

# Descontaminación mediante ozono gaseoso de la torta de cacao natural

Limitaciones mecánísticas, validación microbiológica, calidad oxidativa y marco de investigación industrial con resolución espacial

José M. López, Director de Investigación

## Resumen

La torta de cacao natural es un producto intermedio compacto y heterogéneo obtenido al extraer manteca de cacao de la pasta de cacao. Su posición en el proceso, antes de la molienda para obtener polvo, la convierte en candidata para una intervención antimicrobiana específica. El ozono gaseoso ( $O_3$ ) es un potente oxidante, pero su actividad antimicrobiana observada en otros alimentos de baja humedad no puede extrapolarse directamente a la torta de cacao. Las principales barreras son el acceso limitado del gas, su rápido consumo por reacción con la matriz, la distribución no uniforme de los microorganismos y las posibles alteraciones oxidativas de lípidos, polifenoles y compuestos volátiles. Esta revisión distingue críticamente la evidencia establecida de las hipótesis específicas propuestas para el cacao y desarrolla un marco de validación espacial que relaciona la geometría de los fragmentos, la exposición local al ozono, la letalidad microbiana y las restricciones de calidad del producto. La secuencia propuesta comprende prensado, fragmentación controlada, contacto con ozono, eliminación del ozono residual y molienda higiénica. Se presenta un plan escalonado de cribado y validación confirmatoria. La evidencia disponible justifica su investigación, pero no permite establecer un proceso de inactivación mediante ozono universalmente validado para torta de cacao. Su aplicación comercial exige ensayos de desafío específicos de la matriz, controles de calidad, diseño higiénico industrial y evaluación regulatoria según la jurisdicción.

**PALABRAS CLAVE:** *Torta de cacao; ozono; reacción gas-sólido; alimentos de baja humedad; Salmonella; cacao en polvo; validación de procesos; calidad oxidativa.*

## 1 Introducción

La fabricación de cacao en polvo suele comprender el tostado u otra etapa previa de reducción microbiana, la obtención de pasta de cacao, el prensado hidráulico, la fragmentación de la torta, la molienda final y el envasado. La torta formada tras el prensado es un sólido intermedio cuya porosidad, distribución de grasa, actividad de agua e historial mecánico varían entre lotes y posiciones espaciales. Un estudio industrial de distribución ha demostrado heterogeneidad radial en el contenido graso de las tortas prensadas [1]. Cuando se aplica un gas reactivo a un material de estas características, no puede suponerse que la concentración superficial equivalga a la exposición en el núcleo.

El objetivo de este artículo es examinar si el ozono, aplicado a fragmentos de tamaño controlado antes de la micronización, podría proporcionar un tratamiento microbiológicamente útil sin alterar las propiedades químicas y sensoriales definitorias del cacao natural. Se trata de una hipótesis de ingeniería, no de una afirmación de superioridad del ozono frente a intervenciones térmicas consolidadas.

## 2 Estructura de la torta de cacao y peligro microbiológico

### 2.1 Historial de procesado y heterogeneidad física

El sólido prensado contiene componentes no grasos del cacao y manteca residual en una red consolidada mecánicamente. La temperatura de prensado, el perfil de presión, las propiedades de la pasta, el enfriamiento y la fragmentación determinan la geometría de las vías accesibles. Una microestructura porosa no es necesariamente permeable al gas: los poros cerrados, los huecos ocupados por grasa y las regiones limitadas por difusión pueden restringir el transporte. Un estudio físicamente fundamentado debe caracterizar el tamaño de los fragmentos, las densidades aparente y esquelética, la distribución de grasa residual, la humedad, la actividad de agua y la estructura porosa accesible.

### 2.2 Relevancia microbiológica

Una actividad de agua baja inhibe el crecimiento de numerosos microorganismos, pero no necesariamente los elimina. En particular, *Salmonella* puede persistir durante períodos prolongados en ingredientes secos y mostrar mayor resistencia frente a determinados factores de estrés [2,3]. Las enterobacterias y los recuentos de aerobios totales son indicadores útiles del proceso, pero ninguno constituye un sustituto fiable de la medición de la inactivación de patógenos. Las esporas bacterianas y los propágulos fúngicos plantean problemas de susceptibilidad diferentes. La inactivación de hongos tampoco demuestra la degradación ni la detoxificación de micotoxinas preexistentes.

## 3 Estado de la evidencia experimental

Un estudio de 2026 de Khattri y colaboradores [4] aplicó aproximadamente 900–930 ppm de ozono gaseoso, con una humedad relativa del 90 %, durante períodos de hasta cinco horas a cuatro alimentos de baja humedad inoculados artificialmente, y comunicó reducciones de *Salmonella* muy dependientes de la matriz. Los resultados advierten de los riesgos de trasladar protocolos de tratamiento entre ingredientes.

| Matriz estudiada en [4] | Reducción tras 5 h  |
|-------------------------|---------------------|
| Albahaca seca           | 5,0 ± 0,6 log UFC/g |
| Pimienta negra en grano | 2,4 ± 0,2 log UFC/g |
| Nueces                  | 1,7 ± 0,3 log UFC/g |
| Semillas de chía        | 1,1 ± 0,0 log UFC/g |

Estos valores son resultados publicados para las matrices y condiciones indicadas, no estimaciones aplicables a la torta de cacao. En el mismo estudio, *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 solo resultó adecuado como microorganismo subrogado en el sistema de albahaca seca. Un estudio posterior de 2026 examinó con mayor detalle la influencia de la humedad relativa en la albahaca [5]. Por tanto, no debe suponerse que un microorganismo subrogado aceptado para tratamientos térmicos, ni siquiera para ozono en otro alimento, sea adecuado para torta de cacao.

La bibliografía física directamente pertinente al cacao documenta la heterogeneidad grasa de la torta [1], mientras que las referencias citadas no aportan datos suficientemente amplios de ensayos de desafío con ozono sobre torta de cacao prensada. Esta distinción es esencial para el alcance de las afirmaciones científicas del presente artículo.

## 4 Por qué la fragmentación es la principal variable de proceso

Para un cubo ideal de lado  $L$ , la relación geométrica entre superficie expuesta y volumen es  $A/V = 6/L$ . Dividir una torta en fragmentos más pequeños aumenta la superficie externa disponible y reduce la distancia máxima desde una posición interior hasta una superficie expuesta. Ninguna de estas modificaciones garantiza una inactivación microbiana proporcional. La distribución del tamaño de los fragmentos también influye en el arrastre de partículas, la cohesión, la pérdida de carga, la abrasión, la gestión del riesgo de explosión y la manipulación posterior. En consecuencia, el óptimo podría encontrarse en un tamaño intermedio, no en el polvo más fino alcanzable.



Controles críticos: tamaño de fragmento · exposición efectiva · humedad · demanda oxidativa · recontaminación

**Figura 1. Ubicación propuesta del tratamiento y principales puntos de control. Diagrama conceptual de ingeniería; no representa un proceso validado experimentalmente.**

## 5 Transporte, demanda química y exposición local al ozono

El ozono reacciona fácilmente con componentes oxidables de las matrices biológicas y alimentarias. El gas que entra en un reactor industrial puede consumirse por pérdidas en las paredes, reacciones con la matriz y descomposición en fase gaseosa antes de penetrar en un fragmento. Por ello, la concentración medida en el generador, la entrada o la cámara no coincide necesariamente con la experimentada en los lugares donde se encuentran los microorganismos.

Un modelo preliminar de medio efectivo para un dominio poroso representativo es  $\partial C/\partial t = \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \nabla C) - k_{\text{app}} C$ , donde  $C$  es la concentración local de ozono,  $D_{\text{eff}}$  un coeficiente de transporte efectivo y  $k_{\text{app}}$  una constante aparente de consumo por reacción. Se trata de una hipótesis ilustrativa; el transporte convectivo por los poros, las reacciones que no siguen una cinética de primer orden, la humedad variable y las condiciones de contorno cambiantes pueden exigir un modelo más complejo. El grupo adimensional  $\phi = L_c \sqrt{(k_{\text{app}}/D_{\text{eff}})}$ , análogo a un módulo de Thiele, permite explorar cuándo el consumo podría dominar la penetración interna.

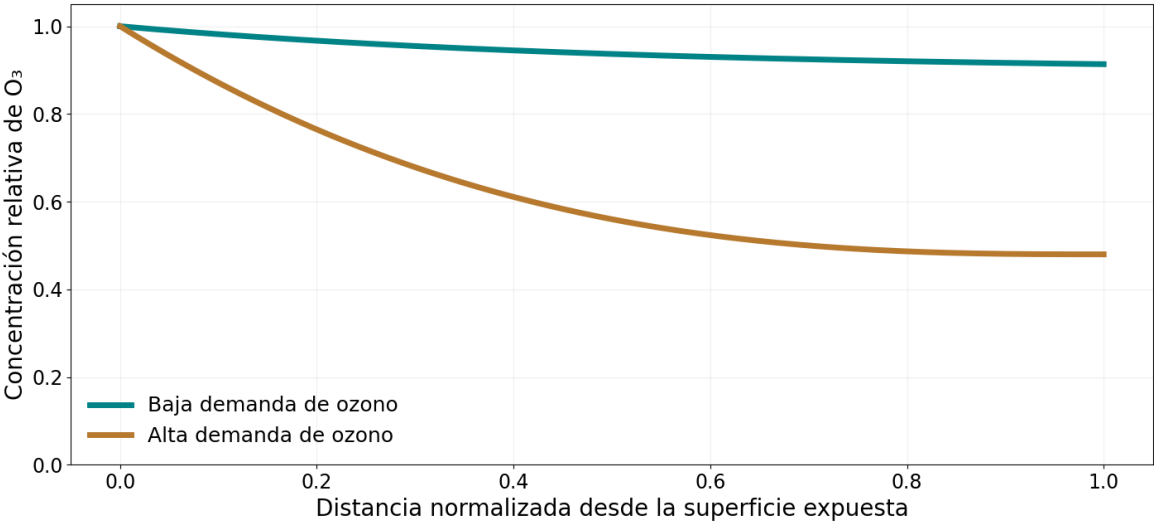


Figura 2. Perfiles ilustrativos de concentración normalizada obtenidos mediante una solución simplificada de reacción-difusión. Son curvas teóricas, no mediciones de penetración del ozono en torta de cacao.

La exposición local integrada  $E(x) = \int_0^t C(x,\tau)d\tau$  constituye un descriptor mecanístico más defendible que el producto de la concentración nominal por el tiempo transcurrido. La letalidad microbiana real debe ajustarse experimentalmente en función de la exposición, el microorganismo, la actividad de agua, la temperatura y la química de la matriz. No se propone ningún coeficiente universal que relacione exposición y reducción logarítmica.

6 Efectos del ozono sobre la calidad del cacao

Un proceso aceptable debe preservar la identidad y la comercialización del cacao natural no alcalinizado. El ozono puede oxidar grupos insaturados susceptibles presentes en la manteca de cacao residual y modificar determinados compuestos fenólicos o volátiles del aroma. Se desconoce la magnitud exacta de estas transformaciones en condiciones específicas de tratamiento de la torta y debe determinarse experimentalmente, en particular para variedades con mayor contenido graso.

| Ámbito de calidad             | Parámetro analítico recomendado                                                                        |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oxidación lipídica            | Índice de peróxidos, marcadores adecuados de oxidación secundaria y compuestos volátiles seleccionados |
| Color                         | CIELAB L*, a*, b* y ΔE respecto a controles equivalentes                                               |
| Perfil fenólico               | HPLC específico de catequina, epicatequina y flavanoles relevantes                                     |
| Aroma                         | HS-SPME–GC–MS y evaluación sensorial por un panel entrenado                                            |
| Comportamiento físico         | Humedad, actividad de agua, fluidez, granulometría y dispersabilidad                                   |
| Estabilidad en almacenamiento | Ensayos temporales frente a controles equivalentes sin tratar                                          |

Los cambios deben evaluarse tanto inmediatamente después del tratamiento como durante el almacenamiento. Por ejemplo, la ausencia de variaciones a corto plazo en los fenoles totales no descarta

alteraciones de especies fenólicas individuales. Asimismo, la reducción de los recuentos en cultivo no permite afirmar que un contaminante químico se haya eliminado o haya dejado de representar un riesgo.

## 7 Programa propuesto de validación experimental

### 7.1 Muestreo, comparaciones y controles

Recoger varios lotes industriales independientes con origen, historial de prensado y contenido graso documentados. Caracterizar inicialmente la microbiología, actividad de agua, humedad, marcadores de oxidación, color y aroma. Aleatorizar las unidades de ensayo dentro de cada lote, respetando la estructura jerárquica de lotes independientes, fragmentos y réplicas analíticas. Comparar torta compacta sin tratar, torta fragmentada sin tratar, torta compacta tratada, fragmentos gruesos tratados, fragmentos más finos sin micronizar tratados y, cuando proceda, polvo terminado tratado.

### 7.2 Cribado y medición de la dosis

Un diseño experimental escalonado debe explorar el tamaño característico de los fragmentos, la concentración de ozono a la entrada, el tiempo de contacto, la humedad relativa, la temperatura del producto, el caudal y la carga del lecho. Medir durante el proceso las concentraciones de ozono de entrada y salida y documentar las pérdidas, en lugar de deducir la dosis aplicada únicamente de la capacidad nominal del generador. Registrar la distribución de tiempos de residencia y comprobar la existencia de derivaciones del flujo o canalizaciones en el reactor. Solo cuando los datos iniciales permitan identificar efectos principales e interacciones se continuará con una optimización mediante superficies de respuesta.

### 7.3 Muestreo espacial y recuperación microbiana

Dividir fragmentos representativos en regiones externas, intermedias y centrales definidas previamente y cuantificar por separado los microorganismos viables recuperados. Los procedimientos de preparación de muestras espaciales deben evitar la contaminación cruzada. Los ensayos confirmatorios deben medir el estado microbiológico del polvo obtenido mediante molienda higiénica posterior. Para la cualificación de seguridad debe considerarse la reducción logarítmica regional mínima demostrada de forma fiable, no únicamente la reducción media superficial.

Cualquier ensayo de desafío con *Salmonella* requiere instalaciones de contención y experiencia adecuadas; un microorganismo subrogado industrial debe validarse específicamente frente al microorganismo diana, la matriz y las condiciones de ozonización. Los medios de recuperación deben tener en cuenta la posible presencia de células con daños subletales. Un resultado por debajo del límite de detección analítico constituye información censurada, no una demostración de esterilidad.

### 7.4 Criterios de aceptación e incertidumbre

Definir previamente el objetivo de reducción del patógeno a partir del análisis de peligros de seguridad alimentaria y del uso posterior previsto. Establecer por separado umbrales de diferencias sensoriales, oxidación lipídica, color, humedad y aptitud para el procesado pertinentes para el cliente. Estimar tamaños de efecto e intervalos de confianza entre lotes independientes. Una ventana operativa viable requiere satisfacer simultáneamente los criterios de letalidad microbiana, calidad química, seguridad laboral y economía; incumplir cualquier criterio crítico invalida la condición operativa propuesta.

## 8 Marco propuesto de validación espacial

Sea  $R(x)$  una reducción logarítmica local y  $E(x)$  la exposición local integrada. Una respuesta empírica  $R(x) = f[E(x), a_w, T, \text{fracción grasa}, \text{microorganismo}]$  solo puede calibrarse tras ensayos de desafío controlados. Una región viable sujeta a restricciones de calidad puede expresarse como  $\Omega = \{z : \min_x R(x,z) \geq R_{\text{objetivo}} \text{ y } Q_i(z) \leq Q_{i,\text{límite}} \text{ para cada variable crítica de calidad } i\}$ , donde  $z$  contiene las variables operativas del equipo. La optimización es conceptualmente original al combinar la letalidad espacial mínima con múltiples restricciones de calidad; no constituye un método regulatorio validado.

Este marco exige tres conjuntos complementarios de datos: (i) balance de materia y distribución a escala de reactor, (ii) supervivencia espacial a escala de fragmento y (iii) calidad y microbiología del polvo terminado. La concordancia entre estos conjuntos resulta más informativa que un resultado favorable aislado de recuento superficial.

## 9 Ingeniería industrial y controles de seguridad laboral

Entre las opciones de reactor figuran lechos agitados cerrados, lechos móviles y, cuando lo permita el comportamiento del polvo, sistemas fluidizados. La selección debe basarse en la caracterización del flujo de partículas, el análisis de tiempos de residencia y la validación de la limpieza. La exposición al ozono exige contención monitorizada, materiales constructivos adecuados, destrucción del gas de salida, enclavamientos de acceso y protección de los trabajadores. La fragmentación y la molienda pueden generar polvo orgánico combustible; cuando proceda, serán necesarias una evaluación ATEX y medidas de control de fuentes de ignición. Las atmósferas de alimentación enriquecidas con oxígeno requieren un examen adicional. La separación higiénica tras el tratamiento es esencial porque la molienda y el envasado posteriores pueden reintroducir contaminación.

## 10 Evaluación regulatoria europea

El cumplimiento de los Reglamentos (CE) n.º 178/2002 y 852/2004 es fundamental, pero no demuestra por sí mismo que esté autorizado aplicar ozono directamente al cacao. Debe resolverse para la operación prevista la distinción entre el uso como coadyuvante tecnológico, la desinfección biocida y otras funciones tecnológicas. En España, el texto consolidado del Real Decreto 773/2023 sobre coadyuvantes tecnológicos [9] exige una evaluación específica del uso; las normas sobre coadyuvantes no están plenamente armonizadas en toda la Unión Europea. El hecho de que el ozono se descomponga no demuestra por sí solo ni la licitud de su empleo ni la ausencia toxicológica de subproductos de oxidación.

El Reglamento (UE) 2023/915 establece contenidos máximos pertinentes para determinados contaminantes. El ozono no debe presentarse como sustituto del control previo de ocratoxina A, cadmio u otros contaminantes. El cacao ecológico requiere un análisis independiente conforme al Reglamento (UE) 2018/848 y la legislación de desarrollo aplicable. La conformidad regulatoria y la validación industrial deben preceder a cualquier alegación comercial relativa al tratamiento.

## 11 Viabilidad industrial y alternativas

El análisis de viabilidad económica debe comprender los costes del generador y del suministro de oxígeno, la monitorización del gas, la destrucción del ozono, la manipulación y fragmentación, el volumen del reactor, la capacidad de producción y el tiempo de permanencia, la cualificación analítica, las pérdidas de producto y el mantenimiento. La referencia de comparación debe ser un proceso industrial debidamente validado, como un tratamiento con vapor u otra intervención térmica adecuada, que cumpla el mismo objetivo microbiológico y los mismos requisitos de calidad. No deben atribuirse al ozono ventajas supuestas en consumo energético, conservación de la calidad o coste mientras no existan datos industriales comparables.

## 12 Limitaciones, conclusiones y prioridades de investigación

La eficacia del ozono gaseoso en alimentos de baja humedad está respaldada por datos, pero depende intensamente de la matriz. Las pruebas directas, suficientemente controladas y reproducibles de inactivación microbiana en toda la profundidad de la torta de cacao natural siguen siendo insuficientes para prescribir un proceso estándar. La hipótesis central es que tratar fragmentos controlados entre el prensado y la molienda podría mejorar el acceso del gas y evitar ciertas desventajas del procesamiento de polvo fino. Esta hipótesis exige ensayos de desafío con resolución espacial, balances de ozono a escala de reactor y evaluación simultánea de la calidad oxidativa.

La prioridad principal de investigación consiste en determinar si existe una región operativa en la que la reducción local mínima del patógeno alcance un objetivo predefinido y la calidad del cacao natural siga siendo comercialmente aceptable. Sin esa demostración, la tecnología debe considerarse experimental, no una etapa consolidada de higienización de la torta de cacao.

## Referencias

- [1] Melo LJ, Orjuela A, Guerrero E. Improvement of industrial processes in Colombia. Case study: Cocoa pressing process in a chocolate factory. *Chem Eng Res Des.* 2022;183:307–317. doi:10.1016/j.cherd.2022.05.013.
- [2] Beuchat LR, et al. Low-water activity foods: increased concern as vehicles of foodborne pathogens. *J Food Prot.* 2013;76:150–172. doi:10.4315/0362-028X.JFP-12-211.
- [3] Methods for the Control of Foodborne Pathogens in Low-Moisture Foods. *Annu Rev Food Sci Technol.* 2018. doi:10.1146/annurev-food-030117-012304.
- [4] Khattra AK, Wason S, Gowda NAN, Lafontaine S, Subbiah J, Acuff JC. Impacts of gaseous ozone and mild heating treatments on the inactivation of *Salmonella enterica* and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 and on the quality of low-moisture food products. *J Food Prot.* 2026;89(5):100750. doi:10.1016/j.jfp.2026.100750.
- [5] Khattra AK, et al. Increasing relative humidity enhances gaseous ozone efficacy for inactivation of *Salmonella enterica* and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 on dried basil leaves. *LWT.* 2026;253:119717. doi:10.1016/j.lwt.2026.119717.
- [6] Reglamento (CE) n.º 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo (legislación alimentaria general). EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj>
- [7] Reglamento (CE) n.º 852/2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios. EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2004/852/oj>
- [8] Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos. EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj>
- [9] España. Real Decreto 773/2023, de 3 de octubre, por el que se regulan los coadyuvantes tecnológicos utilizados en los procesos de elaboración y obtención de alimentos (texto consolidado). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2023-20563>
- [10] Reglamento (UE) 2018/848 sobre producción ecológica y etiquetado de los productos ecológicos. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj>
- [11] Directiva 2014/34/UE sobre aparatos y sistemas de protección para uso en atmósferas potencialmente explosivas. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj>

## Declaración editorial

**Tipo de artículo:** revisión científico-técnica crítica y propuesta metodológica. Las figuras son originales y conceptuales.

© 2026 José M. López / INTABIOTECH Knowledge Center. Todos los derechos reservados.