

## Innovación verde en la obtención de extractos mediante fluidos supercríticos

### Green innovation in obtaining extracts using supercritical fluids

Elizabeth Macías-Cortés<sup>1</sup>, Jesús Alejandro Valdés-Nieblas<sup>1\*</sup>, Victoria Jared Borroel-García<sup>1</sup>, Jessica Lizbeth Coria-Arellano<sup>1</sup>, José Dimas López-Martínez<sup>1</sup> y Rebeca Ivonne López-González<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico # 1555 sur, Periférico Lerdo, Km 14.5, Lerdo, Durango, México, C.P. 35150.

<sup>2</sup> Universidad Juárez del Estado de Durango - Facultad de Agricultura y Zootecnia. Carretera Gómez Palacio - Tlahualilo Km. 32. Venecia, Gómez Palacio, Dgo. México. C.P. 35110.

\*Autor para correspondencia: valdesnieblas@hotmail.com

### RESUMEN

Es de gran relevancia para una eficiente programación del riego parcelario obtener la evapotranspiración máxima (Etm) a partir de la evapotranspiración de referencia (Etr) calculada mediante datos climáticos. Los objetivos del estudio fueron determinar la evapotranspiración máxima del maíz forrajero en base a lisimetría, los coeficientes de ajuste por desarrollo del cultivo (Kc) y un modelo más generalizado en base en unidades calor de crecimiento para diseñar programas de riego a partir de datos climáticos. El maíz forrajero se desarrolló en el lisímetro de pesada bajo condiciones de no estrés de humedad para obtener la Etm del maíz en base a su demanda climática y su desarrollo. También se obtuvieron la evapotranspiración de referencia (Etr) y las unidades calor de crecimiento (UCa). Los resultados de la Etm del maíz forrajero mostraron valores pico hasta de 16 mm por día en floración y coeficientes de ajuste por desarrollo hasta de dos, en la misma etapa de máxima demanda de agua. Los valores de Kc se ajustaron en forma excelente a un modelo de segundo grado con una  $R^2$  del 95%, dentro del rango bajo estudio. Se concluye que el modelo del Kc, obtenido con los datos de evapotranspiración del lisímetro de pesada, presentó ajustes estadísticos excelentes al polinomial de segundo grado con  $R^2$  de 95 %, con los coeficientes del modelo altamente significativos y de generalidad amplia por integrar las unidades calor de crecimiento.

**Palabras clave:** Unidades calor, humedad no restrictiva, reflectometría, fenología, modelación.

### ABSTRACT

The preference for more natural and environmentally friendly products has driven the search for technologies capable of obtaining plant extracts cleanly and efficiently. One of the most interesting is supercritical fluid extraction, a technique that takes advantage of a rare state of matter that occurs when a substance exceeds a certain temperature and pressure and ceases to behave as a liquid or a gas. In this intermediate state, fluids can dissolve compounds with great precision and, at the same time, move with the speed of a gas within the plant material. In this scenario, carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) plays a key role. In its supercritical form, it is safe, non-toxic, and excellent for preserving heat-sensitive compounds, making it an ideal solvent. Unlike traditional methods, this technique allows for faster processing, leaves no harmful residues, and allows for precise adjustment of pressure and temperature to obtain purer and more selective extracts. Thanks to these advantages, it is now used to recover valuable compounds such as polyphenols, terpenes, and antioxidants present in many plants. Its application has expanded to the food, cosmetics, and pharmaceutical industries, and it is even part of everyday processes like coffee decaffeination. Although it still presents challenges, such as the cost of equipment and the need for specialized personnel, the growing interest in green technologies indicates that supercritical extraction will continue to gain ground. It's a clear example of how science can offer cleaner and more efficient solutions to harness the best of nature without harming it.

**Keywords:** Bioactive compounds, green technologies, supercritical  $\text{CO}_2$ , sustainability.

## INTRODUCCIÓN

En más de una ocasión hemos escuchado hablar de nuevos productos que se acercan más a lo “natural”, o hecho con “extractos naturales”, sin embargo, esto no nos permite llegar a una idea de cómo es que esos productos realmente están fabricados para asegurar tal dicho. Probablemente cuando escuchamos sobre alguno de ellos nos podemos preguntar ¿Cómo es que tal shampoo, o tal alimento puede contener extractos de alguna planta? ¿cómo le hacen para obtener dichos extractos? En este espacio trataremos de explicarlo, además de hablar de una de las técnicas de extracción que ha venido a añadir un valor agregado: la extracción por fluidos supercríticos.

Las plantas han sido utilizadas por la humanidad desde tiempos antiguos como fuente de compuestos con propiedades terapéuticas, nutricionales y cosméticas. Estos compuestos comúnmente llamados compuestos bioactivos son objeto de intensa investigación, debido a su potencial en la elaboración de medicamentos, alimentos funcionales y productos naturales. Sin embargo, extraerlos de manera eficiente, sin alterar su estructura ni contaminar el entorno, sigue siendo todo un reto (Guamán-Balcázar et al., 2019).

Frente a los métodos tradicionales de extracción, que implican el uso de solventes orgánicos y altas temperaturas, ha surgido varias alternativas innovadora y ecológica que forman parte de la química verde. Estas tecnologías de extracción son llamadas emergentes e implican un menor impacto al medio ambiente. Una de las tecnologías con mayor potencial es la extracción con fluidos supercríticos. Esta tecnología aprovecha propiedades físicas excepcionales para obtener extractos puros, selectivos y libres de residuos tóxicos. En este artículo te contamos cómo funciona esta técnica y por qué está ganando terreno en la ciencia verde (Pilařová et al., 2024).

### ¿Qué son los compuestos bioactivos?

Los compuestos bioactivos son sustancias presentes en pequeñas cantidades en plantas, pero con una gran capacidad para interactuar con organismos vivos. No son nutrientes esenciales, pero sí aportan beneficios para la salud, como propiedades

antioxidantes, antiinflamatorias o antimicrobianas (Aili et al., 2024).

Ejemplos comunes son los polifenoles del té verde, los terpenos del orégano o el romero, la curcumina de la cúrcuma, y los alcaloides como la cafeína o la morfina. Estos compuestos se extraen principalmente de hojas, raíces, flores, semillas o cortezas, y se utilizan en alimentos, suplementos, cosméticos y fármacos (Zhang & Wu, 2025).

### Métodos de extracción: del fuego a la ciencia verde

Los métodos tradicionales de extracción tales como la maceración, la destilación por arrastre de vapor o la extracción Soxhlet han sido eficaces, pero presentan importantes limitaciones: requieren mucho tiempo, consumen grandes volúmenes de solventes orgánicos (muchos de ellos tóxicos o contaminantes) y pueden degradar compuestos sensibles al calor. En respuesta a ello han emergido tecnologías “verdes” de extracción, como la extracción asistida por ultrasonido, microondas y fluidos supercríticos. Todas ellas buscan ser más eficientes, sostenibles y selectivas (Chemat et al., 2017).

Un fluido supercrítico es una sustancia que se encuentra a una temperatura y presión superiores a su punto crítico. El punto crítico es una condición específica de temperatura y presión en la que una sustancia deja de comportarse como un líquido o un gas, y entra en un estado intermedio llamado fluido supercrítico. En este punto, ya no hay una frontera clara entre lo que es líquido y lo que es gas: el fluido tiene la capacidad de disolución de un líquido, pero fluye como un gas. Para imaginarlo de forma sencilla, piensa en el agua: si la calientas y aumentas la presión hasta llegar a unos 374 °C y 218 atmósferas, alcanzas su punto crítico (Mukhopadhyay, 2000). A partir de ahí, el agua ya no es ni vapor ni líquido, sino algo intermedio con propiedades únicas, ideal para procesos como la extracción de compuestos bioactivos sin dañar el medio ambiente. En ese estado, el fluido combina propiedades de los líquidos y los gases: tiene la capacidad de disolver sustancias como un líquido, pero con la capacidad de difusión y penetración de un gas (Reverchon, y De Marco, 2006). (Figura 1).

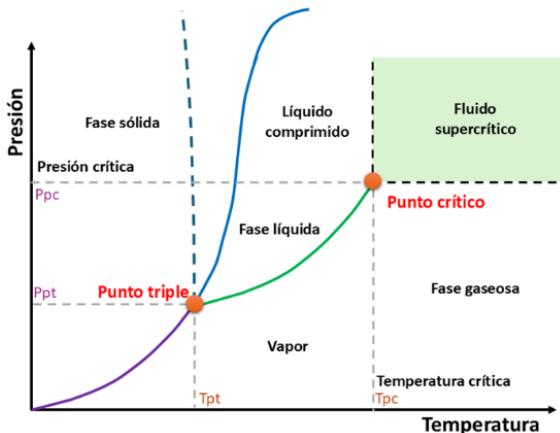


Figura 1. Diagrama de fases.

Para este tipo de extracciones, el solvente más utilizado es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), un compuesto que alcanza su estado supercrítico a tan solo  $31.1\text{ }^\circ\text{C}$  y  $73.8$  atmósferas, condiciones relativamente suaves si se comparan con otros solventes. Esta accesibilidad hace que el  $\text{CO}_2$  sea especialmente atractivo para trabajar con compuestos naturales, ya que permite evitar temperaturas elevadas que podrían degradar moléculas sensibles. En su estado supercrítico, el  $\text{CO}_2$  combina la capacidad disolvente de un líquido con la movilidad de un gas, lo que le permite penetrar con rapidez en el material vegetal y extraer selectivamente los compuestos de interés, como aceites esenciales, polifenoles y otros metabolitos bioactivos (Herrero et al., 2010). Una ventaja clave es que, al finalizar la extracción, basta con disminuir la presión para que el  $\text{CO}_2$  regrese a su estado gaseoso y se separe de los extractos sin dejar residuos, obteniendo productos más puros y libres de contaminación química.

Además, el  $\text{CO}_2$  es un solvente seguro, no tóxico, incombustible y aprobado para uso alimentario, lo que facilita su aplicación en industrias donde la pureza es un requisito fundamental. Gracias a estas características, su uso se ha extendido en procesos como el descafeinado del café, la obtención de pigmentos naturales, la extracción de antioxidantes y la recuperación de aceites esenciales con perfiles aromáticos más definidos. La capacidad del  $\text{CO}_2$  supercrítico para modular su poder disolvente mediante ajustes de presión y temperatura permite además “afinar” la selectividad del proceso, haciendo posible separar compuestos muy específicos dentro

de mezclas complejas (Jokić et al., 2014). Por ello, hoy se considera uno de los solventes verdes más versátiles y prometedores en la química de extracción, un aliado clave en la producción de extractos más limpios, seguros y ambientalmente responsables. El extractor de fluidos supercríticos es uno de los equipos más representativos de la química verde moderna, ya que permite obtener compuestos valiosos de plantas sin recurrir a solventes tóxicos ni altas temperaturas. A grandes rasgos, el sistema está formado por un cilindro de  $\text{CO}_2$ , una bomba que incrementa su presión, un intercambiador de calor que controla la temperatura y un recipiente llamado celda o cámara de extracción, donde se coloca el material vegetal.

Una vez que el dióxido de carbono es presurizado y calentado hasta superar su punto crítico, adquiere propiedades únicas: se comporta como un gas que se mueve con facilidad entre las partículas del material, pero también como un líquido capaz de disolver moléculas específicas, como terpenos, antioxidantes o aceites esenciales. Así, el  $\text{CO}_2$  supercrítico penetra en la muestra, extrae los compuestos deseados y es conducido hacia un separador, donde se reduce la presión para que el solvente vuelva a estado gaseoso y libere el extracto puro, sin dejar residuos en el producto final. Una de las principales ventajas de este tipo de equipos es que permiten ajustar presión, temperatura y flujo para seleccionar qué compuestos se quieren obtener, lo que los convierte en herramientas altamente versátiles tanto para investigación como para aplicaciones industriales (Reverchon y De Marco, 2006) (Figura 2).

Además, como el  $\text{CO}_2$  puede reciclarse dentro del sistema, el proceso es eficiente y sustentable, cumpliendo con los principios de la química verde y reduciendo significativamente la huella ambiental de la extracción de compuestos naturales (Chemat et al., 2017). Por ello, estos extractores se utilizan hoy en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, y continúan expandiéndose hacia nuevas aplicaciones gracias a su precisión, seguridad y bajo impacto ambiental.



Figura 2. Extractor de fluidos supercríticos. Fuente: Productos de Instrumentación S.A.

La extracción con  $\text{CO}_2$  supercrítico tiene múltiples ventajas, en primer lugar es selectiva, ya que permite ajustar presión y temperatura para extraer sólo ciertos compuestos, puede operar a bajas temperaturas que no dañan los compuestos, sobre todo a los termolábiles, por la parte sustentable es segura y ecológica, ya que no deja residuos tóxicos y el  $\text{CO}_2$  puede reciclarse y sobre todo es una tecnología eficiente, ya que los equipos se pueden automatizar y se pueden acortar los tiempos de extracción.

La extracción con fluidos supercríticos se ha aplicado con éxito a una amplia variedad de plantas. En el caso de las hojas de mango, la extracción con fluidos supercríticos ha demostrado ser especialmente eficiente para recuperar antioxidantes naturales, como mangiferina y otros polifenoles. Estas moléculas suelen estar presentes en bajas concentraciones y son muy sensibles a las altas temperaturas, por lo que el uso de  $\text{CO}_2$  supercrítico permite obtenerlas sin degradación y con una pureza mayor que la lograda con métodos tradicionales. El estudio de Guamán-Balcázar et al. (2019) evidenció que esta tecnología no solo mejora la calidad del extracto, sino que también facilita la obtención de partículas submicrométricas listas para aplicaciones en alimentos funcionales y productos nutracéuticos, mostrando su enorme potencial para valorizar residuos agroindustriales como las hojas de mango.

En el caso del zacate de limón, conocido por su aroma cítrico y su alta concentración de compuestos volátiles, la extracción supercrítica permite aislar sus aceites esenciales de forma más limpia y selectiva. Los compuestos aromáticos del zacate de limón tal como el citral, se benefician de este método porque se preservan mejor a bajas temperaturas y sin residuos de solventes. El trabajo de Pilařová et al. (2024) mostró que una extracción escalonada mediante  $\text{CO}_2$  supercrítico permite obtener fracciones diferenciadas: por un lado, los compuestos volátiles responsables del aroma, y por otro, los compuestos fenólicos con actividad antioxidante, lo que demuestra la versatilidad del proceso para obtener extractos con distintos fines industriales.

Las hojas de olivo contienen oleuropeína y otros polifenoles con alto valor nutracéutico, pero su extracción puede ser compleja debido a su estructura química y a la sensibilidad térmica de sus compuestos. La extracción supercrítica se ha posicionado como una alternativa ideal porque permite recuperar estas moléculas sin degradación y con un perfil químico más definido. Le Floch et al. (1998) demostraron que, mediante el ajuste preciso de presión y co-solventes, es posible obtener extractos altamente ricos en compuestos fenólicos, libres de solventes orgánicos y con un potencial notable para aplicaciones farmacéuticas, antioxidantes y antimicrobianas.

En el caso de las hojas de cafeto y de salvia, aunque aún no se han publicado reportes formales, las experiencias experimentales realizadas han mostrado resultados muy prometedores. Ambas plantas contienen una diversidad de compuestos bioactivos, particularmente polifenoles, que suelen ser difíciles de recuperar mediante técnicas convencionales debido a su susceptibilidad a la oxidación y a altas temperaturas.

Por la naturaleza del solvente utilizado, esta tecnología es especial para obtener aceites esenciales ricos en terpenos, como el aceite de orégano y romero, o para eliminar cafeína sin dejar residuos del café y del té, proceso también conocido como descafeinado (Gallego et al., 2022).

La extracción con fluidos supercríticos también se ha convertido en una herramienta clave en la industria farmacéutica, cosmética y en la producción de

alimentos funcionales, sectores que demandan ingredientes de alta pureza, libres de solventes tóxicos y con una calidad química más estable. En el ámbito farmacéutico, esta tecnología permite aislar compuestos bioactivos con potencial terapéutico, como antioxidantes, antiinflamatorios o metabolitos especializados sin degradarlos y conservando su actividad biológica. En la industria cosmética, el CO<sub>2</sub> supercrítico se emplea para obtener fragancias naturales, aceites esenciales y extractos ricos en terpenos, los cuales mantienen mejor su aroma y propiedades debido a las bajas temperaturas del proceso. Por su parte, en los alimentos funcionales, esta técnica permite obtener extractos ricos en polifenoles, vitaminas y otros compuestos nutracéuticos que aportan beneficios a la salud (López-Hortas et al., 2022).

## CONCLUSIONES

La extracción con fluidos supercríticos representa hoy una de las herramientas más prometedoras dentro de la química verde, al ofrecer una alternativa sustentable, segura y altamente eficiente para la obtención de compuestos bioactivos de plantas. A lo largo de este manuscrito se mostró cómo el CO<sub>2</sub> supercrítico, gracias a sus propiedades únicas, puede actuar simultáneamente como líquido y gas, lo que le permite penetrar con facilidad en el material vegetal y disolver selectivamente moléculas de interés sin causarles daño térmico ni dejar residuos tóxicos. Esto se traduce en extractos más puros, con perfiles químicos mejor conservados y con un impacto ambiental considerablemente menor frente a técnicas tradicionales.

La evidencia presentada demuestra que esta tecnología no solo es capaz de recuperar antioxidantes, terpenos, polifenoles y otros metabolitos valiosos en especies como mango, zacate de limón, olivo, cafeto y salvilla, sino que también ofrece ventajas en procesos industriales como el descafeinado y la obtención de fragancias naturales. Su versatilidad permite adaptar presión, temperatura y co-solventes para aislar compuestos específicos, lo que amplía enormemente su potencial en sectores como el farmacéutico, cosmético, alimentario y nutracéutico.

Sin embargo, aunque sus beneficios son claros, todavía enfrenta retos que deben abordarse para

lograr una adopción más amplia, especialmente en pequeñas y medianas industrias. Entre estos desafíos se encuentran el costo de los equipos, la necesidad de personal especializado y la limitada disponibilidad de infraestructura en algunas regiones. Aun así, la tendencia global hacia procesos más limpios y sostenibles, junto con el avance tecnológico y la reducción progresiva de costos, apunta a que la extracción supercrítica continuará ganando terreno en los próximos años.

En conjunto, esta tecnología ilustra cómo la ciencia puede transformar la manera en que aprovechamos la biodiversidad vegetal, permitiéndonos obtener productos de mayor calidad mientras reducimos nuestra huella ambiental. Es, sin duda, una herramienta clave en la transición hacia una industria más verde, responsable e innovadora.

## LITERATURA CITADA

- Aili Q., Cui, D., Li, Y., Zhige, W., Yongping, W., Minfen, Y., Dongbin, L., Xiao, R., Qiang, W., Composing functional food from agro-forest wastes: Selectively extracting bioactive compounds using supercritical fluid extraction, *Food Chemistry*, Volume 455, 2024, 139848, ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139848>.
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A.-S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasonic-assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540–560. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Gallego R., Mendiola, J.A., Herrero, M., Castro-Puyana, M. and Ibáñez, E. (2022). Supercritical fluid extraction. In *Natural Product Extraction Principles and Applications*, Prado J. and Rostagno M. Eds., The Royal Society of Chemistry, 2nd ed, pp. 202-240. <https://doi.org/10.1039/9781839165894-00202>.
- Guamán-Balcázar, M.C., Montes, A., Pereyra, C., Martínez de la Ossa, E. (2019). Production of submicron particles of the antioxidants of

- mango leaves/PVP by supercritical antisolvent extraction process, *The Journal of Supercritical Fluids*, 143, 294-304, ISSN 0896-8446.  
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.09.007>.
- Herrero, M., Cifuentes, A., Ibañez, E. (2006). Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review, *Food Chemistry*, 98(1), 136-148, ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058>.
- Jokić, S., Horvat, G., Aladić, K. (2014) Design of SFE System Using a Holistic Approach: Problems and Challenges. In *Supercritical Fluid Extraction: Technology, Applications and Limitations*. Lindy, J. Ed. (1st ed.) pp. 95-122.
- Le Floch, F., Tena, M.T., Ríos A., Valcárcel, M. (1998). Supercritical fluid extraction of phenol compounds from olive leaves, *Talanta*, 46(5), 1123-1130, ISSN 0039-9140. [https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(97\)00375-5](https://doi.org/10.1016/S0039-9140(97)00375-5).
- López-Hortas, L., Rodríguez, P., Díaz-Reynoso, B., Gaspar, M.C., de Sousa, H., Braga M.E.M., Domínguez, H. (2022). Supercritical fluid extraction as a suitable technology to recover bioactive compounds from flowers. *The Journal of Supercritical Fluids*, 188, 105652. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105652>.
- Mukhopadhyay, M. (2000). *Natural Extracts Using Supercritical Carbon Dioxide* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420041699>.
- Pilařová, V., Plachká, K., Herbsová, D., Kosturko, Š., Svec, f., Nováková, I. (2024). Comprehensive two-step supercritical fluid extraction for green isolation of volatiles and phenolic compounds from plant material, *Green Chemistry*, 26(11), 6480-6489, ISSN 1463-9262. <https://doi.org/10.1039/d4gc00371c>.
- Reverchon, E., De-Marco, I. (2006). Supercritical fluid extraction and fractionation of natural matter, *The Journal of Supercritical Fluids*, 38(2), 146-166, ISSN 0896-8446. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2006.03.020>.
- Zhang, J., Wu, H., Valorization of bioactive compounds from food by-products using supercritical fluid extraction: A technological and industrial perspective, *Food Chemistry*, Volume 484, 2025, 144277, ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144277>.