

## MODELADO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR E ÍNDICES DE CALIDAD DURANTE EL ESCALDADO CONVENCIONAL Y ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE CHAMPIÑONES

Alejandro R. Lespinard<sup>a,b</sup>, José Bon<sup>c</sup>, Juan A. Cárcel<sup>c</sup>, José Benedito<sup>c</sup>, Rodolfo H. Mascheroni<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA), CONICET La Plata - Universidad Nacional de La Plata, 47 y 116, (B1900AJJ), La Plata, Argentina, [alespinard@cidca.org.ar](mailto:alespinard@cidca.org.ar), <http://www.cidca.org.ar>

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, 60 y 119, (1900), La Plata, Argentina, <http://www.agro.unlp.edu.ar>

<sup>c</sup>Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, (46022), Valencia, España, <http://www.aspa.upv.es>

<sup>d</sup>MODIAL – Depto. Ing. Química – Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, Argentina.

**Palabras Clave:** Escaldado, Ultrasonidos, Hongos, Simulación, Transferencia de Calor, Índices de Calidad

**Resumen.** En la industria de los alimentos, el uso de ultrasonidos (US) en combinación con procesos convencionales ofrece nuevas posibilidades para la mejora de los procesos de alimentos, que van desde el ahorro de energía a aumentos en el rendimiento del proceso o la calidad del producto; en este sentido ha demostrado ser una tecnología emergente que permite mejorar la transferencia de calor y materia. No obstante, aún es necesario realizar estudios concretos para los diferentes procesos y/o productos que permitan evaluar y cuantificar las mencionadas ventajas. En base a lo anterior, se propone como objetivo de este trabajo evaluar la influencia de la aplicación de US durante el escaldado de champiñones sobre la transferencia de calor y sobre algunos índices de calidad. Para ello se desarrolló un modelo matemático que predice la evolución y distribución de la temperatura en el champiñón durante el escaldado convencional y asistido por US a diferentes temperaturas. Para la construcción del modelo se determinaron experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor y las cinéticas de contracción de las muestras durante dichos procesos. El modelo fue resuelto por medio del Método de Elementos Finitos (MEF) empleando el software COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics en su versión 3.5. Dicho modelo fue a su vez acoplado a cinéticas de variación de la calidad sensorial y de actividad enzimática. De esta manera la resolución numérica del modelo y la aplicación de la simulación computacional permitieron un análisis comparativo de ambos procesos, y el establecimiento de las condiciones óptimas de procesamiento.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los hongos son productos altamente perecederos y su deterioro comienza inmediatamente después de su cosecha (Kotwaliwale et al., 2006). Reacciones de pardeamiento en hongos disminuyen su vida útil a unos pocos días, siendo la enzima polifenol oxidasa (PFO) la principal responsable de este fenómeno de deterioro. Debido a esto, los hongos frescos deben ser inmediatamente procesados para extender su período de aptitud comercial (Devece et al., 1999). Para este fin, los procesos usualmente aplicados son de congelación, esterilización y deshidratación. Sin embargo, previo a dichos procesos los hongos deben ser escaldados con el objeto de (i) reducir el pardeamiento enzimático por inactivación térmica de la PFO y (ii) inducir la contracción de tamaño evitando que ocurra durante la esterilización (Biekman et al., 1997). Durante el escaldado se producen también fenómenos de deterioro sobre las propiedades sensoriales, como textura y color, siendo estos los principales atributos de calidad considerados por el consumidor (Kotwaliwale et al., 2006). Debido a esto, la minimización de dichas pérdidas representa uno de los principales objetivos a tener en cuenta en el diseño y optimización del proceso de escaldado. En este sentido, el uso de ultrasonidos (US) en combinación con procesos convencionales ofrece nuevas posibilidades para la mejora de los procesos de alimentos, que van desde el ahorro de energía a aumentos en el rendimiento del proceso o la calidad del producto; y ha demostrado ser una tecnología emergente que permite mejorar la transferencia de calor y materia. No obstante, aún es necesario realizar estudios concretos para los diferentes procesos y/o productos que permitan evaluar y cuantificar las mencionadas ventajas.

En base a lo anterior se plantea como objetivo central de este trabajo desarrollar un modelo matemático que permita evaluar la influencia de la aplicación de US durante el escaldado de champiñones sobre la transferencia de calor e índices de calidad y establecer condiciones óptimas de procesamiento.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Muestras

Los champiñones (*Agaricus bisporus*) fueron adquiridos en un mercado local de Valencia (España) y mantenidos refrigerados (a 4°C durante menos de 24 h) hasta su empleo. Los hongos fueron seleccionados teniendo en cuenta similitud de tamaño y luego lavados con agua a temperatura ambiente para eliminar cualquier material que pudiera estar adherido a su superficie.

### 2.2 Procesamiento térmico

Las muestras fueron sometidas a dos procesos térmicos: escaldado convencional (EC) y escaldado asistido por ultrasonidos (EUS). En el EC los champiñones se colocaron en un soporte y se introdujeron en un baño de agua termostaticado. Los procesos de escaldado fueron llevados a cabo a diferentes temperaturas (60, 70, 80 y 90°C) y los tiempos de procesamiento fueron estimados para alcanzar una contracción de tamaño del 18 %, de acuerdo a lo sugerido por Lespinard et al. (2009). Finalizado el proceso, las muestras fueron retiradas del baño y colocadas en un mezcla agua-hielo durante 2 min. Posteriormente, las mismas fueron drenadas y secadas con papel absorbente para eliminar el exceso de agua.

En el EUS las muestras fueron escaldadas en condiciones similares al EC (60, 70, 80 y 90°C y una contracción de tamaño del 18 %) pero con la aplicación de US a través de un sistema de sonda (UP400S, Hielscher Ultrasonics GmbH, Teltow, Alemania) funcionando a una potencia de 400W y una frecuencia de 25 kHz. La sonda (de 40 mm diámetro) fue

sumergida a 1 cm de profundidad en el baño termostatzado y colocada a 3 cm por encima de las muestras.

### 2.3 Determinación de la variación de tamaño

La variación del tamaño de los champiñones durante el escaldado fue determinada midiendo, con un calibre Vernier, su diámetro ( $d$ ) y altura ( $a$ ) inicial y a diferentes tiempos de procesamiento térmico. Para esto, a cada intervalo de tiempo, tres muestras fueron retiradas del baño y medidas. La variación experimental de  $d$  y  $a$  fue estudiada en su forma adimensional ( $D^*$ ) y regresionada a través de un modelo cinético de primer orden (Ecuación 1).

$$D^* = \frac{D_t - D_{eq}}{D_0 - D_{eq}} = \exp(-K_1 * t) \quad (1)$$

donde  $D_t$  es la dimensión característica ( $d$  ó  $a$ ) a un tiempo  $t$  (min);  $D_0$  es el valor inicial;  $D_{eq}$  es la dimensión de equilibrio (igual a  $0.77D_0$ , según lo determinado por [Lespinard et al., 2009](#)) y  $K_1$  es la constante de velocidad dependiente de la temperatura. Considerando que la contracción radial y longitudinal fueron similares, los valores de las constantes de velocidad fueron promediadas obteniéndose una constante de velocidad media ( $K_m$ ). La dependencia de  $K_m$  con la temperatura fue modelada a través de la relación de Arrhenius (Ecuación 2), donde  $K_{m0}$  es el factor pre-exponencial,  $Ea$  es la energía de activación,  $Rg$  es la constante universal de los gases ( $0.00831 \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), y  $T$  es la temperatura del baño de agua.

$$K_m = K_{m0} e^{-\frac{Ea}{RgT}} \quad (2)$$

### 2.4 Modelado de la transferencia de calor

Se desarrolló un modelo matemático que describe la transferencia de calor conductiva a través del hongo (Ecuación 3) con condiciones de contorno convectivas (Ecuación 4) y considerando una distribución uniforme de temperatura en el producto en el inicio de las experiencias (Ecuación 5).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) \quad (3)$$

$$k \nabla T = h (T_\infty - T) \quad (4)$$

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0 \quad (5)$$

La variación del tamaño del hongo fue acoplada al modelo de transferencia de calor a través de la Ecuación 1. Se consideró como condición de contorno para la deformación de la malla (contracción del tamaño) la velocidad de variación del tamaño obtenida por medio de la derivada de la dimensión característica con respecto al tiempo (Ecuación 6).

$$v_D = \frac{dD_t}{dt} = -K_1 (D_0 - D_{eq}) \exp(-K_1 t) \quad (6)$$

donde  $v_D$  es la velocidad de cambio de tamaño de la dimensión característica en la dirección  $D$ .

El modelo desarrollado fue resuelto por medio del método de elementos finitos (COMSOL™ Multiphysics, versión 3.5). El dominio de simulación fue discretizado por medio de una malla desestructurada formada por 2955 nodos y 13918 elementos tetraédricos (Figura 1). Dicha estructura de la malla fue determinada mediante un estudio de convergencia de la solución. Las propiedades termofísicas empleadas fueron las siguientes:  $C_p = 3883 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $k = 0.4324 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (Sastry et al., 1989). La densidad fue determinada experimentalmente midiendo la masa y el volumen inicial del hongo, obteniéndose un valor medio de  $699.4 \pm 20.5 \text{ kg m}^{-3}$ .

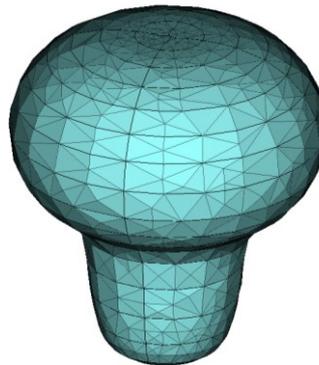


Figura 1: Dominio de simulación discretizado mediante una malla compuesta por 2955 nodos y 13918 elementos tetraédricos.

Para estimar experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) se empleó el Método de la Capacidad Calorífica Global “Lumped Capacitance Analysis”. Para esto se construyó un hongo de bronce de propiedades termofísicas conocidas ( $\rho = 8470 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $C_p = 376.81 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $k = 122.87 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Este material fue elegido debido a su alta difusividad térmica, la cual asegura que la resistencia a la conducción dentro del sólido sea despreciable comparada con la resistencia a la convección a través de la capa límite del fluido, y el Número de Biot ( $N_{Bi}$ ) sea menor a 0.1 (condición es necesaria para aplicar dicho método). De esta manera el coeficiente de transferencia de calor se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-\frac{hAt}{C_p \rho V}} \quad (7)$$

donde  $T$  representa la temperatura del hongo a un tiempo  $t$ ,  $T_0$  la temperatura inicial del hongo,  $T_{\infty}$  la temperatura del medio de calentamiento,  $A$  el área del hongo y  $V$  el volumen del hongo. El área y el volumen del hongo de bronce fueron calculados a partir de la reconstrucción digital de su geometría tridimensional mediante el procedimiento descrito por Lespinard et al. 2009.

El modelo desarrollado fue validado registrando la temperatura en el centro térmico del hongo (centro geométrico de la cabeza del champiñón) cada 15 s mediante termocuplas tipo K y un adquirente de datos multi-canal (HP Data Logger 34970 A, Hewlett-Packard Española, S.A., Madrid, España) y comparándolas con las temperaturas simuladas. Esas comparaciones fueron realizadas por medio del cálculo del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y de la diferencia relativa media ( $E_{r \text{ medio}}$ ) (Ecuación 8):

$$E_{r_{medio}} = \frac{100}{m} \sum_{i=1}^m \left\| \frac{T_s - T_e}{T_e} \right\| \quad (8)$$

## 2.5 Índices de calidad

### 2.5.1 Valor de cocción

El deterioro de la calidad sensorial de los hongos durante la aplicación del proceso térmico de escaldado fue cuantificado mediante el cálculo del valor de cocción medio ( $C_{medio}$ ). El mismo fue determinado por integración numérica de la Ecuación 9, empleando las temperaturas simuladas por el modelo. Para el cálculo se consideró una temperatura de referencia ( $T_{ref}$ ) de 100 °C y un valor  $z$  ( $z_c$ ) de 23°C, ambos correspondientes a la cinética de deterioro de parámetros de calidad en hongos (Ohlsson, 1980).

$$C_{medio} = \int_0^{t_p} \left( \frac{\int_{\Omega} 10^{\frac{T(t,\Omega) - T_{ref}}{z_c}} d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} \right) dt \quad (9)$$

### 2.5.2 Actividad enzimática de la polifenol oxidasa

Considerando que la actividad de la enzima polifenol oxidasa (PFO) es un factor limitante del tiempo de proceso y que además está estrechamente relacionada con los cambios de color de los champiñones, se estudió la influencia de la aplicación de ultrasonidos sobre este parámetro. Para esto, una cinética de inactivación térmica de la PFO fue acoplada al modelo de transferencia de calor para determinar la retención de la actividad enzimática en la superficie del hongo ( $AR_{sup}$ ). La actividad enzimática residual fue calculada de la siguiente manera:

$$AR_{sup}(\%) = \left( \frac{A_t}{A_0} \right) \cdot 100 = \frac{1}{\Gamma} \int_{\Gamma} 10^{\left[ -\frac{1}{D_{ref}} \int_0^t 10^{\frac{(t-T_{ref})/z_c}{}} dt \right]} d\Gamma \cdot 100 \quad (10)$$

donde  $A_0$  es la actividad inicial,  $A_t$  es la actividad residual al tiempo  $t$  y  $\Gamma$  es la superficie del hongo.  $D_{ref}$  es el tiempo (min) necesario para reducir el 90% de la actividad inicial y fue calculado mediante la Ecuación 11

$$D_{ref} = \frac{\ln(10)}{K} \quad (11)$$

donde  $K$  es la constante de velocidad de inactivación, la cual fue estimada mediante la ecuación de Arrhenius (Ecuación 12)

$$K = K_0 e^{-\frac{E_a}{RgT}} \quad (12)$$

siendo los parámetros cinéticos empleados en esta ecuación los obtenidos por Cheng et al. (2013) para la inactivación de PFO en champiñones durante el escaldado (Tabla 1).

Parámetros cinéticos	
Energía de activación ( $E_a$ ) (kJ mol <sup>-1</sup> )	214 ± 17
Factor de resistencia térmica ( $z_c$ )(°C)	10.3
Factor pre-exponencial ( $K_0$ ) (min <sup>-1</sup> )	2.43 10 <sup>32</sup>

Tabla 1: Parámetros cinéticos para la inactivación de PFO en champiñones *Agaricus bisporus* (Fuente: Cheng et al., 2013).

Con el objetivo de evaluar la actividad de la PFO durante todo el proceso de escaldado, se calculó la actividad residual integrada ( $ARI_{sup}$ ) en el tiempo de proceso ( $t_p$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$ARI_{sup} = \int_0^{t_p} \left( \frac{A_t}{A_0} \right) dt \quad (13)$$

## 2.6 Análisis estadístico

Los datos experimentales fueron analizados estadísticamente mediante análisis de variancia (ANOVA) empleando el software STATGRAPHICS Plus 4.0. (Manugistics Inc., USA). La significación de las diferencias entre los valores medios fue analizada mediante el test de Tukey. Los valores fueron considerados significativamente diferentes cuando  $p < 0.05$ .

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Variación de tamaño y tiempos de proceso

La Figura 2 presenta la evolución del tamaño adimensional de los champiñones durante los procesos de EC y EUS para las diferentes temperaturas. En dicha figura se puede observar una rápida contracción del tamaño del hongo al inicio del calentamiento, haciéndose más lenta, hasta alcanzar un tamaño constante de equilibrio ( $D_{eq}$ ), a tiempos largos. Los resultados obtenidos también muestran que la velocidad de contracción del tamaño es dependiente de la temperatura del baño y de la aplicación de US. El aumento en la temperatura del medio de calentamiento produjo un aumento significativo en la velocidad de encogimiento. Por su parte, la aplicación de US resultó en un incremento en la velocidad de contracción del tamaño en el rango de temperaturas de escaldado de 60 a 80°C. Este incremento en la velocidad de reducción del tamaño puede ser atribuido a varios efectos producidos por la aplicación de US. Así, la generación de “microjets”, debidos al colapso asimétrico de las burbujas de cavitación cercanas a la superficie de los champiñones, podría favorecer la transferencia de calor y de materia. En este sentido, Sastry et al. (1989) encontraron que el coeficiente de transferencia de calor se duplica cuando el proceso de escaldado es asistido por ultrasonidos. Otro fenómeno, que también puede contribuir a la reducción del tamaño, son las sucesivas compresiones y descompresiones que producen la aplicación de ondas acústicas de alta intensidad sobre los hongos. Este mecanismo, conocido como “efecto esponja” (Gallego-Juárez et al., 2007),

podría acelerar el movimiento del agua hacia la superficie del hongo y además favorecer la desgasificación del mismo.

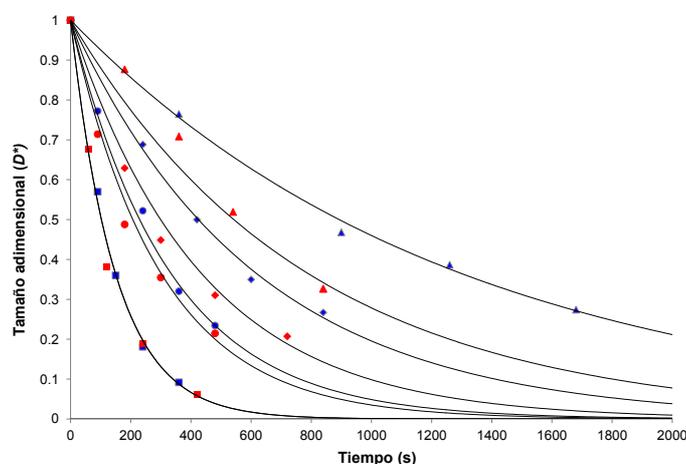


Figura 2: Variación del tamaño adimensional durante el escaldado: convencional ( $\blacktriangle$ ) 60°C, ( $\blacktriangledown$ ) 70°C, ( $\bullet$ ) 80°C, ( $\blacksquare$ ) 90°C y asistido por ultrasonidos ( $\blacktriangle$ ) 60°C, ( $\blacktriangledown$ ) 70°C, ( $\bullet$ ) 80°C, ( $\blacksquare$ ) 90°C.

Las diferencias de encogimiento entre el EC y el EUS resultaron ser mayores a temperaturas del medio de calentamiento bajas. Esta diferencia tendió a disminuir a medida que se incrementó la temperatura de procesamiento, no encontrándose diferencias significativas a 90°C. Esto podría explicarse debido a que el incremento de temperatura produce un aumento en la presión de vapor, haciendo que el fenómeno de cavitación y el colapso de las burbujas sea menos intenso (Sala et al., 1995).

Como puede observarse en la Figura 2, la dependencia del tamaño adimensional con el tiempo fue adecuadamente ajustada por el modelo cinético de primer orden (Ecuación 1). A través de este modelo, fue posible cuantificar el efecto de la temperatura y la aplicación de US sobre la variación de tamaño de las muestras. Los valores de  $K_m$ , energía de activación ( $E_a$ ) y factor pre-exponencial ( $K_{m0}$ ) son presentados en la Tabla 2.

Temperatura (°C)	Escaldado convencional $K_m$ (s <sup>-1</sup> ) x 10 <sup>3</sup>	Escaldado asistido por ultrasonidos $K_m$ (s <sup>-1</sup> ) x 10 <sup>3</sup>
50	0.10±0,01 <sup>a,A</sup>	0.30±0,03 <sup>a,B</sup>
60	0.78±0,17 <sup>b,A</sup>	1.28±0,22 <sup>b,B</sup>
70	1.62±0,13 <sup>c,A</sup>	3.02±0,06 <sup>c,B</sup>
80	2.31±0,29 <sup>d,A</sup>	3.35±0,16 <sup>c,B</sup>
90	6.53±0,51 <sup>e,A</sup>	6.77±0,31 <sup>d,A</sup>
$E_a$ (kJ mol <sup>-1</sup> )	90.79	70.71
$K_{m0}$ (s <sup>-1</sup> )	8.36 10 <sup>10</sup>	1.19 10 <sup>8</sup>
$R^2$	0.935	0.922

Letras minúsculas diferentes en la misma columna indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). Letras mayúsculas diferentes en la misma fila indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

Tabla 2: Constantes cinéticas de la contracción de tamaño.

En la Figura 3 se muestran los tiempos estimados, a partir de las constantes cinéticas  $K_m$  presentadas en la Tabla 2, para obtener una contracción del 18%. En la misma se observa que dichos tiempos se redujeron significativamente al aplicar US (30.75-46.03%) para todas las temperaturas excepto a 90°C.

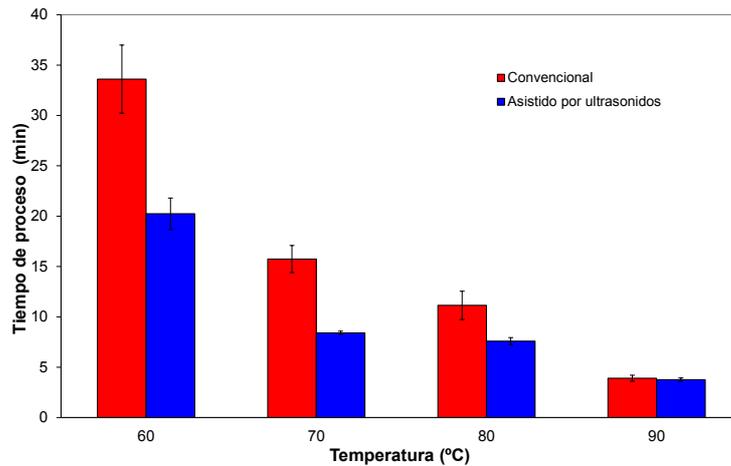


Figura 3: Tiempos de proceso estimados para alcanzar una contracción de tamaño del 18%.

## 3.2. Implementación del modelo de simulación

### 3.2.1. Evolución y distribución de temperaturas

El modelo de simulación desarrollado en la sección 2.4 fue resuelto numéricamente para determinar la evolución y distribución de las temperaturas en el hongo durante la aplicación de los procesos térmicos de EC y EUS. Para la correcta implementación del modelo, se realizaron determinaciones experimentales de los coeficientes de transferencia de calor. Los valores de dicho coeficiente obtenidos para el EC fueron: 579.49, 650.63, 862.97 y 968.97  $W m^{-2} K^{-1}$  para las temperaturas de procesamiento de 60, 70, 80 and 90°C, respectivamente. Mientras que los valores obtenidos para EUS fueron: 4044.79, 3743.39, 3438.12 y 2960.62  $W m^{-2} K^{-1}$  para las temperaturas de 60, 70, 80 y 90°C, respectivamente. Como un ejemplo de la implementación del modelo, en la Figura 4, se muestra la distribución de temperatura y la variación de tamaño predichas por el modelo durante el escaldado convencional y asistido por ultrasonidos a 70°C. En esta figura se puede observar que en EUS (Figura 4b) los hongos exhiben una velocidad de calentamiento y de contracción más rápida que cuando se aplica EC (Figura 4a). El mismo comportamiento fue comprobado para las restantes temperaturas, excepto para 90°C donde no se encontraron diferencias entre ambos procesos. A su vez el modelo de simulación fue validado satisfactoriamente obteniéndose, para las diferentes condiciones, valores de  $E_{r\ medio}$  y  $R^2$  menores que 5% y mayores que 0.98, respectivamente.

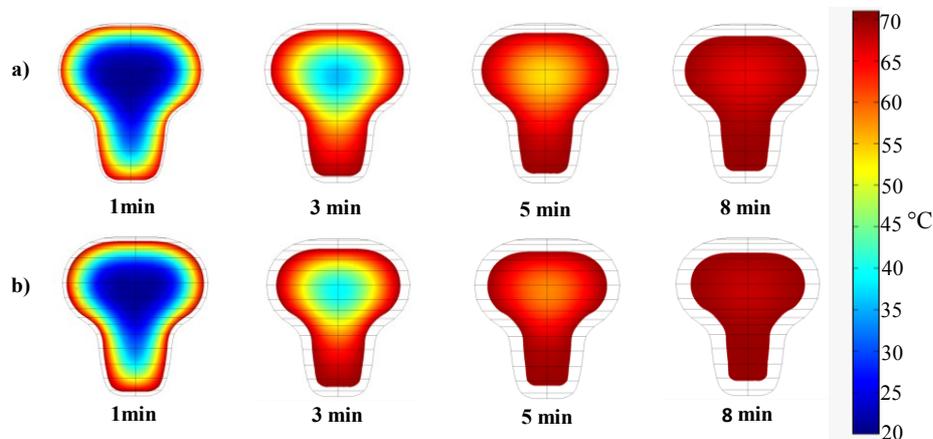


Figura 4: Evolución de la temperatura y del tamaño del hongo para los dos procesos de escaldado a 70°C: a) escaldado convencional y b) escaldado asistido por ultrasonidos. Líneas sólidas representan la geometría inicial.

En la **Figura 5** se muestra la distribución de la temperaturas en dos planos: uno longitudinal y otro transversal (que pasa por el punto más frío), luego de 2 minutos de EUS a 60°C. En el mismo también se observa la geometría inicial (ejes de geometría) y final del hongo mostrando la contracción del tamaño a dicho tiempo. En esta se comprueba además que el punto más frío del hongo se encuentra en el centro geométrico de la cabeza del mismo y que el tallo es la región que se calienta más rápidamente.

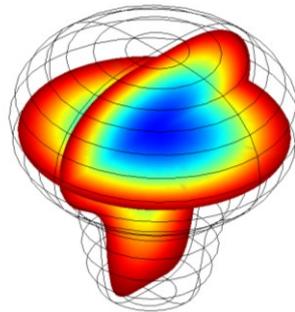


Figura 5: Distribución de temperaturas y contracción de tamaño luego de 2 minutos de EUS a 60°C.

### 3.2.2 Valor de cocción

Para evaluar el deterioro de índices de calidad en champiñones durante los procesos de EC y EUS, se determinó el valor de cocción medio ( $C_{medio}$ ) mediante la Ecuación 8. Los valores de cocción obtenidos para el proceso de EC a temperaturas de 60, 70 y 80°C fueron similares y variaron alrededor de un valor medio de 0.54 min (**Figura 6**). Por su parte, los valores de  $C_{medio}$  obtenidos para el proceso EUS, para las mismas temperaturas (60, 70 y 80°C) se incrementaron con la temperatura del baño. Entre las temperaturas de 80 y 90°C no hubo diferencias en sus valores de cocción para el proceso EUS. Los resultados indicaron que, a temperaturas de 60, 70 y 80°C, los valores de cocción obtenidos mediante el proceso de EUS son menores que aquellos obtenidos mediante EC. Esto sugiere que las pérdidas de calidad en champiñones durante el escaldado son reducidas cuando el mismo es asistido por US a estas temperaturas.

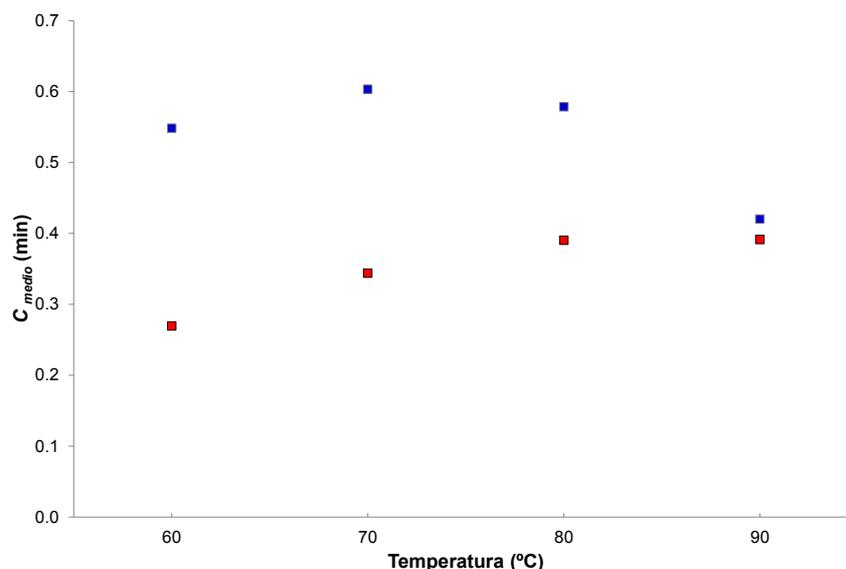


Figura 6: Valores de cocción medio ( $C_{medio}$ ) obtenidos para los procesos de escaldado: (■) convencional y (■) asistido por ultrasonidos, a diferentes temperaturas.

### 3.2.3 Actividad enzimática

En la [Tabla 3](#) se presentan las actividades residuales de la PFO luego de los tratamientos de EC y EUS (a los tiempos de proceso estimados en la sección 3.1). Como se puede observar en dicha tabla la PFO fue inactivada casi en su totalidad a las temperaturas de procesamiento de 70, 80 y 90°C (reducciones mayores al 99%), mientras que a 60°C la inactivación fue parcial. Esto estaría indicando que la actividad de la PFO es el factor que limita el tiempo de proceso a temperaturas por debajo de los 70°C. Mientras que a una temperatura de escaldado igual o mayor a 70°C la contracción del tamaño del hongo es el factor limitante. En la [Figura 7](#) se presenta la evolución de la actividad enzimática de la PFO durante el EC y EUS a las diferentes temperaturas de procesamiento. En esta se puede observar que la velocidad de inactivación se incrementa con la temperatura y con la aplicación de ultrasonidos. Sin embargo la mejora que produce la aplicación de US en la inactivación de la PFO se ve disminuida al aumentar la temperatura de procesamiento y prácticamente desaparece a 90°C donde no se observan diferencias entre ambos procesos (EC y EUS). Este hecho podría deberse a que a altas temperaturas se genera un incremento en la presión de vapor dentro de la burbujas de cavitación, lo que produce una disminución del número de colapsos efectivos producidas por las mismas ([Mason, 1990](#)).

Temperatura (°C)	Escaldado convencional $AR_{sup}$ (%)	Escaldado asistido por US $AR_{sup}$ (%)
60	6.93	18.51
70	<1.00	<1.00
80	<1.00	<1.00
90	<1.00	<1.00

Tabla 3: Retención de la actividad de la PFO en la superficie ( $AR_{sup}$ ).

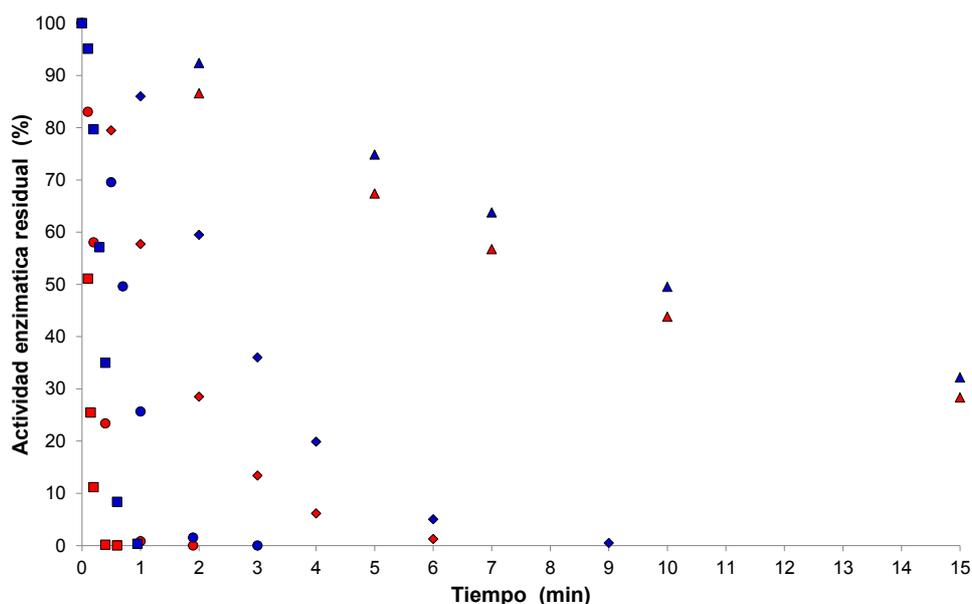


Figura 7: Variación de la actividad residual superficial de la PFO durante los siguientes procesos de escaldado y temperaturas: convencional (▲)60°C, (◆)70°C, (●)80°C, (■)90°C y asistido por US (▲)60°C, (◆)70°C, (●)80°C, (■)90°C.

A los fines de evaluar la actividad enzimática durante todo el proceso de escaldado y con ello inferir los cambios de color que se producen en la superficie del champiñón durante el mismo, se calculó la actividad residual integrada ( $ARI_{sup}$ ). Los valores obtenidos se presentan en la Figura 8 para los diferentes procesos de escaldado analizados en este trabajo. En la misma se puede apreciar que a medida que aumenta la temperatura de escaldado se obtiene una mayor inactivación enzimática y que la asistencia con ultrasonidos mejora dicha inactivación, siendo esta mejora mayor a bajas temperaturas. No obstante el menor valor de  $ARI_{sup}$  se obtuvo a la mayor temperatura de procesamiento ( $90^{\circ}\text{C}$ ), donde no se encontraron diferencias entre ambos procesos para dicho parámetro.

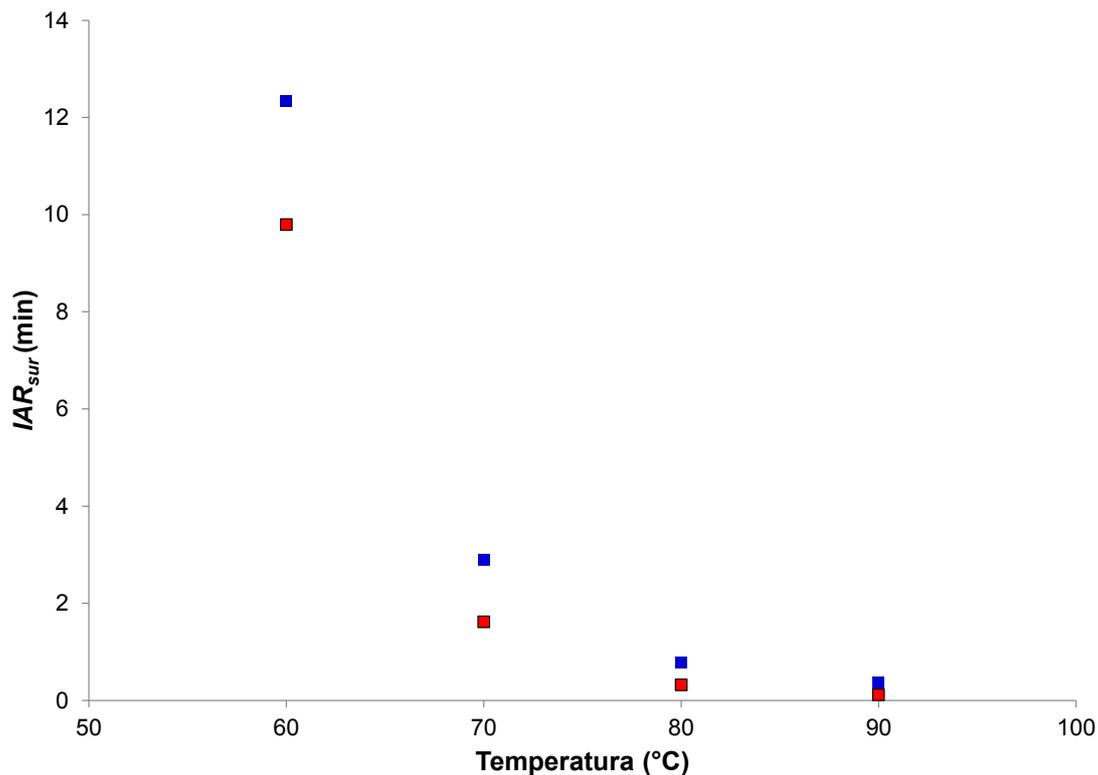


Figura 8: Actividad residual integrada ( $ARI_{sup}$ ) luego del escaldado (■) convencional y (■) asistido por ultrasonidos a diferentes temperaturas.

### 3.2.4 Tratamiento combinado

De los resultados obtenidos se puede concluir que el proceso con el cual se obtuvo un menor valor de cocción fue el EUS a  $60^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 6). Mientras que la mayor inactivación de la enzima PFO, y por consiguiente un cambio menor en el color del champiñón, se logró a una temperatura de procesamiento de  $90^{\circ}\text{C}$  y prácticamente con igual intensidad por ambos procesos (EC y EUS) (ver Figura 8). Estos valores opuestos de temperatura dificultan la optimización del proceso cuando se pretende, de manera simultánea, minimizar las pérdidas de calidad en todo el dominio del hongo representadas por  $C_{medio}$  y maximizar la inactivación de la PFO, o minimizar los cambios de color, en la superficie del mismo representada por  $ARI_{sup}$ . Por esta razón, se propuso como alternativa un tratamiento que combina el EC y EUS. Este tratamiento combinado (TC) consiste en dos etapas: la primera de EC a  $90^{\circ}\text{C}$  durante 30s y la segunda de EUS a  $60^{\circ}\text{C}$  durante 19.87 min (tiempo estimado para alcanzar 18% de contracción de tamaño). De esta manera se logra en la primera etapa una rápida inactivación de la enzima PFO, la cual se vio reflejada en la baja actividad residual integrada ( $ARI_{sup}$ ) (1.98

min) que fue obtenida para el TC. Mientras que en la segunda etapa se logró la contracción de tamaño deseado reduciendo el valor de cocción obtenido ( $C_{medio}$ ) a 0.28 min. De esta manera el TC logró reducciones de 39.1; 49.2 y 83.9% para el tiempo de proceso, valor de cocción y actividad residual integrada de PFO, con respecto al EC a 60°C.

#### 4 CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo matemático de transferencia de calor que permitió predecir la evolución y distribución de la temperatura en champiñones durante el proceso de escaldado convencional y asistido por ultrasonidos. Para la construcción del modelo se determinaron experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor y las cinéticas de contracción de las muestras durante dichos procesos. A las temperaturas predichas por el modelo matemático se le acoplaron cinéticas de deterioro de componentes de calidad como el valor de cocción y de inactivación de la enzima PFO. Esto permitió evaluar la influencia de la aplicación de US durante el escaldado de champiñones sobre la transferencia de calor y sobre índices de calidad, como así también establecer las condiciones óptimas de procesamiento.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico recibido de CONICET, UNLP y del programa de becas EuroTango II- Erasmus Mundus Action 2.

#### REFERENCIAS

- Biekman, E.S.A., Van Remmen, H.H.J., Kroese-Hoedeman, H.I., Ogink J.J.M. y Schijvens E.P.H.M. Effect of shrinkage on the temperature increase in evacuated mushrooms (*Agaricus bisporus*) during blanching. *Journal of Food Engineering*, 33:87–99, 1997.
- Cheng, X., Zhang, M. y Adhikari, B. The inactivation kinetics of polyphenol oxidase in mushroom (*Agaricus bisporus*) during thermal and thermosonic treatments. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20: 674-679, 2013.
- Devece, C., Rodríguez-López, J.N., Fenoll, J.T., Catalá, J.M., De los Reyes, E. y García-Cánovas, F. Enzyme inactivation analysis for industrial blanching applications: comparison of microwave, conventional, and combination heat treatments on mushroom polyphenoloxidase activity. *J. Agric. Food Chem*, 47: 4506-4511, 1999.
- Gallego-Juárez, J.A., Riera, E., De la Fuente, S., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V.M. y Blanco, A. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, 25: 1893–1901, 2007.
- Kotwaliwale, N., Bakane, P. y Verma, A. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 78:1207-1211, 2007.
- Lepinard, A.R., Goñi, S.M., Salgado, P.R. y Mascheroni, R.H. Experimental determination and modeling of size variation, heat transfer and quality indexes during mushroom blanching. *Journal of Food Engineering*, 92: 8-17, 2009.
- Mason, T.J. Introduction. In T.J. Mason (Ed.), *Chemistry with ultrasound* (pp. 1-26). New York: Elsevier Applied Science, 1990.
- Ohlsson, T. Temperature dependence of sensory quality changes during thermal processing. *Journal of Food Science*, 45 (4): 836–847, 1980.
- Sala, F., Burgos, J., Condon, S., Lopez, P. y Raso, J. Effect of heat and ultrasound on microorganisms and enzymes in: G.W. Gould (Ed.), *New methods of Food Preservation*, first ed., Blackie Academic and Professional, Glasgow, pp. 176 -204, 1995.
- Sastry, S.K., Shen, G.Q. y Blaisdel, J.L. Effect of ultrasonic vibration on fluid-to-particle convective heat transfer coefficients. *Journal of Food Science*, 54(1): 229-230, 1989.