial con diseños modulares y algoritmos predictivos.

4. Tecnologías híbridas y monitoreo en línea que aseguran calidad farmacéutica y alimentaria sin comprometer compuestos sensibles.

6.10 Etapas del proceso de liofilización

Este proceso comprende tres etapas fundamentales que se desarrollan sucesivamente: congelación, secado primario y secado secundario (Figura 90).



Figura 90. Etapas del proceso de liofilización.

Fuente. Imagen creada mediante inteligencia artificial y revisada por los autores.

6.10.1 Congelación

La primera etapa consiste en solidificar el agua presente en el producto mediante el descenso controlado de la temperatura. Durante la congelación, el agua libre cristaliza formando hielo, mientras que el agua ligada permanece en estado amorfo o vítreo. La velocidad de congelación influye en el tamaño de los cristales: un enfriamiento rápido genera cristales pequeños y homogéneos, mientras que uno lento produce cristales más grandes, lo cual facilita posteriormente la sublimación, pero puede afectar la estructura del material. Un adecuado control de esta etapa es crítico, ya que determina la porosidad de la matriz y la eficiencia del secado posterior.

6.10.2 Secado primario (sublimación)

Una vez congelado el producto, se reduce la presión por debajo del punto triple del agua y se aplica energía térmica controlada para inducir la sublimación del hielo. En esta etapa se elimina la mayor parte del agua (alrededor del 90 %), manteniendo la temperatura del producto por debajo del colapso o del punto eutéctico para evitar que la estructura se derrumbe. La velocidad de sublimación depende de factores como la superficie de transferencia de calor, el espesor del material congelado y el nivel de vacío alcanzado. La finalidad es retirar el hielo sin pasar por la fase líquida, conservando la integridad química, biológica y mecánica del producto.

6.10.3 Secado secundario (desorción)

En la última etapa se elimina el agua no congelada o adsorbida, la cual está unida molecularmente a la matriz del producto. Para ello, se eleva gradualmente la temperatura del material, siempre bajo condiciones de vacío, favoreciendo la desorción del agua residual hasta alcanzar niveles de humedad finales extremadamente bajos (generalmente menores al 1 %). Este secado secundario es esencial para garantizar la estabilidad fisicoquímica del producto durante su almacenamiento prolongado, evitando reacciones de hidrólisis o degradación microbiana.

En resumen, la liofilización constituye un proceso que combina bajas temperaturas con presiones reducidas y un cuidadoso control térmico, resultando en un producto estable, poroso y fácilmente rehidratable.

6.11 Ventajas del secado por liofilización

La liofilización, o secado por congelación, es un proceso que ofrece múltiples beneficios en la conservación de productos sensibles al calor y la humedad. Entre sus principales ventajas se destacan:

- **Temperaturas bajas durante el proceso**: La liofilización opera a temperaturas inferiores a las que muchas sustancias inestables sufren cambios químicos, lo que permite conservar la integridad de compuestos termolábiles como vitaminas y proteína.

- **Mínima pérdida de compuestos volátiles**: Al realizarse a bajas temperaturas, la pérdida de constituyentes volátiles es mínima, lo que contribuye a mantener el perfil sensorial y nutricional del producto.

- **Preservación de la estructura y propiedades**: Dado que el producto se conserva en estado congelado durante todo el proceso, no se produce formación de espuma ni burbujas, evitando procesos de desnaturalización de las proteínas y manteniendo su estructura original.

- **Distribución uniforme del soluto**: El soluto permanece uniformemente disperso y distribuido sin sufrir concentración ni tendencia a la coagulación, lo que garantiza una rehidratación homogénea y rápida.

- **Estructura porosa y alta solubilidad**: El producto liofilizado se presenta como un armazón sólido sumamente poroso que ocupa esencialmente el mismo espacio total que ocupaba la muestra líquida; el residuo final consta de una estructura muy porosa.

Como resultado de estas características, su solubilización es extremadamente rápida y completa.

- **Contenido de humedad muy bajo**: El producto final obtenido posee un contenido muy bajo en humedad, pudiendo llegar a ser inferior al 0,5 %, lo que contribuye a su estabilidad microbiológica y prolonga su vida útil.

- **Prevención del desarrollo bacteriológico y cambio enzimático**: El desarrollo bacteriológico y el cambio enzimático no tiene lugar, ni durante el proceso de la liofilización ni cuando el producto está desecado, debido a la baja actividad de agua.

- **Protección contra la oxidación**: Dado que todo el proceso de sublimación transcurre a un elevado vacío, la cantidad de oxígeno presente es nula, por lo que los constituyentes fácilmente oxidables quedan protegidos.

Por todo lo antes expuesto se puede concluir que la liofilización ofrece una excelente estabilidad, una fácil, rápida y completa solubilización; una conservación ilimitada; una buena protección contra factores externos agresivos y una rápida disponibilidad de uso.

Sin embargo, dicha técnica pudiera presentar desventajas en el trabajo con compuestos volátiles, los cuales pueden eliminarse ante un vacío muy alto. Adicionalmente, es un proceso más costoso que otras técnicas de secado.

6.12 Aplicaciones del secado por liofilización en extractos vegetales

Como antes se ha comentado, la liofilización se muestra como una técnica de secado altamente valorada por su capacidad para preservar compuestos sensibles al calor, su estructura molecular y consecuentemente, su actividad biológica original. Su aplicación se extiende en diferentes campos, tales como el farmacéutico, alimentario y tecnológico. En el campo de la **fitoquímica,** también destaca por su utilidad para conservar la integridad de los metabolitos especializados.

En el ámbito farmacéutico, la liofilización es esencial para prolongar la estabilidad de productos como vacunas, proteínas y biológicos altamente sensibles. Al eliminar el agua y colocar el producto en un vial seco, se facilita su conservación, transporte y posterior reconstitución para su administración.

En la Industria alimentaria, la liofilización gana espacio cuando se busca preservar propiedades organolépticas como el sabor, color, aroma, además de nutrientes, en productos delicados como frutas o snacks funcionales. A diferencia del secado tradicional, que expone a temperaturas dañinas, la liofilización conserva mejor los metabolitos naturales.

En aplicaciones tecnológicas, para el desarrollo químico y en procesos de purificación, la liofilización se emplea para:

- Facilitar la estabilidad y solubilidad de compuestos, haciéndolos más manejables en formulaciones.

- Eliminar eficientemente disolventes al final de procesos extractivos, concentrando sustancias de bajo peso molecular difíciles de retener por filtración

Con relación al ámbito fitoquímico, gana espacio en la conservación y análisis de metabolitos. Dentro de la fitoquímica, el secado por liofilización es el estándar preferido para conservar muestras vegetales, permitiendo la preservación de metabolitos tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo.

La clorofila es un pigmento de interés terapéutico, pero muy inestable, por lo que Ledari et al. (2024), elaboraron microcápsulas mediante el método de liofilización y el de secado por aspersión, utilizando maltodextrina y aislado de proteína de suero como portadores. Las microcápsulas obtenidas mediante el método de liofilización presentaron tamaños de partícula menores y un potencial zeta mayor que las obtenidas mediante el método de secado por aspersión. Los estudios constataron que el secado por liofilización fue más eficaz en la protección de la clorofila frente a la luz y a cambios de pH, concluyéndose que la microencapsulación de dicho pigmento mediante la liofilización, podría ser un método prometedor para su uso como colorante alimentario natural.

Un estudio realizado por Torres-Loja et al. (2024) tuvo como propósito optimizar la obtención de pulpa de maracuyá liofilizada conservando su calidad sensorial y nutracéutica, para lo cual se evaluaron diferentes concentraciones de goma arábiga, almidón de arroz y pectina en un diseño factorial 3×3, analizando su efecto sobre las propiedades físico-

químicas, el color, la solubilidad, el contenido de vitamina C y de fenoles totales. Los resultados evidenciaron que la goma arábiga al 1,5 % y la pectina al 1,0 % fueron las más eficaces para preservar el sabor y el color, mientras que la pectina al 0,75 % favoreció una mayor velocidad de secado. En conjunto, la goma arábiga destacó por mejorar el contenido fenólico, la estabilidad cromática y la solubilidad, en tanto que la pectina resultó más adecuada para mantener la vitamina C.

La investigación realizada por Román Santos et al. (2025), se enfocó en la obtención y caracterización de colorantes a partir del mortiño (*Vaccinium myrtillus* L.). En el estudio se evaluaron tres métodos de secado, que incluían el secado en bandejas, por liofilización y el secado por aspersión. Los resultados indicaron que el secado por liofilización fue el más eficiente con un rendimiento del 19,84%.

Los glucosinolatos son metabolitos especializados azufrados con notables propiedades antimicrobianas y antitumorales. Sin embargo, su estabilidad es crítica: en presencia de humedad y temperaturas moderadas, la enzima mirosinasa los hidroliza rápidamente en isotiocianatos volátiles, reduciendo la calidad del extracto. En este contexto, la liofilización se presenta como la técnica de elección. Al procesar el extracto acuoso de las hojas de *Tropaeolum majus* bajo condiciones de vacío y frío extremo, se logra inactivar cinéticamente la degradación enzimática sin recurrir al calor. El resultado es un polvo liofilizado con una retención de glucotropaeolina superior al 90% en comparación con el secado por aspersión convencional, facilitando su caracterización química y su posterior incorporación en formas farmacéuticas sólidas (González-Gómez et al., 2024).

Si bien la liofilización se asocia comúnmente con extractos polares, su uso en la microencapsulación de aceites esenciales es fundamental para evitar la pérdida de terpenos volátiles como el 1,8-cineol y el alcanfor. El desafío práctico reside en que el calor de otros métodos de secado suele "arrastrar" los componentes volátiles antes de que la matriz protectora se solidifique. Mediante la preparación de una emulsión con biopolímeros (como el alginato de sodio o quitosano) y su posterior liofilización, se crea una estructura porosa que atrapa las gotas de aceite esencial en una matriz vítrea. Este proceso minimiza el estrés térmico y la oxidación lipídica, obteniendo un producto con una morfología de partícula irregular que favorece una liberación controlada. Esta aplicación permite que el extracto de romero conserve su perfil aromático y actividad antioxidante intactos para su uso en la industria fitoterapéutica (Martínez-Vázquez et al., 2025).

6.13 Elementos de cierre del capítulo

1. **Sobre el fundamento físico del secado por aspersión, ¿cómo se explica que sea apto para sustancias termolábiles si utiliza aire a altas temperaturas?**

Debido al fenómeno de enfriamiento evaporativo superficial. La transferencia de calor se utiliza casi en su totalidad para evaporar el solvente, manteniendo la temperatura de la gota por debajo de la del aire. Además, el tiempo de residencia en la cámara es extremadamente corto (milisegundos).

2. **Identifique los cuatro componentes o etapas esenciales en el funcionamiento de un equipo de secado por aspersión (*Spray***

***Dryer*).**

- Sistema de alimentación de la muestra.
- Atomizador (disco rotatorio o boquilla).
- Cámara de secado.
- Ciclón (sistema de separación de partículas).

3. ¿Cuál es la función técnica de la maltodextrina, goma arábiga o inulina al emplearse como excipiente en este proceso?

Actúa como un agente de pared o matriz de encapsulación. Su función es proteger los metabolitos especializados de la oxidación y la luz, reducir la higroscopicidad del polvo final y mejorar la fluidez del producto sólido.

4. La liofilización se basa en el principio de sublimación. Defina este concepto y mencione bajo qué condiciones termodinámicas ocurre.

La sublimación es el paso directo del agua del estado sólido (hielo) al gaseoso (vapor) sin pasar por el estado líquido. Para que ocurra, el proceso debe realizarse a presiones y temperaturas situadas por debajo del punto triple del agua.

5. Describa brevemente las tres fases sucesivas de un ciclo de liofilización.

1. **Congelación:** Solidificación del solvente para crear una estructura rígida.

2. **Secado primario:** Eliminación del hielo por sublimación bajo vacío.

3. **Secado secundario:** Eliminación del agua ligada o adsorbida mediante un ligero aumento de temperatura (desorción).

6. En el contexto de la liofilización, ¿cuál es la diferencia entre el agua eliminada en el secado primario y el secado secundario?

En el secado primario se elimina el agua libre congelada en forma de cristales de hielo. En el secado secundario se elimina el agua no congelada o ligada molecularmente a la matriz del soluto.

7. ¿Por qué es crítico determinar la Temperatura de Transición Vítrea (*Tg*) de un extracto antes de liofilizarlo?

Porque si la temperatura del producto supera la *Tg* durante el secado, la matriz pierde rigidez y ocurre el colapso estructural, lo que resulta en un producto pegajoso, difícil de reconstituir y con mayor humedad residual.

8. Mencione dos excipientes utilizados como crioprotectores y explique su beneficio en la formulación.

La trehalosa y la inulina. Estos compuestos estabilizan la estructura del fitofármaco, elevan la *Tg* de la mezcla y protegen la integridad de las membranas o proteínas si el extracto contiene componentes

biotecnológicos.

9. Comparando ambos métodos, ¿cuál es la principal ventaja de la liofilización para el estudio de aceites esenciales o extractos con compuestos volátiles?

La liofilización opera a temperaturas extremadamente bajas y en vacío, lo que minimiza la pérdida por volatilización y evita la degradación térmica, preservando casi intactas las propiedades organolépticas y la composición química original.

10. ¿Qué ventajas tendrían ambos métodos de secado en el campo de la industria alimentaria o farmacéutica?

Ambas tecnologías son fundamentales para la transformación de materias primas en productos terminados estables, aunque su elección depende del equilibrio entre el costo operativo y la sensibilidad química del producto.

El secado por aspersión es la técnica predilecta para la producción masiva debido a su eficiencia operativa. Sin embargo, la liofilización se considera la mejor opción cuando la prioridad es la máxima calidad y la preservación biológica.

Ventaja clave	Secado por aspersión	Liofilización
Costo de proceso	Moderado / Bajo	Elevado
Velocidad	Muy rápida (segundos)	Lenta (horas/días)

Integridad química	Buena (protección por matriz)	Excelente (mínimo estrés térmico)
Aplicación ideal	Productos de consumo masivo y encapsulados	Activos de alto valor y biotecnológicos

CONCLUSIONES

La botánica tiene una gran importancia en el campo de la farmacognosia, ya que mediante la taxonomía y la sistemática vegetal permite la identificación, clasificación y nomenclatura de forma adecuada de las plantas medicinales. Asimismo, la farmacognosia incluye la identificación, caracterización fisicoquímica, cultivo, recolección, extracción, preparación, control de la calidad y evaluación biológica de las drogas vegetales.

El empleo de técnicas modernas como el código de barras de ADN, bases de datos y software para la identificación de plantas mediante el empleo de diversas fuentes de datos, así como las colecciones de herbarios, permiten profundizar en el conocimiento de especies vegetales, desvelando en varias de ellas su composición genética, sus orígenes, relaciones evolutivas, sus características biológicas y sus adaptaciones ecológicas.

El análisis de características macroscópicas y microscópicas de los diferentes órganos vegetales es un procedimiento esencial en el campo de la investigación botánica e importante para la farmacognosia, desempeñando un papel fundamental para garantizar la identificación precisa de las plantas. Los aspectos macroscópicos se refieren a características observables y brindan indicadores preliminares para la clasificación de una planta. Por otra parte, el análisis microscópico proporciona una exploración visual a mayor escala de las complejidades de cada órgano vegetal. Todo lo anterior permite garantizar la correcta identidad de una planta medicinal.

Para asegurar la calidad de las plantas medicinales es necesario el desarrollo de las buenas prácticas desde el cultivo y recolección hasta el procesamiento final, donde la farmacoergasia juega un papel primordial. En este sentido, se necesitan técnicas analíticas avanzadas que servirán como una herramienta rápida y específica en la investigación de la medicina herbaria, que posibiliten el establecimiento de estándares de calidad y especificaciones para la eficacia terapéutica, la vida útil y la seguridad de los productos herbarios.

El control de la calidad de drogas vegetales contempla una serie de experimentos de laboratorio que revelan y ensamblan un conjunto de parámetros cualitativos y cuantitativos, o características específicas, que se convierten en una medida importante para garantizar la calidad, pureza y autenticidad de dichos productos. En este contexto, los estudios botánicos y farmacognósticos juegan un papel primordial.

El proceso de extracción constituye una etapa esencial dentro del estudio de las drogas vegetales y de la obtención de metabolitos bioactivos con potencial terapéutico. Su comprensión exige integrar principios fisicoquímicos, características particulares de la matriz vegetal y criterios de selectividad del disolvente, elementos que determinan en conjunto la eficacia, reproducibilidad y estabilidad del extracto obtenido. A lo largo del capítulo se evidenció que las técnicas de extracción tradicionales (maceración, digestión, infusión, decocción y percolación) continúan siendo herramientas fundamentales tanto en investigación como en producción, buscando siempre respetar la integridad de compuestos sensibles o cuando la matriz vegetal presenta

estructuras complejas. Por otro lado, métodos como Soxhlet o reflujo ofrecen ventajas en términos de eficiencia, siempre que la naturaleza térmica de los metabolitos no represente una limitante.

Se destacó la relevancia del adecuado manejo de variables críticas del proceso extractivo, como el tamaño de partícula, la temperatura, la viscosidad del medio, el gradiente de concentración y la agitación, factores que inciden directamente en la velocidad y rendimiento de la extracción.

De igual manera, la selección del disolvente requiere una evaluación cuidadosa basada en la polaridad, seguridad química, compatibilidad tecnológica y, en el caso de extractos con destino terapéutico, en consideraciones regulatorias.

La concentración y estabilización de extractos representa otra etapa estratégica. Técnicas como la evaporación al vacío, la liofilización y el secado por aspersión permiten obtener productos estables y adecuados para formulaciones farmacéuticas o alimentarias. Sin embargo, estas operaciones deben ejecutarse bajo condiciones que minimicen la degradación térmica y mantengan la integridad química de los metabolitos especializados.

Finalmente, el control de calidad se establece como un componente imprescindible para validar la identidad, pureza y potencia de los extractos. Los ensayos organolépticos, fisicoquímicos y microbiológicos, junto con el tamizaje fitoquímico y técnicas de bioautografía acopladas a cromatografía en capa delgada, permiten no solo caracterizar de forma preliminar la composición química, sino

también correlacionar la presencia de metabolitos con actividades biológicas concretas. La integración de estos procedimientos garantiza que los extractos cumplan con estándares adecuados para su investigación, desarrollo y eventual aplicación terapéutica.

El análisis de los métodos de extracción no tradicionales permite confirmar que la farmacognosia atraviesa una transformación profunda hacia la eficiencia y la sostenibilidad. La transición desde técnicas convencionales (limitadas por tiempos prolongados y altos consumos de solventes) hacia tecnologías emergentes representa un compromiso real con los principios de la "Química Verde" y la optimización de recursos.

El estudio de la extracción asistida por ultrasonido (EAU), microondas (EAM) y fluidos supercríticos (EFS) pone de manifiesto que el éxito en la recuperación de metabolitos depende de la comprensión de fenómenos físicos como la cavitación, el calentamiento selectivo o la difusión mejorada. Estas herramientas superan la capacidad de los métodos clásicos para disrumpir la matriz celular, preservando la integridad química de compuestos termolábiles y fotosensibles que, de otro modo, se degradarían ante la exposición prolongada al calor.

Sin embargo, la implementación de estas tecnologías enfrenta desafíos significativos. La elevada inversión inicial en equipamiento y la complejidad del escalado industrial limitan, por ahora, su uso a componentes de alto valor comercial. Por ello, el futuro de la investigación fitoquímica debe centrarse en la optimización de parámetros operativos y en la búsqueda de combinaciones sinérgicas

que reduzcan los costos de producción, permitiendo una transición más rápida del laboratorio a la industria.

Dominar la extracción no tradicional se consolida, por tanto, como una competencia crítica para el profesional farmacéutico. Lograr extractos estandarizados, con una menor huella ecológica y mayor pureza, es el puente necesario para transformar el potencial de nuestra flora medicinal en productos terapéuticos de alta calidad, competitivos y seguros para el uso clínico. Para facilitar el análisis y la comparación entre los métodos de extracción más estudiados, se presenta la Tabla 8.

Los DES/NADES se están aplicando cada vez más en varios campos de la Química gracias a sus propiedades únicas y a su potencial para la química verde. Pueden actuar como disolventes, catalizadores e incluso sustratos, lo que permite transformaciones químicas más sostenibles y eficientes. Pueden actuar como disolventes en diversas reacciones, especialmente en las que involucran enzimas. Los DES se destacan en el aumento del rendimiento y especificidad en varios procesos de extracción de productos bioactivos. Además, pueden mejorar la solubilidad de reactivos hidrofóbicos y mejorar la estabilidad y actividad enzimática, lo que resulta en mayores rendimientos y permite el uso de enzimas en condiciones no acuosas.

A modo de conclusión, es fundamental comprender que la garantía de la estabilidad fitoquímica en los extractos naturales constituye una piedra angular en el desarrollo de la farmacognosia moderna. La transición de matrices líquidas complejas a formas sólidas particuladas no es simplemente un cambio físico de estado, sino una estrategia

tecnológica para preservar la bioactividad frente a la degradación.

Las tecnologías abordadas en este capítulo, el secado por aspersión o atomización y la liofilización, ofrecen rutas distintas pero complementarias para alcanzar este objetivo. Mientras que la aspersión destaca por su eficiencia industrial y velocidad en el procesamiento de extractos, la liofilización se erige como el estándar de referencia ineludible para la preservación de metabolitos altamente termolábiles, priorizando la integridad molecular sobre la velocidad.

Es imperativo subrayar que el éxito de ambas técnicas no depende solo del equipamiento, sino que está intrínsecamente ligado a la formulación y la correcta selección de excipientes protectores. El dominio de estos procesos de ingeniería alimentaria o farmacéutica es lo que permite a los investigadores y desarrolladores transformar el potencial terapéutico bruto de la naturaleza en fitomedicamentos estables, estandarizados y eficaces para su uso clínico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anconatani, L. M. (2023). De materia médica a farmacognosia: El camino hacia la farmacobotánica en la Universidad de Buenos Aires. Rev. Farm., 165(2), 19–51.

Astrada, I. (1924). Apuntes de farmacognosia (Tomos I y II). Etchegoyen & Monti.

Basker, K., & Narsimha, R. (2019). Pharmacognosy and phytochemistry of medicinal plants. CRC Press.

Bergner, P. (1997). The healing power of herbs: The ultimate guide to natural remedies. Avery Publishing Group.

Bruneton, J. (2008). Pharmacognosy: Phytochemistry, medicinal plants. Editions Médicales.

Buchbauer, G., & Jirovetz, L. (2010). Essential oils and their constituents as medicines. The American Journal of Chinese Medicine, 38(4), 687–696.

Cockitt, J., & David, R. (2010). Pharmacy and medicine in ancient Egypt. En Proceedings of the conferences held in Cairo (2007) and Manchester (2008) (pp. 69–84).

Cortez-Gallardo, V., Macedo-Ceja, J. P., Hernández-Arroyo, M., Arteaga-Aureoles, G., Espinosa-Galván, D., & Rodríguez-Landa, J. F. (2004). Farmacognosia: breve historia de sus orígenes y su relación con las ciencias médicas. Revista Biomédica, 15(2),

123–136.

Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. Clinical Microbiology Reviews, 12(4), 564–582.

Dahanukar, S. A., Kulkarni, R. A., & Rege, N. N. (2000). Pharmacology of medicinal plants and natural products. Indian Journal of Pharmacology, 32(2), 81–118.

Dezani, S. (1920). Trattato di farmacognosia ad uso degli studenti di farmacia e dei farmacisti. Unione tipografico.

Dharmananda, S. (2002). The origins of Chinese herbal medicine. Instituto de Medicina Tradicional de Oriente.

Duke, J. A. (2002). Handbook of medicinal herbs. CRC Press.

Evans, W. C. (2009). Trease and Evans' pharmacognosy (16.ª ed.). Saunders Elsevier.

Farnsworth, N. R., & Bingel, A. S. (1972). Pharmacognosy and medicinal plants. The Journal of Clinical Pharmacology, 12(1), 10–18.

Ganzinger, K. (1979). Über die Termini „Pharmacognosis" und Pharmacographia", ein Beitrag zur Geschichte der pharmazeutischen Wissenschaften. Medizinhistorisches Journal, 14(3), 186–195.

Harborne, J. B. (1998). Phytochemical methods: A guide to modern techniques of plant analysis (3.ª ed.). Springer.

Heinrich, M., Barnes, J., Gibbons, S., & Williamson, E. M. (2012). Fundamentals of pharmacognosy and phytotherapy (2.ª ed.). Churchill Livingstone Elsevier.

Hernández, A. (1997). Plantas medicinales de Mesoamérica. Ediciones Instituto de Biología, UNAM.

Kumar, S., & Singh, A. (2010). Herbal medicine: A key to the future of traditional medicine. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 1(3), 194–197.

Leick, G. (2003). The Babylonians: An introduction. Routledge.

Mann, J. (2002). Natural products: The secondary metabolites. Wiley.

McClure, R. C. (2008). Traditional healing in the Americas: Cultural and scientific perspectives. University of Florida Press.

McLeod, F. L. (2011). Medicinal plants of North America: A herbal history. Medicinal Plant Press.

Mishra, L. C., Singh, B. B., & Dagenais, S. (2001). Ayurveda: A historical perspective and principles of Ayurvedic medicine. Alternative Therapies in Health and Medicine, 7(2), 36–42.

Nabavi, S. F., & Habtemariam, S. (2013). The role of herbal medicine in health care. Iranian Journal of Public Health, 42(1), 1–8.

Nunn, J. F. (2002). Ancient Egyptian medicine. University of Oklahoma Press.

Potter, P. (2000). Hippocrates Vol. VI: Diseases of women. Loeb Classical Library.

Rao, V. S., & Radhakrishnan, N. (2017). Botany for pharmacy students. Pharmamed Press.

Riddle, J. M. (1985). Dioscorides on pharmacy and medicine. University of Texas Press.

Sarker, S. D., & Nahar, L. (2018). Phytochemical diversity and its role in the pharmacological activities of medicinal plants. Elsevier.

Scarborough, J. (2018). Pharmacology in Greco-Roman antiquity. Cambridge University Press.

Smith, E. W. (1990). The healing power of herbs: The ultimate guide to natural remedies. Avalon Publishing.

Touwaide, A. (2013). Greek medicine from Hippocrates to Galen: Selected papers. BRILL.

Trease, G. E., & Evans, W. C. (2009). Pharmacognosy (16.ª ed.). Saunders.

Tyler, V. E., Brady, L. R., & Robbers, J. E. (1988). Pharmacognosy (9.ª ed.). Lea & Febiger.

World Health Organization. (2003). WHO guidelines on good agricultural and collection practices (GACP) for medicinal plants. Organización Mundial de la Salud.

World Health Organization. (2013). Traditional medicine strategy: 2014-2023. World Health Organization.

Zhao, Z., Liang, Z., Chan, K., Lu, G., Lee, E., & Chen, H. (2010). A unique issue in the standardization of Chinese materia medica: Processing. Planta Medica, 76(17), 1975–1986.

Zolla, C. (1980). Traditional medicine in Latin America, with particular reference to Mexico. Journal of Ethnopharmacology, 2(1), 37–41.

Abdelghany, S. (2019). An introduction to botany (pp. 1–10). ResearchGate. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4880.8081

Acosta, L. L. (2005). Cultivo de plantas medicinales, su producción agroecológica. Revista Cubana de Plantas Medicinales, 10(3–4), 1–10.

Ahmed, S. S. (2022). DNA barcoding in plants and animals: A critical review. Academia Press.

American Herbal Products Association. (2021). Agricultural and collection practices and good manufacturing practices for botanical materials. AHPA.

Amin, A., & Park, S. (2025). Chemotaxonomy, an efficient tool for medicinal plant identification: Current trends and limitations. Plants, 14(14), Artículo 2234. https://doi.org/10.3390/plants14142234

Bhagya, J., Reshmi, S. K., Waghmare, R., Moses, J. A., &

Anandharamakrishnan, C. (2024). Electromagnetics and its allied applications in food processing. En Emerging technologies for the food industry (pp. 185–234). Apple Academic Press.

Bhusnure, O. G., Suryawanshi, S., Vijayendra, S. S. M., Gholve, S. B., Girm, P. S., & Birajdar, M. J. (2019). Standardization and quality evaluation of herbal drugs. Journal of Drug Delivery and Therapeutics, 9(3-s), 1058–1063. https://doi.org/10.22270/jddt.v9i3-s.2941

Bilyk, Z. I., Shapovalov, Y. B., Shapovalov, V. B., Megalinska, A. P., & Andruszkiewicz, F. (2020). Assessment of mobile phone applications feasibility on plant recognition: Comparison with Google Lens AR-app. Proceedings of the 3rd International Workshop on Augmented Reality in Education (AREdu 2020), 61–77. https://doi.org/10.31174/SEND-HS2020-225VI61-07

Boho, D., Rzanny, M., Wäldchen, J., Nitsche, F., Deggelmann, A., Wittich, H. C., ... & Mäder, P. (2020). Flora Capture: A citizen science application for collecting structured plant observations. BMC Bioinformatics, 21, Artículo 576. https://doi.org/10.1186/s12859-020-03920-9

Bonilla, M. M. M., Aguirre, M. A. C., & Agudelo, V. O. (2019). Histología vegetal. Editorial Unillanos.

Brickell, C. D., Alexander, C., Cubey, J. J., David, J. C., Hoffman, M. H. A., Leslie, A. C., ... & Xiaobai, J. (2016). International code of nomenclature for cultivated plants (9th ed., Scripta

Horticulturae No. 18). International Society for Horticultural Science.

Bustamante, K., Santos, O. E., Miranda, M., Pacheco, R., Gutiérrez, Y., & Scull, R. (2019). Morphological and molecular barcode analysis of the medicinal tree Mimusops coriacea (A.DC.) Miq. collected in Ecuador. PeerJ, 7, e7789. https://doi.org/10.7717/peerj.7789

Campbell, S. W. (2025). Botany. En Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/science/botany

Cardona, K. M., Rugeles, S. P. A., Tarazona, P. L., Díaz, A. L. A., Muñoz, F. J. E., & López, A. D. (2024). Exploring the potential of omics technologies in medicinal plant research: A review in Colombia. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 23(4), 460–486. https://doi.org/10.37360/blacpma.24.23.4.32

Catán, A., Targa, G., Fraño, A., & Degano, C. (2023). Botánica morfológica. UDUNSE, Editorial Universitaria.

Chac, L. D., & Thinh, B. B. (2023). Species identification through DNA barcoding and its applications: A review. Biological Bulletin, 50, 1143–1156. https://doi.org/10.1134/S106235902360229x

Chen, Q., Wu, X., & Zhang, D. (2020). Comparison of the abilities of universal, super, and specific DNA barcodes to discriminate among the original species of Fritillariae cirrhosae bulbus and its

adulterants. PLoS ONE, 15(2), e0229181. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229181

Falya, Y., Adi, S. S., & Levita, J. (2020). Mini review: Toxicity study of plant extracts. IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences, 15(2), 25–32. https://doi.org/10.9790/3008-1502012532

Fernandes, L. C., de Castro, M. E., Zotti, S. N. C., Rodrigues, A. M. B., da Silva, L. C., Cabral, C., ... & Pinto, E. (2022). Packaging and storage of medicinal plants. Research, Society and Development, 11(7), e9211729481. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.24813

Finger, A., Groß, J., & Zabel, J. (2022). Plant identification in the 21st century—What possibilities do modern identification keys offer for biology lessons? Education Sciences, 12(12), Artículo 849. https://doi.org/10.3390/educsci12120849

Gandhi, A. (2022). Ayurveda pharmacopoeia of India (A.P.I.) - A key to quality control and standardization of ayurveda drugs. Sri Dharmasthala Manjunatheshwara College of Ayurveda and Hospital.

Gao, Z., Liu, Y., Wang, X., Wei, X., & Han, J. (2019). DNA mini barcoding: A derived barcoding method for herbal molecular identification. Frontiers in Plant Science, 10, Artículo 987. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00987

Gostel, M. R., & Kress, W. J. (2022). The expanding role of DNA

barcodes: Indispensable tools for ecology, evolution, and conservation. Diversity, 14(3), Artículo 213. https://doi.org/10.3390/d14030213

Gras, A., Hidalgo, O., D'Ambrosio, U., Parada, M., Garnatje, T., & Vallès, J. (2021). The role of botanical families in medicinal ethnobotany: A phylogenetic perspective. Plants, 10(1), Artículo 163. https://doi.org/10.3390/plants10010163

Gutiérrez, G. Y. I., Scull, L. R., & Abreu, P. J. (2023). Importance of pharmacognosy studies in the quality control of herbal drugs. En Medicinal plants of Ecuador. Part I: Quality control considerations for South American plants and products (pp. 3–17). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003173991-2

Harmouzi, A., & El Ammari, Y. (2025). Quality control in the primary processing of aromatic and medicinal plants. Scientific African, 27, e02519. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02519

Hart, A. G., Bosley, H., Hooper, C., Perry, J., Moore, J. S., & Moore, O. (2023). Assessing the accuracy of free automated plant identification applications. People and Nature, 5(3), 929–937. https://doi.org/10.1002/pan3.10460

He, S., Yang, L., Ye, S., Lin, Y., Li, X., Wang, Y., ... & Chen, X. (2022). MPOD: Applications of integrated multi-omics database for medicinal plants. Plant Biotechnology Journal, 20(5), 797–799. https://doi.org/10.1111/pbi.13769

Iruoghene, E. G., Obasohan, P., Makia, R. S., Abiola, O. T.,

Chukwuma, U. E., & Ngukuran, J. A. (2024). The use of quality control parameters in the evaluation of herbal drugs: A review. Discover Medicine, 1, Artículo 168. https://doi.org/10.1007/s44337-024-00177-6

Izco, J. (2023). Los nombres de las plantas. PrintLab, Universidad del Azuay.

Janiarli, M. D. (2021). The effectiveness of herbarium as a learning medium on compound leaf material for students' achievement in biology. Advances in Social Science, Education and Humanities Research, 532, 114–118. https://doi.org/10.2991/assehr.k.210227.019

Jones, H. G. (2020). What plant is that? Tests of automated image recognition apps for plant identification on plants from the British flora. AoB Plants, 12(6), plaa052. https://doi.org/10.1093/aobpla/plaa052

Kavitha, S., Satish, K. T., Naresh, E., Kalmani, V. H., Devappa, B. K., & Kumar, P. P. (2024). Medicinal plant identification in real time using deep learning model. SN Computer Science, 5, Artículo 73. https://doi.org/10.1007/s42979-023-02398-5

Khan, S. (2023). Genome-based barcoding for the authentication of medicinal plants and their products. En Omics studies of medicinal plants (pp. 123–136). CRC Press.

Kshirsagar, D. P., Gaikwad, S. S., Karale, P. R., Vipul, P., & Rasika, B. (2017). Current quality control methods for standardization of

herbal drugs. International Journal of Pharmaceutical Drug Analysis, 5(3), 82–95.

Lal, S. M., & Khondker, M. (2022). Chapter 10: Prospects of botany. En Plant sciences: Evolution and applications (pp. 377–390). ResearchGate.

Lee, Y. (2025). The role of botanical gardens in the conservation of medicinal plant diversity. Journal of Pharmacognosy and Natural Products, 11(1), Artículo 346. https://doi.org/10.37421/2472-0992.2025.11.346

Letsiou, S., Madesis, P., Vasdekis, E., Montemurro, C., Grigoriou, M. E., & Skavdis, G. (2024). DNA barcoding as a plant identification method. Applied Sciences, 14(4), Artículo 1415. https://doi.org/10.3390/app14041415

Mahmud, S., Paul, G. K., Biswas, S., Kazi, T., Mahbub, S., Mita, M. A., ... & Uddin, M. A. (2022). Phytochemdb: A platform for virtual screening and computer-aided drug designing. Database, 2022, baac002. https://doi.org/10.1093/database/baac002

Majid, N., Nissar, S., Younus, R. W., Nawchoo, I. A., & Ali, B. Z. (2021). Pharmacognostic standardization of Aralia cachemirica: A comparative study. Journal of Pharmaceutical Sciences, 7, Artículo 33. https://doi.org/10.1186/s43094-21-00181-y

Mali, S., Yadav, R., Gauttam, V., & Sawale, J. (2023). An updated review on taxonomy and chemotaxonomy. Toxicology International, 30(1), 121–129.

https://doi.org/10.18311/ti/2023/v30i1/32123

Malik, S., Sharma, K., & Kanaujia, A. (2021). Harvest and post-harvest management for ensuring quality of medicinal plants. International Journal of Advanced Research, 9(5), 602–606. https://doi.org/10.21474/IJAR01/12882

Martínez, G. M. R., & Argüelles, E. D. L. R. (2021). Classical taxonomy. En Plant sciences: Evolution and applications (Capítulo 15). ResearchGate.

Miranda, M. M., & Cuellar, A. C. (2012). Farmacognosia y química de los productos naturales (2.ª ed., pp. 135–145). Editorial Félix Varela.

Naaz, S., Balramnavar, V. M., & Kaur, A. (2024). Medicinal plant databases: Analyzing strengths, weaknesses and innovations for future improvements. Life Science Research Communication, 1(1), 31–41. https://doi.org/10.5530/lsrc.1.1.8

Nakra, S., Tripathy, S., & Prakash, S. P. (2025). Drying as a preservation strategy for medicinal plants: Phytochemical and functional outcomes for food and human health. Phytomedicine Plus, 5(2), Artículo 100762. https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2025.100762

Odoh, U. E., Gurav, S. S., & Chukwuma, M. O. (2025). Pharmacognosy and phytochemistry: Principles, techniques, and clinical applications. John Wiley & Sons.

Parnika, C. N., & Rakesh, K. S. (2020). Review article: Standardization and evaluation of herbal drugs is need of the hour in present era. Plant Archives, 20(2), 7883–7889.

Pérez, A. Y., Reyes, S. J. A., López, S. D., Huerta, P. A., & Hernández, A. A. (2023). Reino Plantae: Características y clasificación. UNO Sapiens Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 1, 5(10), 8–10. https://doi.org/10.29057/prepa1.v5i10.10421

Porwal, O., Kumar, S. S., Kumar, P. D., Gupta, S., Tripathi, R., & Katekhaye, S. (2020). Cultivation, collection and processing of medicinal plants. En Bioactive phytochemicals: Drug discovery to product development (pp. 1–16). Bentham Science. https://doi.org/10.2174/9789811464485120010005

Pushpa, B. R., Jyothsna, S., & Lasya, S. (2025). HybNet: A hybrid deep model for medicinal plant species identification. MethodsX, 14, Artículo 103126. https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.103126

Raguraman, P. J., Harini, B., Reshmaa, M. P., & Nivetha, M. (2025). An automated system for medicinal plant identification and usage recommendation. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, 11(3), 641–651. https://doi.org/10.32628/CSEIT25113314

Redonda, M. R., & Fragoso, M. I. (2023). ¿Cómo y para qué se nombran las plantas? (pp. 21–24). ResearchGate.

Rico, A. L., & Magaña, R. P. (2007). La nomenclatura botánica en la sistemática del siglo XXI. Ciencias, 87, 70–76.

Robinson, C. V., & Robinson, J. M. (2021). Listen but do not touch: Using a smartphone acoustic device to investigate bat activity, with implications for community-based monitoring. Acta Chiropterologica, 23(1), 247–258. https://doi.org/10.3161/15081109ACC2021.23.1.021

Rønsted, N., Grace, O. M., & Carine, M. A. (2020). Integrative and translational uses of herbarium collections across time, space, and species. Frontiers in Plant Science, 11, Artículo 1319. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01319

Sarmiento, T. G., Santos, O. E., Miranda, M. M., Pacheco, C. R., Scull, L. R., Gutiérrez, G. Y., & Delgado, H. R. (2020). Short communication: Molecular barcode and morphology analysis of Malva pseudolavatera Webb & Berthel and Malva sylvestris L. from Ecuador. Biodiversitas, 21(8), 3554–3561. https://doi.org/10.13057/biodiv/d210818

Simpson, M. G. (2019). Plant morphology. En Plant Systematics (3rd ed., pp. 469–535). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812628-8.50009-2

Singh, P., Laxmi, N. S., Sharkar, R., Sarkar, A., Dutta, S., & Paul, D. (2025). Application of modern techniques in cultivation of medicinal plants: A review. Plant Archives, 25(1), 1947–1962. https://doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2025.v25.supplem

ent-1.267

Soledispa, P., Santos, O. E., Miranda, M., Pacheco, R., Gutiérrez, G. Y. I., & Scull, R. (2021). Molecular barcode and morphological analysis of Smilax purhampuy Ruiz, Ecuador. PeerJ, 9, e11028. https://doi.org/10.7717/peerj.11028

Sorokina, M., & Steinbeck, C. (2020). Review on natural products databases: Where to find data in 2020. Journal of Cheminformatics, 12(1), 1–51. https://doi.org/10.1186/s13321-020-00424-9

Sosef, M. S. M., Degreef, J., Engledow, H., & Meerts, P. (2020). Botanical classification and nomenclature: An introduction. Meise Botanic Garden. https://doi.org/10.5281/zenodo.3706707

Turland, N. J. (2025). From the Shenzhen Code to the Madrid Code: New rules and recommendations for naming algae, fungi, and plants. American Journal of Botany, 112(4), e70026. https://doi.org/10.1002/ajb2.70026

Ubale, K. P., Pundkar, A. S., Murkute, P. M., & Sayyad, S. M. (2022). A review: Quality control and standardization of herbal drug. International Journal of Creative Research Thoughts, 10(11), e157–e168.

Vargas, P., & Zardoya, R. (Eds.). (2012). El árbol de la vida: Sistemática y evolución de los seres vivos. Editorial Académica Española.

Victor, J. E., Koekemoer, M., Fish, L., Smithies, S. J., & Mössmer, M. (2004). Herbarium essentials: The Southern African herbarium user manual (Southern African Botanical Diversity Network Report No. 25). SABONET.

Wang, H., Chen, Y., Wang, L., Liu, Q., Yang, S., & Wang, C. (2023). Advancing herbal medicine: Enhancing product quality and safety through robust quality control practices. Frontiers in Pharmacology, 14, Artículo 1265178. https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1265178

Wang, T., Rangji, C., Liu, W., Ma, J., Zhou, R., Leng, L., ... & Huang, L. (2025). Multi-omics on traditional medicinal plant of the genus Aconitum: Current progress and prospect. Molecules, 30(1), Artículo 118. https://doi.org/10.3390/molecules30010118

World Health Organization. (2011). Quality control methods for herbal materials. WHO Press.

Wu, L., Wu, M., Cui, N., Xiang, L., Li, Y., Li, X., ... & Chen, S. (2021). Plant super-barcode: A case study on genome-based identification for closely related species of Fritillaria. Chinese Medicine, 16, Artículo 52. https://doi.org/10.1186/s13020-021-00460-z

Wu, Y., Zhang, F., Yang, K., Fang, S., Bu, D., Li, H., ... & Zhao, Y. (2019). SymMap: An integrative database of traditional Chinese medicine enhanced by symptom mapping. Nucleic Acids Research, 47(D1), D1110–D1117.

https://doi.org/10.1093/nar/gky1021

Xuehao, F., Hongyan, S., Xu, Y., Jie, C., Yongchao, J., Xiaofeng, Y., ... & Zhong, J. (2022). Petal development and elaboration. Journal of Experimental Botany, 73(11), 3308–3318. https://doi.org/10.1093/jxb/erac092

Yang, G., Zhang, L., Meng, C., & Su, Y. (2024). Application of molecular biology techniques in plant identification. Journal of Life Sciences and Agriculture, 1(3), 86–90. https://doi.org/10.62517/jlsa.202407313

Yu, J., Wu, X., Liu, C., Newmaster, S., Ragupathy, S., & Kress, W. J. (2021). Progress in the use of DNA barcodes in the identification and classification of medicinal plants. Ecotoxicology and Environmental Safety, 208, Artículo 111691. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111691

Zhai, W., Duan, X., Zhang, R., Guo, C., Li, L., Xu, G., ... & Li, D. (2019). Chloroplast genomic data provide new and robust insights into the phylogeny and evolution of the Ranunculaceae. Molecular Phylogenetics and Evolution, 135, 12–21. https://doi.org/10.1016/j.ympev.2019.02.024

Zhan, C., Shen, S., Yang, C., Liu, Z., Fernie, A. R., Graham, I. A., & Luo, J. (2022). Plant metabolic gene clusters in the multi-omics era. Trends in Plant Science, 27(10), 981–1001. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.03.001

Adams, R. P. (2007). Identification of essential oil components by gas

chromatography/mass spectrometry (4th ed.). Allured Publishing Corporation.

Agarwal, S. P., & Paridhavi, M. (2007). Herbal drug technology. Universities Press (India).

Anwar, F., Latif, S., Ashraf, M., & Gilani, A. H. (2007). Moringa oleifera: A food plant with multiple medicinal uses. Phytotherapy Research, 21(1), 17–25. https://doi.org/10.1002/ptr.2023

Azwanida, N. N. (2015). A review on the extraction methods used in medicinal plants: Principle, strength, and limitation. Medicinal & Aromatic Plants, 4(3), Artículo 196. https://doi.org/10.4172/2167-0412.1000196

Baumann, J. (2019). The evolution of Galenic pharmacy and its influence on modern phytotherapy. Journal of Medical History, 45(3), 221–238.

Bruneton, J. (1999). Pharmacognosy, phytochemistry, medicinal plants (2nd ed.). Lavoisier.

Burt, S. (2004). Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—a review. International Journal of Food Microbiology, 94(3), 223–253. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022

Bynum, W. (2013). A little history of science. Yale University Press.

Chemat, F., & Vian, M. A. (2014). Alternative solvents for natural

products extraction. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06029-8

Chemat, F., Vian, M. A., & Cravotto, G. (2012). Green extraction of natural products: Concept and principles. International Journal of Molecular Sciences, 13(7), 8615–8627. https://doi.org/10.3390/ijms13078615

Cos, P., Vlietinck, A. J., Berghe, D. V., & Maes, L. (2006). Anti-infective potential of natural products: How to develop a stronger in vitro 'proof-of-concept'. Journal of Ethnopharmacology, 106(3), 290–302. https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.04.003

Cowan, M. M. (1999). Plant products as antimicrobial agents. Clinical Microbiology Reviews, 12(4), 564–582. https://doi.org/10.1128/CMR.12.4.564

Dean, J. A. (1999). Lange's handbook of chemistry (15th ed.). McGraw-Hill.

European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. (2020). European pharmacopoeia (10th ed.). Council of Europe.

European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. (2023). European pharmacopoeia (11th ed.). Council of Europe.

Evans, W. C. (2009). Trease and Evans pharmacognosy (16th ed.). Saunders Elsevier.

Fabricant, D. S., & Farnsworth, N. R. (2001). The value of plants used in traditional medicine for drug discovery. Environmental Health

Perspectives, 109(Suppl. 1), 69–75. https://doi.org/10.1289/ehp.01109s169

Farnsworth, N. R. (1984). Biological and phytochemical screening of plants. Journal of Pharmaceutical Sciences, 55(3), 225–276. https://doi.org/10.1002/jps.2600550302

García Sarrió, M. J. (2019). Estrategias analíticas avanzadas de obtención y análisis de compuestos bioactivos en muestras de origen vegetal [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid]. Repositorio Institucional E-Prints Complutense.

Guenther, E. (1972). The essential oils: History–origin in plants–production–analysis (Vol. 1). Krieger Publishing Company.

Handa, S. S., Khanuja, S. P. S., Longo, G., & Rakesh, D. D. (2008). Extraction technologies for medicinal and aromatic plants. United Nations Industrial Development Organization & International Centre for Science and High Technology.

Harborne, J. B. (1998). Phytochemical methods: A guide to modern techniques of plant analysis (3rd ed.). Springer.

Heinrich, M., Barnes, J., Gibbons, S., & Williamson, E. M. (2018). Fundamentals of pharmacognosy and phytotherapy (3rd ed.). Elsevier.

Heinrich, M., Barnes, J., Prieto, J., & Gibbons, S. (2020). Fundamentals of pharmacognosy and phytotherapy (4th ed.). Elsevier.

Herrero, M., Mendiola, J. A., Cifuentes, A., & Ibáñez, E. (2010). Supercritical fluid extraction: Recent advances and applications. Journal of Chromatography A, 1217(16), 2495–2511. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.019

Hostettmann, K., Marston, A., Ndjoko, K., & Wolfender, J. L. (2000). The potential of African plants as a source of drugs. Journal of Ethnopharmacology, 71(1–2), 1–19. https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00160-3

Houghton, P. J., & Raman, A. (1998). Laboratory handbook for the fractionation of natural extracts. Springer.

Kagan, I. A., & Flythe, M. D. (2014). Thin-layer chromatographic (TLC) separations and bioassays of plant extracts to identify antimicrobial compounds. Journal of Visualized Experiments, (85), e51411. https://doi.org/10.3791/51411

Kumar, S., Kumari, R., & Sharma, A. (2021). Phytochemical screening and pharmacological evaluation of medicinal plants. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 10(2), 299–308.

Li, S., Chen, S., Chan, S. W., Li, P., Lin, G., Huo, J. R., & Gu, S. W. (2004). Quality control of herbal medicines. Journal of Chromatography B, 812(1–2), 53–70. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2004.07.003

Lide, D. R. (Ed.). (2004). CRC handbook of chemistry and physics (85th ed.). CRC Press.

LSU Macromolecular Studies Group. (2023). Common organic solvents – Physical properties. https://macro.lsu.edu/HowTo/solvents/

Luque de Castro, M. D., & García-Ayuso, L. E. (1998). Soxhlet extraction of solid materials: An outdated technique with a promising innovative future. Analytica Chimica Acta, 369(1–2), 1–10. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00233-5

Marston, A. (2011). Thin-layer chromatography with biological detection in phytochemistry. Journal of Chromatography A, 1218(19), 2676–2683. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.12.012

Minello, L., Sartori, V. C., Touguinha, L. B. A., Agostini, F., Silva, S. M. E., & Salvador, M. (2021). Estudio comparativo de diferentes métodos de extracción de compuestos bioactivos de plantas alimentarias no convencionales (PANC). Research, Society and Development, 10(17), e190101724210. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i17.24210

Miranda, M., & Cuéllar, A. (2000). Farmacognosia y productos naturales. Editorial Félix Varela.

Miranda, M., & Cuellar, A. (2000). Manual de prácticas de laboratorio. En Farmacognosia y productos naturales (pp. 41–49). Editorial Félix Varela.

National Institute of Standards and Technology. (s.f.). Chemistry WebBook. https://webbook.nist.gov/chemistry/

Pulluquitin, G. I. T., Guambo, I. V. C., Jácome, M. C. T., & Sumbana, A. V. L. (2018). Estudio del proceso de obtención de extractos de plantas medicinales. Revista Caribeña de Ciencias Sociales, (5), Artículo 77.

Putnik, P., Bursać Kovačević, D., Režek Jambrak, A., Barba, F. J., Cravotto, G., Binello, A., ... & Lorenzo, J. M. (2017). Innovative "green" and novel strategies for the extraction of bioactive added-value compounds from citrus wastes – A review. Molecules, 22(5), Artículo 680. https://doi.org/10.3390/molecules22050680

Remington, J. P. (2000). Remington: The science and practice of pharmacy (20th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

Riddick, J. A., Bunger, W. B., & Sakano, T. K. (1986). Organic solvents: Physical properties and methods of purification (4th ed.). Wiley-Interscience.

Rostagno, M. A., & Prado, J. M. (2013). Natural product extraction: Principles and applications. Journal of Supercritical Fluids, 86, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2013.11.015

Salgueiro, L. R., & Pinto, E. (2017). Essential oils in fungal and bacterial infections: Properties, mechanisms of action, and applications. En G. M. Cragg et al. (Eds.), Medicinal plants: Biodiversity and drugs. CRC Press.

Sarker, S. D., Latif, Z., & Gray, A. I. (2006). Natural products isolation. Humana Press.

Sarker, S. D., & Nahar, L. (2007). Chemistry for pharmacy students: General, organic and natural product chemistry. Wiley.

Sasidharan, S., Chen, Y., Saravanan, D., Sundram, K. M., & Yoga Latha, L. (2011). Extraction, isolation and characterization of bioactive compounds from plants' extracts. African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines, 8(1), 1–10. https://doi.org/10.4314/ajtcam.v8i1.60424

Šegan, S., Živković-Radovanović, V., Tosti, T., Ristivojević, P., & Milojković-Opsenica, D. (2021). Thin-layer chromatography in bioassays of antimicrobial compounds from plants. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies, 44(9-10), 507–518. https://doi.org/10.1080/10826076.2021.1965514

Selvamuthukumaran, M., & Shi, J. (2017). Recent advances in extraction of antioxidants from plant by-products processing industries. Food Quality and Safety, 1(1), 61–81. https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyx004

Soquetta, M. B., Terra, L. M., & Bastos, C. P. (2018). Green technologies for the extraction of bioactive compounds in food. Food Engineering Reviews, 10(1), 1–16. https://doi.org/10.1007/s12393-017-9166-2

Stahl-Biskup, E., & Sáez, F. (2002). Essential oils in aromatherapy and phytotherapy: From chemistry to clinics. Harwood Academic Publishers.

The Japanese Pharmacopoeia. (2021). The Japanese pharmacopoeia

(18th ed.). Ministry of Health, Labour and Welfare.

Tituaña Pulluquitin, G. I., Córdova Guambo, I. V., Tobar Jácome, M. C., & Lascano Sumbana, A. V. (2018). Estudio del proceso de obtención de extractos de plantas medicinales. Revista Caribeña de Ciencias Sociales. https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/05/extractos-plantas-medicinales.html

United States Pharmacopeial Convention. (2020). United States pharmacopeia and national formulary (USP–NF). USP.

United States Pharmacopeial Convention. (2020). USP herbal medicines compendium (HMC). USP.

United States Pharmacopeial Convention. (2024). United States pharmacopeia and national formulary (USP 47–NF 42). USP.

Urbain, A., & Simões-Pires, C. A. (2020). Thin-layer chromatography for the detection and analysis of bioactive natural products. Encyclopedia of Analytical Chemistry, 1–29. https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9730

Vinatoru, M. (2001). An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. Ultrasonics Sonochemistry, 8(3), 303–313. https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00071-2

Wang, L., & Weller, C. L. (2006). Recent advances in extraction of nutraceuticals from plants. Trends in Food Science &

Technology, 17(6), 300–312. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.12.004

Yalkowsky, S. H., & He, Y. (2003). Handbook of aqueous solubility data. CRC Press.

Abbaspour, L., Ghareaghajlou, N., Afshar Mogaddam, M. R., & Ghasempour, Z. (2024). An innovative technique for the extraction and stability of polyphenols using high voltage electrical discharge: HVED-assisted extraction of polyphenols. Current Research in Food Science, 9, Artículo 100928. https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100928

Azmir, J., Hamid, Z. A., Jāman, S., Jahurul, M. H. A., Bhunia, A. K., Ali, M. E., ... & Awang, I. G. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. Journal of Food Engineering, 117(4), 426–436. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014

Bai, X., Xu, Y., Zhang, W., & Liu, Y. (2021). Pressurized liquid extraction of bioactive compounds from medicinal plants: Recent advances and applications. Journal of Chromatography A, 1638, Artículo 461870. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461870

Boussetta, N., & Vorobiev, E. (2014). Extraction of valuable biocompounds assisted by high voltage electrical discharges: A review. Comptes Rendus Chimie, 17(3), 197–203. https://doi.org/10.1016/j.crci.2013.11.011

Boussetta, N., Vorobiev, E., Reess, T., De Ferron, A., Pecastaing, L.,

Ruscassié, R., & Lanoisellé, J. L. (2012). Scale-up of high voltage electrical discharges for polyphenols extraction from grape pomace: Effect of the dynamic shock waves. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 16, 129–136. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.05.004

Brachet, A., Christen, P., & Veuthey, J. L. (2002). Focused microwave-assisted extraction of cocaine and benzoylecgonine from coca leaves. Phytochemical Analysis, 13(3), 162–169. https://doi.org/10.1002/pca.638

Cao, S., Liang, J., Chen, M., Xu, C., Wang, X., Qiu, L., Zhao, X., & Hu, W. (2025). Comparative analysis of extraction technologies for plant extracts and absolutes. Frontiers in Chemistry, 13, Artículo 1536590. https://doi.org/10.3389/fchem.2025.1536590

Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound-assisted extraction of food and natural products: Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. Ultrasonics Sonochemistry, 34, 540–560. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

Correa Cuevas, L. P., & Hernández Baltazar, E. (2011). El uso de las microondas en la industria farmacéutica. Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas, 42(4), 6–25.

Custodio, L., Soares, F., Pereira, H., Rodrigues, M. J., Barreira, L., & Varela, J. (2019). Fatty acid composition and biological activities

of the brown alga Laminaria ochroleuca obtained by pressurized liquid extraction. Journal of Applied Phycology, 31, 1181–1193. https://doi.org/10.1007/s10811-018-1647-7

Domínguez-Rodríguez, G., Marina, M. L., & Plaza, M. (2021). Enzyme-assisted extraction of bioactive non-extractable polyphenols from sweet cherry (Prunus avium L.) pomace. Food Chemistry, 339, Artículo 128086. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128086

Gao, M., & Liu, C. Z. (2005). Comparison of techniques for extraction of flavonoids from cultured cells of Saussurea medusa Maxim. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 21(8), 1461–1463. https://doi.org/10.1007/s11274-005-7036-7

Ghenabzia, I., Hemmami, H., Ben Amor, I., Zeghoud, S., & Brahmia, F. (2023). Different methods of extraction of bioactive compounds and their effect on biological activity: A review. International Journal of Secondary Metabolite, 10(4), 469–494. https://doi.org/10.21448/ijsm.1225936

Grimi, N., Dubois, A., Marchal, L., Jubeau, S., Lebovka, N. I., & Vorobiev, E. (2014). Selective extraction from microalgae Nannochloropsis sp. using different methods of cell disruption. Bioresource Technology, 153, 254–259. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.011

Hao, J. Y., Han, W., Huang, S. D., Xue, B. Y., & Deng, X. (2002). Microwave-assisted extraction of artemisinin from Artemisia

annua L. Separation and Purification Technology, 28(3), 191–196. https://doi.org/10.1016/S1383-5866(02)00075-8

Hemmami, H., Ben Seghir, B., Ben Ali, M., Rebiai, A., Zeghoud, S., & Brahmia, F. (2020). Phenolic profile and antioxidant activity of bee pollen extracts from different regions of Algeria. Ovidius University Annals of Chemistry, 31(2), 93–98. https://doi.org/10.2478/auoc-2020-0017

Herrero, M., Mendiola, J. A., & Cifuentes, A. (2020). Recent advances in supercritical fluid extraction of natural products. The Journal of Supercritical Fluids, 165, Artículo 104889. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104889

Herrero, M., Plaza, M., Cifuentes, A., & Ibáñez, E. (2010). Extraction techniques for the determination of bioactive compounds in food. Journal of Chromatography A, 1217(16), 2495–2511. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.019

Jefferson Digital Commons. (2025). Supercritical CO_2 technology for biomass extraction: Review. https://jdc.jefferson.edu/sdefp/4

Kaiser, S., Verza, S. G., Moraes, R. C., Resende, P. E. D., Pavei, C., Ortega, G. G., & Barreto, F. (2013). Cat's claw oxindole alkaloid isomerization induced by common extraction methods. Química Nova, 36(6), 808–814. https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000600013

Kaufmann, B., & Christen, P. (2002). Recent extraction techniques for natural products: Microwave-assisted extraction and pressurized

solvent extraction. Phytochemical Analysis, 13(2), 105–113. https://doi.org/10.1002/pca.620

Ko, M. J., Nam, H. H., & Chung, M. S. (2020). Subcritical water extraction of bioactive compounds from Orostachys japonicus A. Berger (Crassulaceae). Scientific Reports, 10, Artículo 10890. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67508-2

Kwon, J. H., Bélanger, J. M., Paré, J. R., & Yaylayan, V. A. (2003). Application of the microwave-assisted process (MAP™) to the fast extraction of ginseng saponins. Food Research International, 36(5), 491–498. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(02)00361-X

Li, Y., Fabiano-Tixier, A. S., Vian, M., & Chemat, F. (2025). A review on microwave- and ultrasound-assisted extractions of bioactive compounds. Food and Bioprocess Technology, 18, 1–15. https://doi.org/10.1007/s11947-025-03882-x

Li, Z., Fan, Y., & Xi, J. (2019). Recent advances in high voltage electric discharge extraction of bioactive ingredients from plant materials. Food Chemistry, 277, 246–260. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.119

Liu, D., Vorobiev, E., Savoire, R., & Lanoisellé, J. L. (2011). Intensification of polyphenols extraction from grape seeds by high voltage electrical discharges and extract concentration by dead-end ultrafiltration. Separation and Purification Technology, 81(2), 134–140. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.07.012

Liu, H., Qiu, N., Ding, H., & Yao, R. (2006). Pressurized liquid extraction of five major flavonoids from Lysimachia clethroide Maxim. Journal of Chromatography A, 1102(1–2), 1–6. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2005.10.027

Lubek-Nguyen, A., Ziemichód, W., & Olech, M. (2022). Application of enzyme assisted extraction for the recovery of natural bioactive compounds for nutraceutical and pharmaceutical applications. Applied Sciences, 12(7), Artículo 3232. https://doi.org/10.3390/app12073232

Machmudah, S., Kanda, H., Goto, M., Sasaki, M., & Quitain, A. T. (2021). Extraction of natural products using supercritical fluids and pressurized liquids: Current insights. Trends in Analytical Chemistry, 141, Artículo 116284. https://doi.org/10.1016/j.trac.2021.116284

Mano-Sousa, B. J., Alves, B. C., Andrade, F. P., & Duarte-Almeida, J. M. (2022). Is turbo-extraction an efficient method for obtaining cannabinoids? Research, Society and Development, 11(15), e450111534562. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i15.34562

Martins, P. M., Lanchote, A. D., Thorat, B. N., & Freitas, L. A. P. (2017). Turbo-extraction of glycosides from Stevia rebaudiana using a fractional factorial design. Revista Brasileira de Farmacognosia, 27(4), 510–518. https://doi.org/10.1016/j.bjp.2017.02.007

Marulanda, M., et al. (2021). Subcritical water extraction of natural

products: A review. Molecules, 26(13), Artículo 4004. https://doi.org/10.3390/molecules26134004

Mason, T. J. (1999). Sonochemistry. Oxford University Press.

Mulet, A., Cárcel, J. A., Benedito, J., & Rosselló, C. (2003). Ultrasonidos en la industria de los alimentos. Tecnología de Alimentos, 18(3), 45–52.

Mulet, A., Cárcel, J. A., Sanjuán, N., & Bon, J. (1999). Low intensity ultrasonics for non-destructive analysis/characterization of foods. Food Science and Technology International, 5(4), 285–298. https://doi.org/10.1177/108201329900500402

Nadar, S. S., Rao, P., & Rathod, V. K. (2018). Enzyme assisted extraction of bioactive compounds from fruit and vegetable wastes: A review. Food and Bioprocess Technology, 11(7), 1238–1251. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2111-5

Nguyen, T. T., et al. (2025). Subcritical water extraction of bioactive compounds from plant materials: A state-of-the-art review. Journal of Food Chemistry: X, 20, Artículo 100123. https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.100123

Olabinjo, O. O., & Oliveira, A. L. (2020). Comparative study of extraction yield and antioxidant property of sweet orange peels using pressurized liquid extraction (PLE), Soxhlet and hydrodistillation (HD). Croatian Journal of Food Science and Technology, 12(1), 1–11. https://doi.org/10.17508/CJFST.2020.12.1.01

Ozkan, G., & Barba, F. J. (2023). Impact of pulsed electric fields on membrane disintegration and mass transfer. Journal of Food Process Engineering, 46(1), e14552. https://doi.org/10.1111/jfpe.14552

Palma, M., & Barroso, C. G. (2002). Ultrasound-assisted extraction and determination of tartaric and malic acids from grapes and winemaking by-products. Analytica Chimica Acta, 458(1), 119–130. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(01)01511-2

Pan, X., Niu, G., & Liu, H. (2003). Microwave-assisted extraction of tea polyphenols and tea caffeine from green tea leaves. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 42(2), 129–133. https://doi.org/10.1016/S0255-2701(02)00037-5

Panić, M., Radosević, K., Bubalo, M. C., & Ivanković, S. R. (2024). Revisiting natural Deep eutectic solvents (NADES) as extraction media: Composition, performance, and recovery. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 168, Artículo 117244. https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117244

Perino, S., et al. (2025). High-voltage electrical discharge extraction of polyphenols from Satureja montana. Plants, 14(2), 220–235.

Puri, M., Sharma, D., & Barrow, C. J. (2012). Enzyme-assisted extraction of bioactive compounds from plants. Trends in Biotechnology, 30(1), 37–44. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2011.06.014

Rodríguez De Luna, S. L., Ramírez-Garza, R. E., & Serna Saldívar, S.

O. (2020). Environmentally friendly methods for flavonoid extraction from plant material: Impact of their operating conditions on yield and antioxidant properties. The Scientific World Journal, 2020, Artículo 6792069. https://doi.org/10.1155/2020/6792069

Rostagno, M. A., et al. (2022). Ultrasound-assisted extraction of lipids as food components: A review. Journal of Food Composition and Analysis, 110, Artículo 104514. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104514

Rostagno, M. A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2003). Ultrasound-assisted extraction of soy isoflavones. Journal of Chromatography A, 1012(2), 119–128. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(03)01183-1

Šic Žlabur, J., et al. (2024). High voltage electrical discharge (HVED) for aqueous polyphenol extraction: Process intensification and solvent effects. Food Chemistry Advances, 3, Artículo 100314. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100314

Triaux, Z., Petitjean, H., Marchioni, E., Steyer, D., & Marcic, C. (2021). Comparison of headspace, hydrodistillation and pressurized liquid extraction of terpenes and terpenoids from food matrices—Qualitative and quantitative analysis. Journal of Analytical Chemistry, 76(3), 284–295. https://doi.org/10.1134/S106193482103014X

Vinatoru, M. (2001). An overview of the ultrasonically assisted

extraction of bioactive principles from herbs. Ultrasonics Sonochemistry, 8(3), 303–313. https://doi.org/10.1016/S1350-4177(01)00071-2

Waksmundzka-Hajnos, M., Petruczynik, A., Dragan, A., Wianowska, D., & Dawidowicz, L. (2004). Effect of extraction method on the yield of furanocoumarins from fruits of Archangelica officinalis Hoffm. Phytochemical Analysis, 15(5), 313–319. https://doi.org/10.1002/pca.783

Xiafei, L., Xu, L., Jiang, H., Tang, W., Liu, Y., Zhang, X., ... & Guo, X. (2021). Flash extraction of the active constituents and its antitumor activity from Rehmanniae radix, Achyranthes bidentatae radix, Dioscoreae rhizoma and Chrysanthemi flos. Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences, 34(5), 1777–1782.

Xiang, B., Zhou, X., Qin, D., Li, C., & Xi, J. (2022). Infrared assisted extraction of bioactive compounds from plant materials: Current research and future prospect. Food Chemistry, 371, Artículo 131192. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131192

Acosta-Vega, L., Cifuentes, A., Ibáñez, E., & Galeano Garcia, P. (2025). Exploring Natural Deep Eutectic Solvents (NADES) for enhanced essential oil extraction: Current insights and applications. Molecules, 30(2), Artículo 284. https://doi.org/10.3390/molecules30020284

Al Fuhaid, L., Khattak, S., Alghuneim, A., Gallouzi, I., Choi, Y. H., Verpoorte, R., ... & Farinha, A. (2025). NADES as

biocompatible media for thermally stable RNA molecules. bioRxiv. https://doi.org/10.1101/2025.07.23.665770

Asritha, D. K., Hamid, Shams, R., Dash, K. K., Panjabrao, A. S., & P, F. K. (2025). Green extraction of anthocyanins from fruits and by-products using deep eutectic solvents: A sustainable approach. Food Chemistry Advances, 8, Artículo 101072. https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.101072

Bacardit Dalmases, A., Ollé Otero, L., Sorolla Casellas, S., & Casas Solé, C. (2017). Process for obtaining a tannin extract isolated from grapes, tannin extract obtained and uses thereof (Patente N.° WO2017203429A1). World Intellectual Property Organization.

Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils – A review. Food and Chemical Toxicology, 46(2), 446–475. https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106

Bechis, G., Mastellone, G., Marengo, A., Sgorbini, B., Cagliero, C., & Rubiolo, P. (2022). Hydrophobic natural eutectic solvents for the gas chromatographic determination of suspected allergens in fragrances by dispersive liquid-liquid microextraction. Separations, 9(10), Artículo 318. https://doi.org/10.3390/separations9100318

Buzatu, A. R., Todea, A., Pop, R., Dreavă, D. M., Paul, C., Bîtcan, I., ... & Boeriu, C. G. (2025). Designed reactive natural deep

eutectic solvents for lipase-catalyzed esterification. Molecules, 30(4), Artículo 778. https://doi.org/10.3390/molecules30040778

Cao, S., Zheng, W., Chen, Z., Zhang, F., Jiang, W., Qiu, Y., ... & Liao, L. (2021). Highly efficient deamidation of wheat gluten by glucose-citric acid-based natural deep eutectic solvent: A potential effective reaction media. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 69(11), 3452–3465. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07275

De Hoyos-Martínez, P. L., Merle, J., Labidi, J., & Charrier–El Bouhtoury, F. (2019). Tannins extraction: A key point for their valorization and cleaner production. Journal of Cleaner Production, 206, 1138–1155. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.243

Dhupar, N., Mehra, S., Saini, A., Munjal, N., Sanghi, R., & Sharma, A. (2025). Deep eutectic solvents: Revolutionizing material synthesis for advanced applications. En R. C. Thakur & L. Singh (Eds.), Deep eutectic solvents (pp. 181–206). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-2025-1504.ch008

El Kantar, S., Rajha, H. N., Boussetta, N., Vorobiev, E., Maroun, R. G., & Louka, N. (2019). Green extraction of polyphenols from grapefruit peels using high voltage electrical discharges, deep eutectic solvents and aqueous glycerol. Food Chemistry, 295, 165–171. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.111

Farooq, M. Q., Odugbesi, G. A., Abbasi, N. M., & Anderson, J. L.

(2020). Elucidating the role of hydrogen bond donor and acceptor on solvation in deep eutectic solvents formed by ammonium/phosphonium salts and carboxylic acids. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(49), 18286–18296. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c06926

Ferreira, S. S., Lamarca, R. S., Silva, L. S., Burgo, T. A. L., Lima Gomes, P. C. F., Amaral, C. D. B., ... & Gonzalez, M. H. (2025). Green approaches for preparation of natural deep eutectic solvents for determination of As, Cd, and Pb in plant samples by ICP-MS. ACS Omega, 10(24), 26118–26128. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c03345

Gajardo-Parra, N. F., Cotroneo-Figueroa, V. P., Aravena, P., Vesovic, V., & Canales, R. I. (2020). Viscosity of choline chloride-based deep eutectic solvents: Experiments and modeling. Journal of Chemical & Engineering Data, 65(11), 5581–5592. https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00715

García, A., Rodríguez-Juan, E., Rodríguez-Gutiérrez, G., Rios, J. J., & Fernández-Bolaños, J. (2016). Extraction of phenolic compounds from virgin olive oil by deep eutectic solvents (DESs). Food Chemistry, 197, 554–561. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.131

Gomez-Urios, C., Puchades-Colera, P., Frigola, A., Lopez-Malo, D., Esteve, M. J., & Blesa, J. (2024). Unlocking value from waste: A comparative study of orange peel extraction methods using choline chloride-based natural deep eutectic solvents. ACS Food

Science & Technology, 4(9), 2226–2232. https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00476

Hatab, F. A., Darwish, A. S., Lemaoui, T., Warrag, S. E. E., Benguerba, Y., Kroon, M. C., & AlNashef, I. M. (2020). Extraction of thiophene, pyridine, and toluene from n-decane as a diesel model using betaine-based natural deep eutectic solvents. Journal of Chemical & Engineering Data, 65(11), 5443–5457. https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00579

He, Q., Lei, Q., Huang, S., Zhou, Y., Liu, Y., Zhou, S., ... & Qiu, H. (2023). Effective extraction of bioactive alkaloids from the roots of Stephania tetrandra by deep eutectic solvents-based ultrasound-assisted extraction. Journal of Chromatography A, 1689, Artículo 463746. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2022.463746

Huang, R., Han, Q., Bi, H., Chen, S., Yu, Y., Yin, J., & Zhang, S. (2025). Sustainable lipid recovery from microalgae via hydrothermal pretreatment with natural deep eutectic solvents: Molecular design, mechanistic insights, and life cycle assessment. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 13(23), 8805–8816. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c03419

Huang, Y., Feng, F., Jiang, J., Qiao, Y., Wu, T., Voglmeir, J., & Chen, Z. G. (2017). Green and efficient extraction of rutin from tartary buckwheat hull by using natural deep eutectic solvents. Food Chemistry, 221, 1400–1405. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.013

Ijardar, S. P., Singh, V., & Gardas, R. L. (2022). Revisiting the physicochemical properties and applications of deep eutectic solvents. Molecules, 27(4), Artículo 1368. https://doi.org/10.3390/molecules27041368

Javed, S., Mangla, B., Sultan, M. H., Almoshari, Y., Sivadasan, D., Alqahtani, S. S., ... & Ahsan, W. (2024). Pharmaceutical applications of therapeutic deep eutectic systems (THEDES) in maximising drug delivery. Heliyon, 10(9), e29783. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29783

Jesus, A. R., Paiva, A., & Duarte, A. R. C. (2023). Current developments and future perspectives on biotechnology applications of natural deep eutectic systems. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 39, Artículo 100731. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100731

Jiménez-Ortega, L. A., Bastidas-Bastidas, P. de J., Angulo-Escalante, M. A., Mota-Morales, J. D., & Heredia, J. B. (2024). Optimized extraction of glycosylated flavonoids from pepper (Capsicum annuum L.) agricultural biomass residues through ultrasonic pulse-assisted natural deep eutectic solvents. ACS Sustainable Resource Management, 1(1), 165–177. https://doi.org/10.1021/acssusresmgt.3c00001

Kanzaki, R. (2023). Deep eutectic solvents for liquid–liquid extraction. Analytical Sciences, 39(7), 1021–1022. https://doi.org/10.1007/s44211-023-00362-0

Kaur, A., Kaur, R., Bhardwaj, U., & Sharma, P. (2025). Optimisation and utilization of deep eutectic solvents for the green extraction of anticancer alkaloids from Catharanthus roseus. Natural Product Research, 1–9. https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2476199

Kovač, M. J., Jokić, S., Jerković, I., & Molnar, M. (2022). Optimization of deep eutectic solvent extraction of phenolic acids and tannins from Alchemilla vulgaris L. Plants, 11(4), Artículo 474. https://doi.org/10.3390/plants11040474

Kusuma, S. B., Wulandari, S., Nurfitriani, R. A., & Awaludin, A. (2022). The potential solvent for tannin extraction as a feed additive made of coffee husk (Coffea canephora) using Soxhlet method. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 980(1), Artículo 012024. https://doi.org/10.1088/1755-1315/980/1/012024

Lanjekar, K. J., & Rathod, V. K. (2021). Application of ultrasound and natural deep eutectic solvent for the extraction of glycyrrhizic acid from Glycyrrhiza glabra: Optimization and kinetic evaluation. Industrial & Engineering Chemistry Research, 60(26), 9532–9538. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00862

Li, G., & Row, K. H. (2018). Ternary deep eutectic solvent magnetic molecularly imprinted polymers for the dispersive magnetic solid-phase microextraction of green tea. Journal of Separation Science, 41(17), 3424–3431. https://doi.org/10.1002/jssc.201800222

Li, L., Zhang, D., Wang, Y., Liu, F., Xu, Y., & Bao, H. (2021). Effective extraction of palmatine and berberine from Coptis chinensis by deep eutectic solvents-based ultrasound-assisted extraction. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2021, Artículo 9970338. https://doi.org/10.1155/2021/9970338

Liu, S., Qi, J., Li, Y., Wang, R., Wang, L., Lu, H., & Zhang, Z. (2024). pH-responsive natural deep eutectic solvent: An environmental alternative for the sustainable extraction of petroleum hydrocarbons from oil sands. Langmuir, 40(47), 25069–25079. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c03295

Liu, X., Zhai, Y., Zhu, Y., Xu, Z., Liu, L., Ren, W., ... & Xu, M. (2022). Simultaneously enhanced dewaterability and biopolymer release of sludge by natural deep eutectic solvents: Performance, mechanisms, and insights of theoretical calculations. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10(36), 11926–11938. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02988

Liu, Y., Friesen, J. B., McAlpine, J. B., Lankin, D. C., Chen, S. N., & Pauli, G. F. (2018). Natural deep eutectic solvents: Properties, applications, and perspectives. Journal of Natural Products, 81(3), 679–690. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.7b00945

Lorenzetti, A. S., Vidal, E., Silva, M. F., Domini, C., & Gomez, F. J. V. (2021). Native fluorescent natural deep eutectic solvents for green sensing applications: Curcuminoids in Curcuma longa powder. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(15), 5405–5411. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c00406

Mannu, A., Blangetti, M., Baldino, S., & Prandi, C. (2021). Promising technological and industrial applications of deep eutectic systems. Materials, 14(10), Artículo 2494. https://doi.org/10.3390/ma14102494

Mišan, A., & Pojić, M. (2021). Applications of NADES in stabilizing food and protecting food compounds against oxidation. Advances in Food and Nutrition Research, 95, 333–359. https://doi.org/10.1016/bs.abr.2020.09.010

Motta, D., Damin, A., Darjazi, H., Nejrotti, S., Piccirilli, F., Birarda, G., ... & Bonomo, M. (2025). Eco-friendly NaCl glycerol-based deep eutectic electrolyte for high-voltage electrochemical double layer capacitor. Green Chemistry, 27(21), 6002–6015. https://doi.org/10.1039/D4GC06369D

Niu, F., He, S., Zhang, J., & Wen, C. (2022). Study on ultrasonically-enhanced deep eutectic solvents leaching of zinc from zinc-containing metallurgical dust sludge. Metals, 12(11), Artículo 1856. https://doi.org/10.3390/met12111856

Osamede Airouyuwa, J., Sivapragasam, N., Ali Redha, A., & Maqsood, S. (2024). Sustainable green extraction of anthocyanins and carotenoids using deep eutectic solvents (DES): A review of recent developments. Food Chemistry, 448, Artículo 139061. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139061

Panyamao, P., Charumanee, S., Ruangsuriya, J., & Saenjum, C.

(2023). Efficient isolation of cellulosic fibers from coffee parchment via natural acidic deep eutectic solvent pretreatment for nanocellulose production. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11(38), 13962–13973. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c02679

Ramon, D. J., & Guillena, G. (2020). Deep eutectic solvents: Synthesis, properties, and applications. Wiley-VCH.

Rao, S., Zhang, F., Duan, Y., Chen, Z., Liang, D., & Shi, W. (2024). Urea-based deep eutectic solvents enzyme system for high efficiency extraction of alkaloids and flavonoids in plants: Zanthoxylum nitidum (Roxb.) DC. as a case. Microchemical Journal, 199, Artículo 109964. https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.109964

Rubin, A., Cecone, C., Trotta, F., & Zanetti, M. (2021). Mechanosynthesis of β-cyclodextrin polymers based on natural deep eutectic solvents. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(44), 14881–14889. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c04988

Ruesgas-Ramón, M., Suárez-Quiroz, M. L., González-Ríos, O., Baréa, B., Cazals, G., Figueroa-Espinoza, M. C., & Durand, E. (2020). Biomolecules extraction from coffee and cocoa by- and co-products using deep eutectic solvents. Journal of the Science of Food and Agriculture, 100(1), 81–91. https://doi.org/10.1002/jsfa.9996

Sanjeeta, Singh, A., & Kavirajwar, J. (2025). Dynamic properties and diverse applications of deep eutectic solvents. Journal of Ionic Liquids, 5(1), Artículo 100135. https://doi.org/10.1016/j.jil.2025.100135

Sipoloni, V. M., Bassicheto, M. C., de Oliveira, M. V., de Souza, A. B. S., Alves, G. M., & Veiga, T. A. M. (2025). Nonconventional techniques in plant alkaloid extraction: A decade of progress (2014–2023). Chemistry & Biodiversity, 22(1), e202403225. https://doi.org/10.1002/cbdv.202403225

Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. Chemical Reviews, 114(21), 11060–11082. https://doi.org/10.1021/cr300162p

Stanojević, L. P., Todorović, Z. B., Stanojević, K. S., Stanojević, J. S., Troter, D. Z., Nikolić, L. B., & Đorđević, B. (2021). The influence of natural deep eutectic solvent glyceline on the yield, chemical composition and antioxidative activity of essential oil from rosemary (Rosmarinus officinalis L.) leaves. Journal of Essential Oil Research, 33(3), 247–255. https://doi.org/10.1080/10412905.2021.1873867

Sukor, N. F., Selvam, V. P., Jusoh, R., Kamarudin, N. S., & Rahim, S. A. (2021). Intensified DES mediated ultrasound extraction of tannic acid from onion peel. Journal of Food Engineering, 296, Artículo 110437. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110437

Tabasso, S., Moro, R., Calcio Gaudino, E., Bruschetta, C., & Cravotto,

G. (2024). Sustainable microwave-assisted routes to N-substituted pyrrolidones using natural deep eutectic solvents as non-innocent solvents. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(37), 13810–13815. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c03729

Thakur, R. C., & Singh, L. (Eds.). (2025). Deep eutectic solvents (Vol. 1504). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-2025-1504

Turek, C., & Stintzing, F. C. (2013). Stability of essential oils: A review. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 12(1), 40–53. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12006

Vanda, H., Verpoorte, R., Klinkhamer, P. G. L., & Choi, Y. H. (2019). Natural deep eutectic solvents: From their discovery to their applications. En Deep eutectic solvents (pp. 61–81). Wiley. https://doi.org/10.1002/9783527818488.ch4

Vannuchi, N., Braga, A. R. C., & De Rosso, V. V. (2022). High-performance extraction process of anthocyanins from jussara (Euterpe edulis) using deep eutectic solvents. Processes, 10(3), Artículo 615. https://doi.org/10.3390/pr10030615

Varriale, S., Delorme, A. E., Andanson, J. M., Devemy, J., Malfreyt, P., Verney, V., & Pezzella, C. (2022). The power of NADES: Boosting enzyme stability towards thermal degradation. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7186465

Warrag, S. E. E., Peters, C. J., & Kroon, M. C. (2017). Deep eutectic

solvents for highly efficient separations in oil and gas industries. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 5, 55–60. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2017.03.013

Wei, Z. F., Wang, X. Q., Peng, X., Wang, W., Zhao, C. J., Zu, Y. G., & Fu, Y. J. (2015). Fast and green extraction and separation of main bioactive flavonoids from Radix Scutellariae. Industrial Crops and Products, 63, 175–181. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.013

Wu, H., Zhang, G., Zhang, Y., Guo, P., Wu, H., Gao, R., & Liu, T. (2025). Natural deep eutectic solvent (NADES)-aided extraction of bioactive compounds from cotton byproducts for agricultural applications: Extraction optimization, structural identification, and bioactivity evaluation. Industrial Crops and Products, 233, Artículo 121389. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121389

Xu, M., Ran, L., Chen, N., Fan, X., Ren, D., & Yi, L. (2019). Polarity-dependent extraction of flavonoids from citrus peel waste using a tailor-made deep eutectic solvent. Food Chemistry, 297, Artículo 124970. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124970

Yu, D., Xue, Z., & Mu, T. (2022). Deep eutectic solvents as a green toolbox for synthesis. Cell Reports Physical Science, 3(4), Artículo 100809. https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2022.100809

Yu, Q., Wang, F., Baroutian, S., Zhang, Y., Wang, Z., Yuan, Z., & Chen, X. (2023). A deep eutectic solvent binary-phase system for alkaloid extraction from Chinese herb Evodia lepta residue and

its mechanism. Journal of Cleaner Production, 398, Artículo 136645. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136645

Zhang, J., Tao, R., Wang, Y., Jiang, J., & Chen, Y. (2025). Enzyme-assisted deep eutectic solvent extraction of Litsea cubeba essential oil and its anti-Aspergillus flavus activity. LWT, 217, Artículo 117292. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117292

Zhou, P., Wang, X., Liu, P., Huang, J., Wang, C., Pan, M., & Kuang, Z. (2018). Enhanced phenolic compounds extraction from Morus alba L. leaves by deep eutectic solvents combined with ultrasonic-assisted extraction. Industrial Crops and Products, 120, 147–154. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.071

Zhu, J., Shao, C., Hao, S., Zhang, J., Ren, W., Wang, B., ... & Shao, L. (2025). Recent progress on the dissolution of cellulose in deep eutectic solvents. Industrial Crops and Products, 228, Artículo 120844. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120844

Zhu, Y., Zhang, C., Liu, J., Xue, Z., Zhang, B., & Zhao, H. (2025). Proper NADES treatment improved Zanthoxylum bungeanum essential oil yield and boosted α-terpineol antibacterial efficacy. Npj Science of Food, 9(1), Artículo 73. https://doi.org/10.1038/s41538-025-00437-4

Acosta-Vega, L., Martínez-Suárez, J. F., Sánchez-Garzón, F. S., Hernández-Carrión, M., & Nerio, L. S. (2023). Optimization of the encapsulation process of Cupuassu (Theobroma grandiflorum) pulp by spray drying as an alternative for the

valorization of Amazonian fruits. LWT, 184, Artículo 114994. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114994

Alvarado, J. de D. (1996). Conservación de alimentos mediante liofilización. Editorial Acribia.

Amoscotegui de Saavedra Velasco, A. (2021). Utilidad de la liofilización en la industria farmacéutica: estudio tecnofarmacéutico de los liofilizados orales comercializados en España [Tesis, Universidad de Sevilla].

Bakar, J., Ee, S. C., Muhammad, K., Hashim, D. M., & Adzahan, N. (2013). Spray-drying optimization for red pitaya peel (Hylocereus polyrhizus). Food and Bioprocess Technology, 6(5), 1332–1342.

Bourbon, A. I., Barbosa-Pereira, L., Vicente, A. A., Cerqueira, M. A., & Pastrana, L. (2020). Deshidratación de nanohidrogeles de proteína lactoferrina-glicomacropéptido. Food Hydrocolloids, 101, Artículo 105550.

BÜCHI Labortechnik AG. (2020). Manual de instrucciones (Original) Mini Spray Dryer B-290.

BÜCHI Labortechnik. (s. f.). Secado por aspersión. https://www.buchi.com/es/spray-drying

Buchi. (2021). Liofilización - Ventajas del proceso de liofilización. https://www.buchi.com/es/conocimiento/tecnologias/liofilizaci%C3%B3n

Caballero Pérez, L. A., Hernández Monzón, A., Tejedor Arias, R., & Montes Montes, E. J. (2023). Characterization of mixtures of natural polymeric materials for encapsulation, by spray drying. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA), 1(41), 1–12. https://doi.org/10.24054/rcta.v1i41.2412

Campo-Fernández, M., Granja-Rizzo, D. F., Matute-Castro, N. L., Cuesta-Rubio, O., & Márquez-Hernández, I. (2021). Microencapsulación mediante secado por atomización a partir de un extracto de los cálices de Hibiscus sabdariffa L. Revista Colombiana de Química, 50(1), 40–50. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v50n1.88424

Cardona Tangarife, D. P., Patiño Arias, L. P., & Ormaza Zapata, A. M. (2021). Aspectos tecnológicos de la microencapsulación de compuestos bioactivos en alimentos mediante secado por aspersión. Ciencia & Tecnología Agropecuaria, 22(1), 1–21. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1899

Charm, S. E. (1981). The fundamentals of food engineering (3.ª ed.). AVI Publishing.

Chavez Salazar, A., Ruiz Urbano, D. A., Rojas Sanchez, J. C., & Castellanos Galeano, F. J. (2021). Evaluación de una bebida funcional obtenida mediante secado por aspersión. Ingeniería y Competitividad, 24(1). https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.10582

Coimbra, P. P. S., Cardoso, F. D. S. N., & Gonçalves, É. C. B. D. A. (2021). Spray-drying wall materials: Relationship with bioactive

compounds. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 61(17), 2809–2826. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1786354

Cotabarren, I. M., Bertín, D., Razuc, M., Ramírez-Rigo, M. V., & Piña, J. (2018). Modelling of the spray drying process for particle design. Chemical Engineering Research and Design, 132, 1091–1104. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.012

Cytiva Life Sciences. (2021). Advantages of lyophilization. https://www.cytivalifesciences.com/en/us/solutions/genomics/knowledge-center/advantages-of-lyophilization

Díaz-Montes, E., Cerón-Montes, G. I., & Vargas-León, E. A. (2023). Encapsulación de compuestos bioactivos: una revisión sistemática. Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 10(20), 17–28.

Esquivel-González, B. E., Ochoa Martínez, L. A., & Rutiaga-Quiñones, O. M. (2015). Microencapsulación mediante secado por aspersión de compuestos bioactivos. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 16(2), 180–192.

Ferrari, C. C., Germer, S. P. M., & De Aguirre, J. M. (2012). Effects of spray-drying conditions on the physicochemical properties of blackberry powder. Drying Technology, 30(2), 154–163. https://doi.org/10.1080/07373937.2011.628429

Gatin, L. A., Auffret, T., Shalaev, E. Y., Speaker, S. M., & Teagarden, D. L. (2008). Freeze-drying concepts: The basics in formulation

and delivery. En Informa Healthcare (Vol. 15, pp. 177–195). Informa Healthcare.

Geankoplis, C. J. (1999). Transport processes and unit operations (3.ª ed.). Prentice Hall.

Geranpour, M., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2020). Recent advances in the spray drying encapsulation of essential fatty acids and functional oils. Trends in Food Science & Technology, 102, 71–90.

Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007). Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. Food Research International, 40(9), 1107–1121. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004

González-Gómez, L., Aguilar-Hernández, M. G., & Rivera-Lorca, J. A. (2024). Comparative analysis of drying methods on the stability of glucosinolates in Tropaeolum majus L. extracts. Journal of Food Engineering, 362, Artículo 111750.

Jafari, S. M., Arpagaus, C., Cerqueira, M. A., & Samborska, K. (2021). Nano spray drying of food ingredients; materials, processing and applications. Trends in Food Science & Technology, 109, 632–646. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.061

Jeyakumari, A., Zynudheen, A. A., & Parvathy, U. (2016). Microencapsulation of bioactive food ingredients and controlled release—a review. MOJ Food Processing & Technology, 2(6), 214–224. https://doi.org/10.15406/mojfpt.2016.02.00059

Khandagale, P. M., Bhairav, B., & Saudagar, R. B. (2016). Lyophilization technique: A review. Asian Journal of Research in Pharmaceutical Science, 6(4), 269–276.

Ledari, S. A., Milani, J. M., Shahidi, S. A., & Golkar, A. (2024). Comparative analysis of freeze drying and spray drying methods for encapsulation of chlorophyll with maltodextrin and whey protein isolate. Food Chemistry: X, 21, Artículo 101156.

Martínez Pacheco, R. (2016). Criodesecación: Fundamentos y aplicaciones. Universidad Nacional Autónoma de México.

Martínez-Vázquez, R., Silva-Guzmán, P., & Santos-Ordóñez, E. (2025). Microencapsulation of rosemary essential oil by freeze-drying: Impact of wall materials on volatile retention and antioxidant capacity. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 91, Artículo 103542.

Muthukumaran, S., & Trachant, C. (Eds.). (2020). Handbook on spray drying applications for food industries. CRC Press, Taylor & Francis Group.

O'Sullivan, J. J., Norwood, E.-A., O'Mahony, J. A., & Kelly, A. L. (2019). Tecnologías de atomización utilizadas en el secado por atomización en la industria láctea: una revisión. Journal of Food Engineering, 243, 57–69.

Patel, S. M., Doen, T., & Pikal, M. J. (2022). Lyophilized product temperature and control strategies: Innovations in freeze-drying equipment. Journal of Pharmaceutical Sciences, 111(2), 301–

315. https://doi.org/10.1016/j.xphs.2021.10.003

Piñón-Balderrama, C. I., Leyva-Porras, C., Terán-Figueroa, Y., Espinosa-Solís, V., Álvarez-Salas, C., & Saavedra-Leos, M. Z. (2020). Encapsulation of active ingredients in food industry by spray-drying and nano spray-drying technologies. Processes, 8(8), Artículo 889. https://doi.org/10.3390/PR8080889

Pisano, R., Fissore, D., & Barresi, A. A. (2019). Advances in freeze-drying technology for pharmaceuticals and natural products. Drying Technology, 37(4), 442–458. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1498842

Rafiee, Z., Nejatian, M., Daeihamed, M., & Jafari, S. M. (2019). Aplicación de diferentes nanotransportadores para la encapsulación de curcumina. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59(21), 3468–3497.

Rios-Aguirre, S., & Gil-Garzón, M. A. (2021). Microencapsulación por secado por aspersión de compuestos bioactivos en diversas matrices: Una revisión. TecnoLógicas, 24(51), Artículo e1836. https://doi.org/10.22430/22565337.1836

Rojas Muñoz, F. S. (2021). Revisión bibliográfica de compuestos fenólicos, su efecto en la salud, métodos de encapsulación y digestión simulada in vitro [Tesis, Universidad de Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185432

Román Santos, B. A., Monge Moreno, A. M., Brito Moína, H. L., & Proaño Quintanilla, F. A. (2025). Incidencia en la obtención del

colorante natural de mortiño (Vaccinium myrtillus L.): Evaluación comparativa de métodos de secado, calidad fisicoquímica y microbiológica. Ciencia Y Educación, 6(6.1), 722–730. https://cienciayeducacion.com/index.php/journal/article/view/1394

Samborska, K., Poozesh, S., Barańska, A., Sobulska, M., Jedlińska, A., Arpagaus, C., ... & Jafari, S. M. (2022). Innovations in spray drying process for food and pharma industries. Journal of Food Engineering, 321, Artículo 110960. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.110960

Santivarangkna, C., Kulozik, U., & Foerst, P. (2020). Alternative drying processes for sensitive food and natural products. Food Engineering Reviews, 12(1), 1–16. https://doi.org/10.1007/s12393-019-09209-w

Siccha, A. M., & Oiga Lock de Ugaz, O. (1995). Liofilización. Revista de Química, 9(2).

Sobulska, M., Wawrzyniak, P., & Woo, M. W. (2022). Superheated steam spray drying as an energy-saving drying technique: A review. Energies, 15(22), Artículo 8546. https://doi.org/10.3390/en15228546

Tang, X., & Pikal, M. J. (2019). Design and operation of freeze-dryers for product quality and process efficiency. En Handbook of freeze-drying of pharmaceuticals and biologicals (pp. 101–135).

CRC Press.

Torres-Loja, R. W., Garay-Montes, R., Vivanco, M. L. M., Mego-Mego, V., Rojas, P. V., & Gamonal, Y. (2024). Secado de pulpa de maracuyá (Passiflora edulis) por el método de liofilización. Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria, 44(1).

Vehring, R. (2008). Pharmaceutical particle engineering via spray drying. Pharmaceutical Research, 25(5), 999–1022. https://doi.org/10.1007/s11095-007-9475-1

Vila Jato, J. L. (2008). Tecnología farmacéutica (Vol. I). Editorial Síntesis, S. A.

Wang, W., Lyngberg, O. K., & Thomas, C. (2021). Equipment innovation and scale-up considerations in pharmaceutical freeze-drying. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 164, 112–124. https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2021.03.017

Yanovsky, A. (2003). Food preservation techniques. CRC Press.

Farmacognosia, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-72-6

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

Mercedes Campo Fernández:
Doctora en Ciencias Farmacéuticas con tres décadas de experiencia docente e investigativa en farmacognosia y química de productos naturales. Docente titular en la Universidad Técnica de Machala (Ecuador). Autora de más de 45 publicaciones indexadas, directora de tesis, coordinadora de proyectos de investigación y galardonada por su labor científica y académica.

FARMACOGNOSIA

Estimado lector, esta obra académica y científica fundamenta a la Farmacognosia ya la Química de Productos Naturales como disciplinas nodales y de permanente vigencia dentro de las Ciencias Farmacéuticas y la Bioquímica, articulando la riqueza del saber ancestral y empírico con el rigor metodológico de la validación analítica contemporánea. El texto sitúa a los metabolitos secundarios y a las drogas de origen natural no como meros vestigios históricos de la farmacoterapia, sino como plataformas estratégicas para el descubrimiento, caracterización y desarrollo de agentes terapéuticos fundamentados en la evidencia.

A través de una perspectiva interdisciplinaria que conjuga la botánica estructural, la síntesis y caracterización química, la farmacología, la biotecnología y las ciencias ambientales, la propuesta formativa promueve en el estudiante una visión crítica sobre los estándares de control de calidad, seguridad toxicológica y eficacia terapéutica de fitofármacos y nutracéuticos. El argumento central postula que el ejercicio farmacéutico moderno exige comprender la trazabilidad del principio activo desde su matriz biológica hasta su formulación médica, asumiendo la responsabilidad bioética y el impacto ecológico de la explotación de recursos botánicos.

En su conjunto, el volumen se proyecta como una guía didáctica y un marco de referencia conceptual riguroso para la formación universitaria de grado en ciencias químicas y farmacéuticas. Su enfoque estimula la investigación aplicada, dotando a los futuros profesionales de las competencias teóricas y metodológicas necesarias para responder a la creciente demanda sanitaria global de productos biológicos estandarizados, seguros y sostenibles.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-802-72-6

9 789907 802726

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
1969