

DESARROLLO DE ADITIVOS FUNCIONALES ENCAPSULADOS PARA SU USO EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA

N. Albalaejo¹, C. Salgado², J.F. Fernández²

¹Departamento de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Madrid, 28049, Madrid, España.

nerea.albalaejo@estudiante.uam.es

²Instituto de Cerámica y Vidrio, ICV-CSIC, 28049, Madrid, España.

Resumen: Ante la necesidad de encontrar alternativas más seguras y sostenibles a los fitosanitarios sintéticos en la industria agroalimentaria, los aditivos basados en sistemas arcilla/aceite esencial se presentan como alternativa prometedora para la conservación postcosecha. En su síntesis se emplearon arcillas laminares esmectíticas (Sepigel® y Bentolit Super) y aceites esenciales de *Mentha arvensis*, canela, orégano y clavo, obteniendo materiales por amasado en forma de polvo. Se caracterizaron mediante TGA, FTIR y microscopía, confirmando la incorporación efectiva de aceites en la matriz mineral. Los ensayos de envejecimiento evidenciaron mayor estabilidad y menor evaporación de los aceites bajo refrigeración. Además, se evaluó la sedimentación en suspensión acuosa, destacando las mejores prestaciones para Bentolit Super. Finalmente, se estudió la vida útil de fresas postcosecha mediante diferentes aplicaciones del producto. El tratamiento mejora la conservación visual y prolonga la vida útil de las fresas, posicionándose como alternativa eficaz y sostenible en la industria agroalimentaria.

Palabras clave: Arcilla, aceite esencial, encapsulación, conservación postcosecha, vida útil, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN.

En el contexto actual, la calidad y seguridad alimentaria representan una prioridad global. Estadísticas proporcionadas por la OMS y la FAO señalan una relevante incidencia de enfermedades por alimentos en mal estado y una exigencia de producción incrementada, mientras que se enfatiza la reducción del desperdicio alimentario como factor crítico para la sostenibilidad. En respuesta, la industria agroalimentaria ha implementado estrictas medidas en calidad, trazabilidad y seguridad, adoptando nuevas tecnologías y regulaciones para cumplir con políticas mundiales. Ejemplo de ello es la estrategia “De la Granja a la Mesa”, impulsada por la Unión Europea y orientada a mejorar la salud y la sostenibilidad de los alimentos [1].

En la industria agroalimentaria, la innovación se centra en el desarrollo de aditivos funcionales, sustancias añadidas a los alimentos con funciones tecnológicas específicas para mejorar características como vida útil, textura, color y sabor. Regulados estrictamente por la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), estos aditivos pueden ser de origen natural, animal, mineral o sintético, y se clasifican en distintas familias según su función técnica. Los aceites esenciales de plantas aromáticas constituyen aditivos funcionales naturales con propiedades antifúngicas, antivirales y antioxidantes, que contribuyen a prolongar la conservación y calidad de los alimentos [2]. Por las limitaciones de su incorporación directa sobre la matriz alimentaria (alteraciones organolépticas, seguridad alimentaria o volatilidad), la encapsulación de los aceites

se presenta como método preferente para su incorporación, mejorando la estabilidad, la protección frente a agentes ambientales y la liberación controlada [3]. Se puede realizar mediante matrices orgánicas (polisacáridos, proteínas) o inorgánicas, destacando las arcillas naturales por su inercia química, estabilidad térmica, alta superficie específica y compatibilidad ambiental [4].

Las arcillas, biomateriales naturales de bajo costo y alta disponibilidad, cumplen requisitos regulatorios para su uso en contacto con alimentos y aporte funcional. Su estructura laminar compuesta por sílice y alúmina permite interacciones químicas y físicas adecuadas para adsorción y liberación controlada de compuestos activos. Algunas arcillas laminares de la familia de esmectitas, son ejemplos destacados de matrices con propiedades de adsorción, intercambio iónico y estabilidad térmica. La purificación y modificación superficial de estas arcillas optimizan sus propiedades adsorbentes y funcionales, orientadas a la encapsulación eficiente de aceites esenciales. Esta técnica contribuye a extender la vida útil y calidad de alimentos frescos, como las fresas, altamente perecederas y susceptibles a hongos postcosecha, donde el aceite esencial de menta se destaca por sus propiedades antifúngicas y tolerancia organoléptica favorable [5].

El tratamiento con arcillas aditivadas puede aplicarse en fases pre o postcosecha, por vías seca (espolvoreado) o húmeda (espray, inmersión, recubrimiento), debiendo considerarse protocolos de aplicación y seguridad para el consumidor.

El objetivo principal de este estudio es la síntesis y caracterización de arcillas aditivadas como vehículo de liberación controlada de aceites esenciales. Se trabajará en maximizar la capacidad de adsorción de las arcillas, asegurando al mismo tiempo su inocuidad y compatibilidad con superficies alimentarias. Además, se evaluará la estabilidad de los materiales encapsulados en suspensión acuosa, así como el envejecimiento de las arcillas aditivadas a lo largo del tiempo. Finalmente, se llevará a cabo un estudio de vida útil en fresas tratadas con el producto, con el fin de validar su eficacia en condiciones reales de aplicación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. Materiales y métodos.

Para el estudio de aditivos funcionales encapsulados, se emplearon 2 arcillas comerciales: Sepigel® (SEP) y Bentolit Super (BNT), junto a cuatro aceites esenciales (orégano, *Mentha arvensis*, canela y clavo) y ácido cítrico que actúa como retardante de liberación. Los procesos de síntesis necesitaron de amasador (Kenwood Kmix 750BK de 2,5 L), estufa (DryBig de P-Selecta 2002972), molinos de cuchillas (Pulverisette 11-Retsch) y ultracentrífugo (Retsch ZM300, luz de malla 200µm) y tamizadora automática (AS200 digit de Retsch). La caracterización de los productos comprendió técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX) para la composición elemental, SSA por BET, análisis termogravimétrico (TGA) para la estabilidad térmica, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR-ATR) para el análisis estructural, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido (FE-SEM) y de transmisión (TEM) para la caracterización morfológica y estructural y cromatografía de gases (GC-MS) para la composición de los aceites. Además, se evaluó la estabilidad de los aditivos en suspensión acuosa mediante turbidimetría, y se realizó un estudio de vida útil de fresa, mediante colorimetría CIELAB, índice de marrón, refractometría (°Brix), pH, contenido de humedad y textura, usando protocolos definidos en la literatura [6].

2.2. Obtención de los materiales activos.

La síntesis de arcillas funcionalizadas con aceite esencial se realizó mediante un proceso reproducible y controlado en condiciones semi-húmedas. Se mezclaron 1,5 kg de arcilla seca (80 °C durante 12 h) con 300 g de aceite esencial (20 % p/p) durante 5 min en un molino de cuchillas, seguido de una etapa de gestación a 60 °C durante 12 h en contenedor cerrado para optimizar la adsorción superficial. Posteriormente, la masa se homogeneizó en la amasadora con 77 g de ácido cítrico (5 % p/p) disueltos en 1,15 L de agua, incorporando la disolución de forma gradual bajo agitación continua. La masa obtenida se secó a 80 °C durante 4 h y posterior reposo a temperatura ambiente durante la noche. Finalmente, el material se micronizó y se tamizó (<63 µm). Se obtuvieron 1,43 kg (rendimiento del 93%)

de un polvo fino, estable y con encapsulación eficiente del aceite esencial para liberación controlada como muestra la Figura 1.

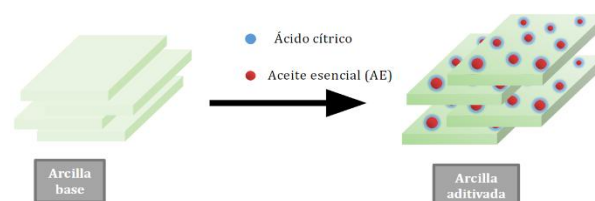


Figura 1. Esquema visual del producto sintetizado.

A continuación, se llevó a cabo la caracterización de las arcillas aditivadas utilizando diversas técnicas analíticas para evaluar su composición química, propiedades térmicas y morfológicas.

2.3. Ensayos funcionales.

Se estudió el envejecimiento del material expuesto al aire en dos condiciones: temperatura ambiente (22 °C) y refrigeración (4 °C), cuantificando la pérdida del aceite por TGA. Se dispusieron 2 g de cada muestra en placas de Petri, monitoreando la pérdida de masa en el rango 100-300 °C a intervalos temporales entre 0 y 52 días.

Se evaluó la estabilidad de las suspensiones acuosas de las arcillas SEP-Menta y BNT-Menta al 0,1% en peso en agua destilada mediante turbidimetría con un analizador Turbiscan-Lab durante 24 h, evaluando la transmitancia como indicador de sedimentación y homogeneidad, clave para manejo y aplicación en formulaciones líquidas.

Finalmente, se realizó un ensayo de vida útil en fresas postcosecha divididas en tres grupos experimentales (A: sin tratamiento, B: tratadas con arcilla base y C: tratadas con arcilla con aceite esencial), aplicando tratamientos de inmersión, espolvoreado y rociado con spray. Se evaluaron parámetros fisicoquímicos y organolépticos cada 3-4 días durante 14 días: pérdida de masa, aspecto visual, índice de marrón, firmeza, acidez, humedad y contenido en azúcares (°Brix).

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1. Caracterización de los materiales activos.

La caracterización físico-química de las arcillas revela diferencias significativas entre las dos muestras, especialmente en el contenido de MgO, siendo mayor en Sepigel®, que también presentó una SSA siete veces superior a la de Bentolit Super. Estos parámetros son fundamentales para la capacidad de encapsulación de aceites esenciales.

El TGA permitió evaluar la cantidad de aceite esencial presente en las arcillas aditivadas y su estabilidad térmica. En la Figura 2 se puede observar que el aceite esencial de orégano puro se evapora completamente a 100 °C, mientras que cuando está encapsulado en arcillas, la estabilidad térmica aumenta, alcanzando una evaporación completa a 220 °C. Además, la mayor adsorción del aceite en SEP en comparación con BNT fue

atribuida a su mayor superficie específica. Diferentes aceites (menta, canela y clavo) mostraron variaciones en las pérdidas de masa y temperaturas máximas de degradación, derivadas de su composición química e interacción con la superficie arcillosa.

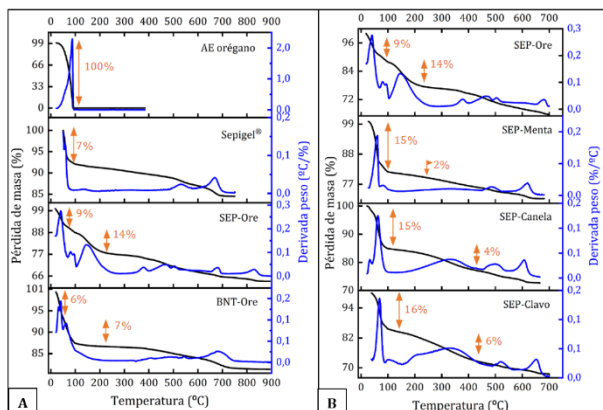


Figura 2. Perfil de pérdida de masa y su derivada de las muestras: AE orégano, Sepigel, SEP-Ore y BNT-Ore (A) y SEP-Ore, SEP-Menta, SEP-Canela y SEP-Clavo (B).

La morfología y distribución de partículas se analizaron por microscopía óptica, observándose estructuras laminares propias de Sepigel® con aglomerados de hasta 50 μm , y una posible migración parcial del aceite durante la preparación de la suspensión acuosa. Estudios más detallados mediante SEM y TEM (Figura 3) revelaron una mayor aglomeración y rugosidad en las arcillas aditivadas, además de presencia de nano-gotas con tamaño hasta 100 nm, asociadas al aceite esencial depositado en espacios interlaminares. Fue corroborado por análisis de dispersión energética (EDS) que mostró mayor contenido de carbono en dichas regiones.

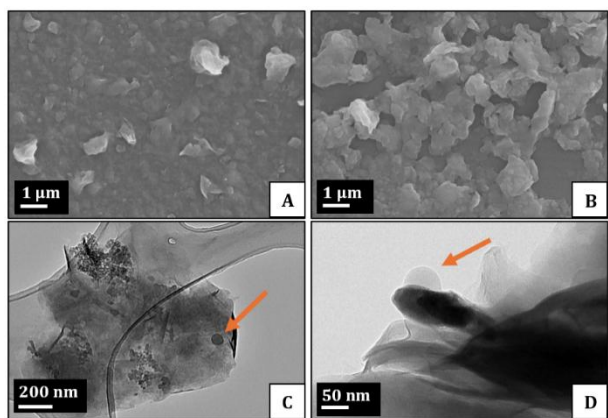


Figura 3. Micrografías SEM de las muestras SEP puro (A) y SEP-Clavo (B) y TEM de SEP-Clavo (C, D).

Mediante FTIR-ATR se confirmó la presencia de aceites esenciales en las arcillas, identificando bandas características de los compuestos mayoritarios de cada aceite. En la Figura 4 se muestra el espectro FTIR de la arcilla sintetizada en el rango 1800-1100 cm^{-1} . Se pueden observar las bandas correspondientes a la deformación del grupo metileno (1454 y 1367 cm^{-1}) y la vibración del enlace C-O, perteneciente al grupo carbonilo a 1708 cm^{-1} [7]. Esta vibración se desplaza a 1680 cm^{-1} en el espectro de la muestra SEP-Menta, sugiriendo una

posible interacción entre los grupos polares del aceite con la superficie hidrófila de la arcilla.

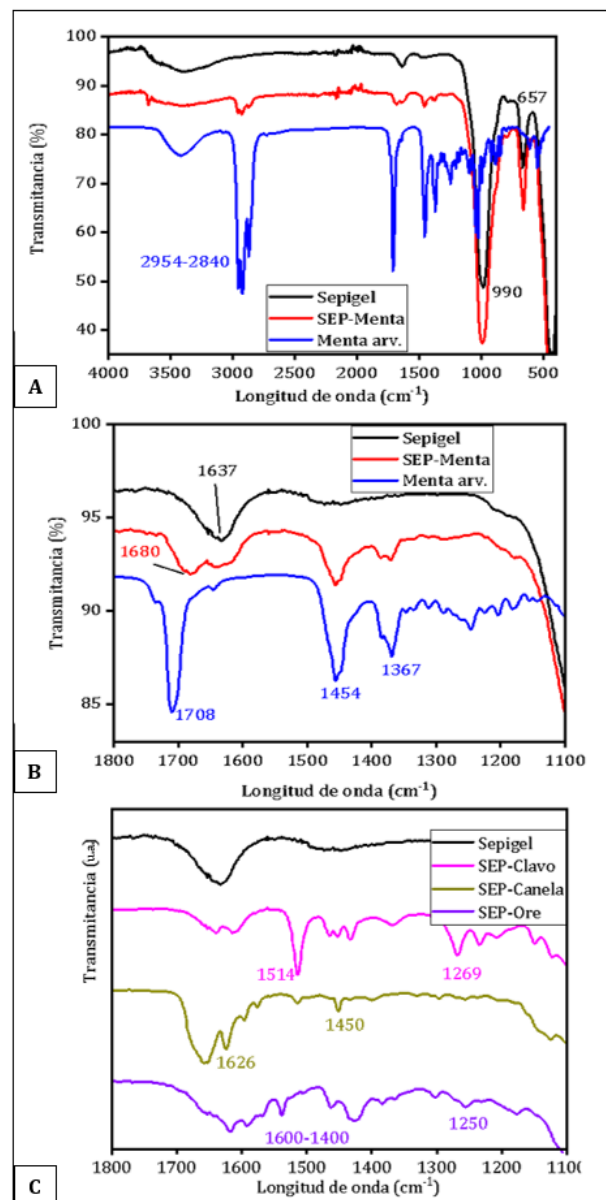


Figura 4. Espectros FTIR de las muestras: A) SEP, SEP-Menta y AE *Mentha arvensis* en el rango de 4000-400 cm^{-1} ; B) SEP, SEP-Menta y AE *Mentha arvensis* en el rango de 1800-1100 cm^{-1} ; C) SEP, SEP-Clavo, SEP-Canela y SEP-Ore en el rango de 1800-1100 cm^{-1} .

3.2. Ensayos funcionales.

Se evaluó la capacidad de las arcillas aditivadas con aceite esencial de *Mentha arvensis* en aplicaciones de conservación de fresas frescas. El envejecimiento de la muestra SEP-Menta mostró que la mayor volatilización del aceite esencial ocurre durante los primeros días de exposición, con una pérdida más marcada en condiciones ambientales (22 $^{\circ}\text{C}$), alcanzando el 35 % a los 30 días. En refrigeración (4 $^{\circ}\text{C}$), la evaporación fue menor (15 % después de 52 días), lo que evidencia la importancia de la temperatura sobre la retención del compuesto volátil. Cabe destacar que el aroma de *Mentha arvensis* permanece en la arcilla tras el periodo de evaluación, mientras que el aceite puro se evapora completamente en

pocas horas, resaltando la acción protectora de la matriz SEP-Menta.

Se midió el grado de turbidez de las suspensiones acuosas al 0,1% de arcilla aditivada durante 24h. La muestra SEP-Menta mostró mayor sedimentación y menor estabilidad coloidal, mientras que BNT-Menta evidenció una dispersión homogénea y baja sedimentación. Ello se atribuye a las diferencias mineralógicas: la bentonita presentó estructura más expandible y mayor capacidad de hidratación, favoreciendo la estabilidad en medio líquido.

Se escogió la arcilla BNT-Menta para un estudio de vida útil por inmersión, espolvoreado y rociado. Los resultados de espolvoreado indicaron que el tratamiento con arcilla aditivada (C) permitió que un 27 % de los frutos se conservaran mejor estado visual al día 14 (Figura 5), frente al 5 % y 4 % observados en los grupos control y bentonita base, respectivamente. También se obtuvo menor proporción de frutos en estado avanzado de deterioro (45 % en C, frente a 70 % en control y 58 % en bentonita base).

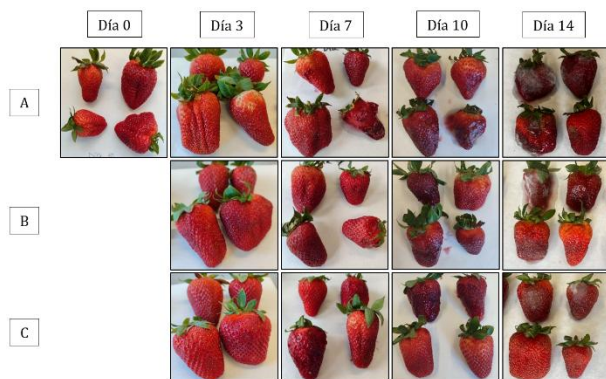


Figura 5. Imágenes del aspecto de las fresas tratadas mediante espolvoreado tras 0, 3, 7, 10 y 14 días.

Los parámetros fisicoquímicos (índice de marrón, firmeza, pH, acidez, humedad y sólidos solubles) no mostraron diferencias significativas por la alta variabilidad y superposición de intervalos de confianza. La pérdida de masa tras 14 días fue inferior en el grupo tratado con BNT-Menta (16%) frente a BNT base (18%) y al grupo control (21%), lo que sugiere capacidad higroscópica y barrera física que reduce la deshidratación. La acción sinérgica del aceite esencial, con propiedades antimicrobianas y antioxidantes, junto con la arcilla favorece la protección del tejido vegetal y limita el desarrollo de patógenos responsables del deterioro.

El método por rociado mostró que, tras 10 días de conservación, el 57% de las fresas tratadas conservaron buen estado, frente a sólo el 14% del grupo sin tratamiento, confirmando la eficacia del sistema frente a la pérdida de calidad visual y estructural (Figura 6).

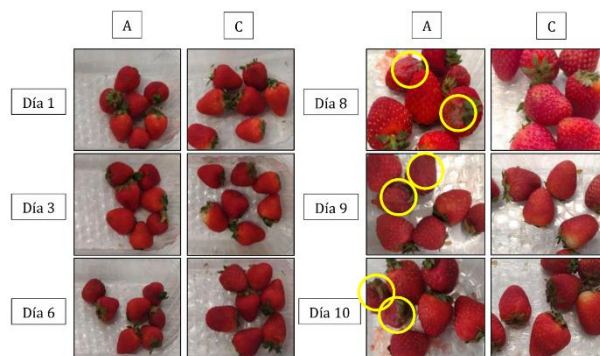


Figura 6. Imágenes del aspecto de las fresas tratadas mediante rociado por spray tras 1, 3, 6, 8, 9 y 10 días.

4. CONCLUSIONES.

Los sistemas arcilla/aceite esencial desarrollados en este trabajo funcionan como aditivos funcionales alternativos a los fitosanitarios convencionales. La síntesis por amasado es un proceso fácilmente escalable que garantiza una incorporación eficaz del aceite esencial en la matriz arcillosa. Su almacenamiento es más eficaz en condiciones de refrigeración y la estabilidad de la suspensión acuosa depende del tipo de arcilla, lo que puede optimizar futuras formulaciones.

Los ensayos postcosecha en fresas, tratadas mediante rociado y espolvoreado, mostraron reducción del deterioro visual y un aumento en la duración de conservación respecto a los controles. Estos sistemas proponen una solución sostenible y eficaz para prolongar la vida útil de frutas tras la cosecha. Sin embargo, para su escalado industrial es necesario seguir ajustando la aplicación según variables, además de validar su eficacia en diferentes cultivos y contextos industriales.

5. REFERENCIAS.

- [1] Consejo Europeo, 2020. De la granja a la mesa.
- [2] Hashemi et al., 2017. Antioxidant Activity of Essential Oils in Foods, Essential Oils in Food Processing: Chemistry, Safety and Applications.
- [3] Xu et al., 2024. The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent Advances, and perspectives. Food Chemistry: X 21.
- [4] Saucedo-Zuñiga et al., 2021. Controlled release of essential oils using laminar nanoclay and porous halloysite / essential oil composites in a multilayer film reservoir. Microporous and Mesoporous Materials 316.
- [5] Kalembe et al., 2020. Agrobiological Interactions of Essential Oils of Two Menthol Mints: Mentha piperita and Mentha arvensis. Molecules 25, 59.
- [6] Sani et al., 2025. Improving Strawberry Shelf Life Using Chitosan and Zinc Oxide Nanoparticles from Ginger-Garlic Extracts. Applied Food Research.
- [7] Jayasekher et al., 2024. Authentication of Mentha arvensis essential oil using attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectrophotometry coupled with chemometrics. Journal of Food Composition and Analysis 135.