

# INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE LA SALMUERA EN EL TRANSPORTE DE AGUA Y SAL DURANTE EL SALADO DE LOMO DE CERDO (*Longissimus dorsi*)

C. Ozuna, J.A. Cárcel <sup>1</sup>

## RESUMEN

El salado de carne de cerdo en salmuera supone una alternativa al salado en seco y presenta la ventaja de acelerar los procesos de transferencia de materia. Normalmente, en este tipo de salado se utilizan salmueras saturadas aunque resulta interesante determinar la influencia de la concentración de salmuera en los procesos de transporte de materia.

En el presente trabajo, se determinó la cinética de salado (15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos) de lomo de cerdo (*longissimus dorsi*) utilizando muestras con geometría laminar a diferentes concentraciones de salmuera (50, 100, 150, 200, 240 y 280 kg/m<sup>3</sup>) y una temperatura de 5±1 °C.

Los resultados experimentales mostraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en la evolución del contenido de humedad y NaCl respecto a la concentración de salmuera utilizada. En el caso del contenido de humedad, las muestras saladas en concentraciones inferiores a 200 kg/m<sup>3</sup> se hidrataron, en concentraciones superiores a 200 kg/m<sup>3</sup> se deshidrataron y entorno a 200 kg/m<sup>3</sup> no se identificó una cinética de transporte clara. Por otro lado, el contenido de NaCl, fue creciente en todos los casos y mayor cuando se incrementó la concentración de la salmuera.

Se utilizó un modelo difusivo basado en la ley de Fick para evaluar la influencia de los diferentes tratamientos de salado, tanto en el contenido de humedad como en la ganancia de NaCl. La difusividad identificada para el agua mostró una tendencia decreciente con el aumento de la concentración de salmuera. Respecto al transporte de NaCl los valores de difusividad oscilaron entorno a  $2 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s.

**PALABRAS CLAVE:** Concentración de salmuera, Transferencia de materia, Modelización, Difusividad.

## RESUM

El salat de carn de porc en salmorra suposa una alternativa al salat en sec i presenta l'avantatge d'accelerar els processos de transferència de matèria. Normalment, en aquest tipus de salat s'utilitzen salmorres saturades encara que resulta interessant determinar la influència de la concentració de salmorra en els processos de transport de matèria.

---

<sup>1</sup> Grupo de Análisis y Simulación de Procesos Agroalimentarios (ASPA), Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, C/ Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

En el present treball, es determinà la cinètica de salat (15, 30, 45, 60, 90 i 120 minuts) de llom de porc (*Longissimus dorsi*) utilitzant mostres amb geometria laminar a diferents concentracions de salmorra (50, 100, 150, 200, 240 i 280 kg/m<sup>3</sup>) i una temperatura de 5±1 °C.

Els resultats experimentals van mostrar diferències significatives (p<0,05) en l'evolució del contingut d'humitat i NaCl respecte a la concentració de salmorra emprada. En el cas del contingut d'humitat, les mostres salades amb concentracions inferiors a 200 kg/m<sup>3</sup> s'hidrataven; amb concentracions superiors a 200 kg/m<sup>3</sup> es deshidrataven; i al' entorn de 200 kg/m<sup>3</sup> no s'identificà una cinètica de transport clara. Per altre costat, el contingut de NaCl va resultar creixent en tots els casos i major en incrementar la concentració de salmorra.

Es va utilitzar un model difusiu fonamentat en la llei de Fick per a evaluar la influència dels diferents tractaments de salat, tant en el contingut d'humitat com en el guany de NaCl. La difusivitat identificada per a l'aigua demostrà una tendència decreixent amb l'augment de la concentració de salmorra. Respecte al transport de NaCl, els valors de difusivitat oscil·laren entorn a  $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**PARAULES CLAU:** Concentració de salmorra, Transferència de matèria, Modelització, Difusivitat.

## **ABSTRACT**

Pork meat brining process represents an alternative to dry-salting. Brining has the advantage of accelerating the mass transport process. Normally in this kind of salting saturated brine is used but it is interesting to determine the influence of brine concentration on these mass transport processes.

In the present work, the salting kinetics (15, 30, 45, 60, 90 and 120 minutes) of pork loin slices (*Longissimus dorsi*) was studied. The samples were immersed in different NaCl concentrations (50,100, 150, 200, 240 and 280 kg/m<sup>3</sup>) at 5±1 °C.

Experimental results showed significant differences (p<0,05) in moisture content and NaCl gain with respect to brine concentration. In the case of moisture content, those samples brined at concentrations below 200 kg/m<sup>3</sup> were hydrated, at concentrations exceeding 200 kg/m<sup>3</sup> were dehydrated, and around to 200 kg/m<sup>3</sup> did not show clear transport kinetics. Regarding the evolution of the NaCl content, it increased in all cases as NaCl concentration increased.

A diffusive model based on Fick's second law was used to determinate the influence of the different treatments (moisture content and NaCl gain). The identified moisture diffusivity showed a decreasing trend when brine concentration increased. Regarding the evolution of NaCl gain, the identified diffusivity ranged around  $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

**KEY WORDS:** Brine concentration, Mass transport, Modelling, Diffusivity.

## INTRODUCCIÓN

Los productos cárnicos crudo curados procedentes del ganado porcino son uno de los principales destinos de la industria cárnica en España, la cual representa el 20,6% del total de las ventas de la industria de alimentos del país (MAPA, 2010). Los tres productos más apreciados por los consumidores son, por este orden, el jamón ibérico, el jamón serrano y el lomo embuchado (Samir et al., 1996). El lomo embuchado es elaborado a partir del músculo ileoespinal del cerdo en una sola pieza, el *Longissimus dorsi*. Su elaboración consta de una etapa principal de salado a la que le siguen las etapas de adobado, embutido, estufaje y maduración.

En el salado, la sal tiene la función de actuar como agente conservante y es responsable de fenómenos físicos, químicos y bioquímicos que contribuyen al desarrollo del sabor (Siró et al. 2008). La sal también es responsable del aumento de la solubilidad de las proteínas y de la capacidad de retención de agua. (Hernández et al., 1999). Por otro lado, en sistemas alimentarios, la ganancia de sal, en general, va acompañada de la pérdida de agua del mismo (Gerla and Rubiolo, 2002; Vestergaard et al., 2005).

El principal constituyente de la carne es el agua, la cual representa alrededor del 75% de su peso. Cerca del 90% del agua total es agua ligada a las células musculares y el resto está presente en los espacios intersticiales (Lambert et al., 2001). La reducción de la disponibilidad de agua en los alimentos se realiza habitualmente por la transferencia de parte de la misma a un fluido, gas o líquido. En sistemas sólido-gas, la reducción de la disponibilidad se realiza mediante la eliminación de parte del contenido de agua. En cambio, en sistemas sólido-líquido no sólo se produce la eliminación del agua del alimento, sino que además se eleva su concentración de solutos (Cárcel et al., 2003).

Los fenómenos de transferencia de materia que aparecen durante los tratamientos de sólidos en disoluciones hipertónicas se ven afectados por las variables del proceso y por la naturaleza, tanto del sólido como de la disolución utilizada (Le Maaguer, 1988; Lazarides, 1995, 1997; Jiokap-Nono et al., 2001). Para cuantificar la influencia de dichas variables resulta muy útil recurrir a la modelización. Así, la modelización supone un camino para describir los procesos o fenómenos a partir de datos determinados experimentalmente o para predecir comportamientos bajo condiciones diferentes a las que éstos fueron determinados. Generalmente, se pueden considerar dos tipos de modelos, aquellos que interpretan los fenómenos a partir de leyes físicas y los que se basan en ajustes semiexperimentales con el objetivo de cuantificar la influencia de algunas variables (Mulet, 1994).

En este sentido, para la modelización de la transferencia de agua y de solutos en sistemas sólido-líquido se suelen utilizar, bien modelos empíricos (Peleg, 1988), o bien modelos difusionales basados en la segunda ley de Fick (Cranck, 1975). Estos últimos aunque matemáticamente resultan más complejos de resolver, permiten estudiar los procesos en condiciones diferentes a las determinadas experimentalmente, por ejemplo, utilizando diferentes geometrías.

El salado de carne se lleva a cabo principalmente de dos maneras, en seco y en húmedo. El salado en seco es el tipo de salado tradicional, que se emplea de manera más extendida, y que consiste en frotar externamente las piezas con sal. Por su parte, el salado húmedo se realiza sumergiendo las piezas en una salmuera, normalmente saturada. Aunque menos utilizado, este método presenta la ventaja de acelerar los procesos de transferencia de materia, tanto de la sal que penetra en la pieza, como del agua que sale de la misma. Entre las desventajas del salado húmedo cabe destacar el espacio necesario para el manejo de grandes contenedores para las salmueras.

Durante el salado de carne en salmueras saturadas aparecen principalmente dos flujos de materia, una migración de agua desde la carne a la disolución y un transporte de NaCl desde la disolución hacia la carne. Dichos transportes contribuyen a disminuir la disponibilidad de agua en el producto, dificultando las reacciones de deterioro químico y microbiológico (Cárcel et al., 2003).

Existen diversas publicaciones que abordan el cálculo de la difusividad del cloruro de sodio en el proceso de salado de carne en salmuera a concentraciones cercanas a la saturación (Cárcel et al., 2007; Djelveh and Gros, 1988; Fox, 1980; Graiver et al., 2006, 2009; Guiheneuf et al., 1997; Vestergaard et al., 2005, 2007; Wang et al., 2000). Sin embargo son escasas las publicaciones que hacen referencia al efecto de la concentración de la salmuera en el transporte del cloruro de sodio y del agua.

En este sentido, Graiver et al. (2006) estudiando el salado de carne de cerdo en salmueras de diferentes concentraciones encontraron diferencias en el transporte de agua. Así, al utilizar concentraciones entre 5 y 200 g/L de NaCl, el tejido se hidrató. En el rango de concentraciones entre 70 y 100 g/L observaron una máxima ganancia de agua. Respecto a los salados que se utilizaron salmueras con un contenido de NaCl superior de 200 g/L, observaron que, la capacidad de retención de agua disminuyó, y con concentraciones próximas a la saturación (330 g/L) la carne se deshidrató.

Por tanto, resulta interesante analizar el efecto de la concentración de la salmuera en los fenómenos de transporte de materia que se llevan a cabo en esta operación. Esto podría permitir realizar innovaciones en el proceso de salado, optimizando el valor de las variables que se involucran en él, y por tanto, obtener nuevos productos cárnicos de elevada calidad con características sensoriales específicas demandadas por el consumidor. El principal objetivo que se persiguió con el presente trabajo fue determinar la influencia de la concentración de la salmuera en la transferencia de agua y de cloruro de sodio durante el salado de lomo de cerdo (*Longissimus dorsi*).

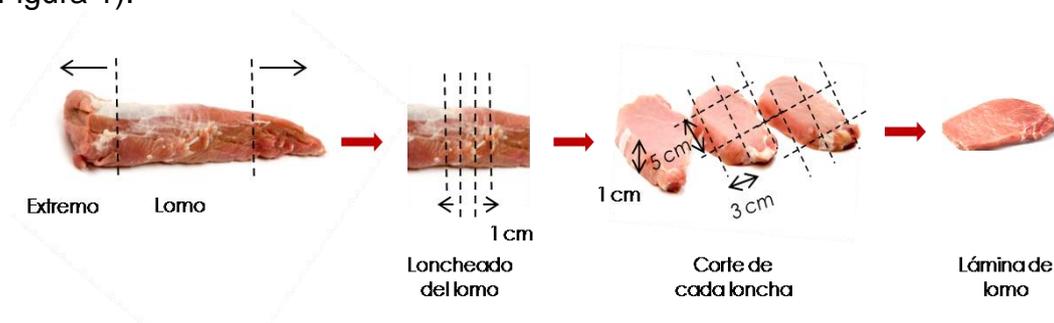
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materia prima

Las experiencias de salado se realizaron con el músculo *Longissimus dorsi* procedente de cerdos de raza (Large White x Landrace) x Pietrain. Las piezas fueron adquiridas en un matadero local (Valencia, España) y se escogieron con un pH comprendido en el rango de 5,3-5,6. La determinación del pH se realizó in situ en 3 puntos distintos de cada pieza, evitando las zonas grasas, utilizando un pH-metro Matthäus modelo pH-STAR CPU (Pötmes, Alemania). Posteriormente, los lomos fueron transportados al laboratorio de forma refrigerada.

### Preparación de las muestras

Las muestras, en forma laminar, se obtuvieron utilizando cuchillos afilados. No se utilizaron sistemas de corte circulares para evitar el efecto sobre la superficie de la muestra que estos sistemas provocan. Los extremos de la cinta de lomo se desecharon ya que, en esta zona, el tamaño del *longissimus dorsi* es pequeño y no permite obtener muestras del tamaño deseado. La zona central del músculo se dividió en lonchas de 1 cm de espesor. De cada una de estas lonchas se obtuvieron dos láminas iguales de carne cuyas dimensiones aproximadamente fueron de 5 x 3 x 1 cm (Figura 1).



**FIGURA 1.** Procedimiento de corte de láminas de lomo.

Posteriormente, las muestras se envolvieron individualmente en un film plástico para impedir las pérdidas de humedad y se almacenaron en una cámara de congelación ( $-18 \pm 0,5$  °C), donde se mantuvieron hasta la realización de las experiencias de salado.

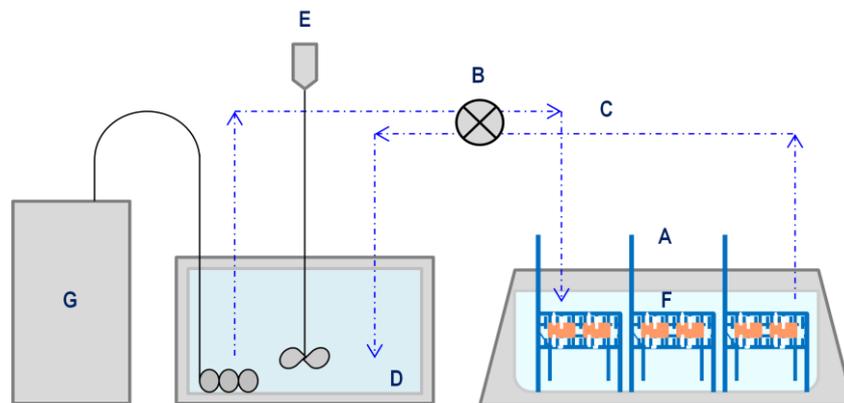
### Preparación de las salmueras

Se prepararon salmueras con diferentes concentraciones a partir de agua destilada y sal marina gruesa para salazón. Las concentraciones que se utilizaron fueron: 50, 100, 150, 200, 240 y 280 kg/m<sup>3</sup>. Esta última concentración correspondió con la saturación de la disolución a la temperatura a la que se realizaron los salados posteriores ( $5 \pm 1$  °C). Dicha saturación se aseguró manteniendo siempre sal sólida en la disolución. Una

vez preparadas, las salmueras fueron almacenadas en recipientes herméticos en una cámara de congelación ( $-18 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hasta la realización de las experiencias de salado.

### Dispositivo de salado

Los salados se realizaron en un baño con capacidad de 6 litros a una temperatura de  $5 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esto se consiguió mediante la recirculación de salmuera desde un depósito pulmón equipado con un equipo de refrigeración (modelo 3000778, J. P. Selecta S. A., Barcelona, España) y un agitador portátil Heidolph modelo RZR1 (Heidolph Instruments GMBH & Co., Schwabach, Alemania). Dicha recirculación se realizó con una bomba peristáltica Watson/Marlow (modelo 302S, Watson-Marlow Limited, Reino Unido). El diseño del dispositivo se esquematiza en la Figura 2. Las muestras se colocaron en sistemas portamuestras que permitieron mantenerlas en posiciones fijas durante el salado.



**FIGURA 2.** Esquema del dispositivo de salado. A. Baño de salmuera, B. Bomba peristáltica, C. Conducción de salmuera, D. Depósito pulmón de salmuera, E. Sistema de agitación, F. Sistemas portamuestra, G. Unidad enfriadora.

### Experiencias de salado

El proceso de descongelación de las muestras para la realización de los salados se estandarizó para evitar la influencia de este parámetro en la transferencia de materia y consistió en colocar las muestras, 24 horas antes de cada experiencia en una cámara de refrigeración a una temperatura constante de  $2 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En cada salado se utilizaron seis muestras de carne. Previamente, las muestras descongeladas se secaron superficialmente, se pesaron con una balanza de precisión modelo PB 3002-S/PH (Mettler Toledo Intl. Inc., Barcelona, España) y se midieron (largo x ancho x espesor) con un calibrador vernier universal. Seguidamente, se colocaron en los sistemas portamuestras (Figura 2,F) y se introdujeron simultáneamente en el baño. Para lograr un salado homogéneo las muestras fueron cambiadas de

localización cada cinco minutos. En periodos de diez minutos se registró la temperatura del baño. Las muestras se retiraron del baño a diferentes tiempos de salado (15, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos) y fueron sumergidas durante 20 segundos en agua destilada para eliminar la salmuera que pudiera haber quedado adherida en la capa externa de la carne. Posteriormente, se secaron superficialmente, se pesaron, etiquetaron y envolvieron en film plástico impermeable. Finalmente, se congelaron hasta el momento de la determinación de su contenido de humedad y de NaCl.

Adicionalmente, se tomaron muestras de las salmueras antes y después del salado llevando así un registro de la evolución de su concentración durante el tratamiento. De esta manera se comprobó que la concentración de las salmueras no varió significativamente durante los salados.

## **Determinaciones analíticas**

### **HUMEDAD**

La determinación de humedad en las muestras se realizó de acuerdo con el método de la AOAC 950.46 (AOAC, 1997). En primer lugar, se pesó un pesafiltro de vidrio en el que anteriormente se colocaron aproximadamente 3 g de arena de mar lavada, totalmente seca, y una varilla de vidrio. Posteriormente, se agregó la muestra triturada ( $\approx 3$  g) en el interior del pesafiltro. La carne se mezcló con la arena de mar con ayuda de la varilla de vidrio y alcohol. De esta manera, se logró disgregar en su totalidad la muestra. A continuación, los pesafiltros fueron introducidos en una estufa a 105 °C y se mantuvieron dentro hasta alcanzar un peso constante ( $\approx 24$  horas). Las determinaciones de humedad se realizaron por triplicado para cada una de las muestras.

También se realizaron determinaciones de humedad en muestras de carne fresca lo que permitió calcular la variación del contenido de la misma durante los tratamientos de salado.

### **CONTENIDO DE NaCl**

La determinación del contenido de NaCl en la carne se realizó por triplicado en cada una de las muestras tratadas. Para ello, se tomaron entre 0,5 y 1,5 g de una muestra previamente homogenizada en un triturador, y se le añadió 100 mL de agua destilada. La mezcla se homogenizó nuevamente con un ultraturrax modelo T25 (IKA Labortechnik, Janke & GMB & Co, Staufen, Alemania) equipado con un vástago modelo S25N-18G girando a una velocidad de 9500 r.p.m. durante 5 minutos. Posteriormente, la mezcla fue filtrada obteniendo un extracto en el que se realizó la medida de la concentración de iones cloruro. Para ello se empleó un analizador de cloruros Ciba Corning (Halstead, Essex, Reino Unido) modelo 926. Para cada una de las tres réplicas por muestra analizada, se repitió al menos tres veces la medida. Posteriormente, la medida se tradujo a concentración de NaCl referida al contenido de materia seca de la carne sin salar (kg NaCl/kg materia seca inicial).

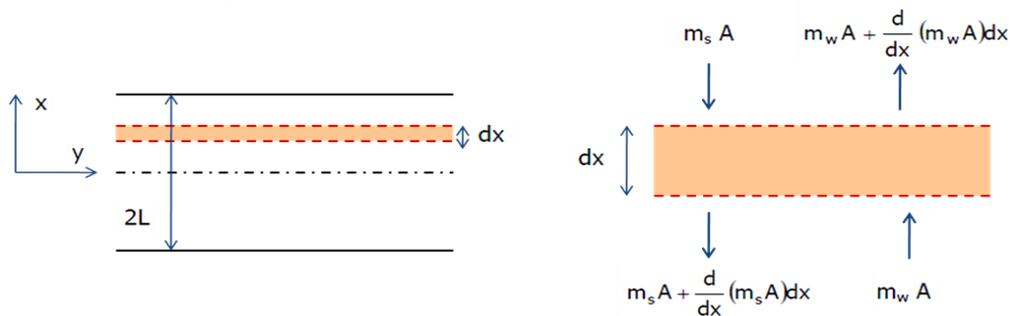
## Modelización de la transferencia de materia

Para la modelización de las cinéticas de transporte, tanto de agua como de NaCl, se utilizó un modelo difusivo basado en la ley de Fick. Éste indica que el flujo de un determinado componente en una dirección es directamente proporcional al gradiente de concentraciones en esa dirección e inversamente proporcional a la distancia. En el caso del transporte de agua dicha ley quedaría definida por la Ecuación 1.

$$J_{wx} = -D_w \frac{\partial C_w}{\partial x} \quad (1)$$

Donde  $D_w$  es el coeficiente de difusión, que es la medida de la cinética del proceso. Análogamente, se realizó un planteamiento similar para el transporte de sal.

Considerando que la geometría elegida para las muestras de lomo se asemeja a una lámina de espesor finito y demás dimensiones infinitas, se puede asumir que el flujo de materia que se produce en su seno será unidimensional (Figura 3).



**FIGURA 3.** Esquema de un sistema con una geometría de lámina infinita. Detalle de un elemento diferencial en el que se especifican los flujos de agua y solutos.

A partir del balance microscópico en estado no estacionario en el elemento diferencial (Ecuación 3) y de la ley de Fick (Ecuación 1).

$$m_w A = m_w A + \frac{d(m_w A)}{dx} dx + \frac{d(A dx C_w)}{dt} \quad (2)$$

se obtiene una ecuación en derivadas parciales que describe la transferencia de materia. En el caso del contenido en agua y considerando que la difusividad efectiva ( $D_{we}$ ) permanece constante durante el proceso, esta expresión vendría dada por la Ecuación 3 (Cranck, 1975):

$$\left( \frac{\partial C_w(x,t)}{\partial t} \right) = D_{we} \left( \frac{\partial^2 C_w(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (3)$$

En la Ecuación 3 aparece una derivada de segundo orden respecto a la distancia y una derivada de primer orden respecto al tiempo. Para poder integrar es necesario definir dos condiciones respecto a la distancia, condiciones de contorno (Ecuación 4 y 5), y una respecto del tiempo, condición inicial (Ecuación 6):

$$t > 0; \quad x = L, \quad C_w(L, t) = C_{weq} \quad (4)$$

$$t > 0; \quad x = 0, \quad \frac{\partial C_w(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

La Ecuación 4 indica que la concentración del componente en la superficie de la muestra es, para cualquier tiempo considerado, igual a la concentración de equilibrio. Esto supone considerar que la resistencia externa a la transferencia de materia es despreciable frente a la resistencia interna. La Ecuación 5 es una condición de simetría de la transferencia del componente respecto del plano de simetría de la muestra, que es perpendicular a la única dirección de transferencia de materia.

Respecto a la condición inicial (Ecuación 6), se asume que, en el instante inicial, la concentración del componente en cuestión es la misma en cualquier punto del sólido e igual a la concentración inicial.

$$t \leq 0; \quad 0 \leq x \leq L, \quad C_w(x, 0) = C_{w_0} \quad (6)$$

Para la integración de la Ecuación 3 se admitieron una serie de hipótesis que simplificaron el problema. Como ya se ha comentado, se consideró que la difusividad efectiva del componente permanece constante durante el proceso. Por otra parte, se asumió que el sólido considerado presenta propiedades de homogeneidad e isotropía, y, por último, que la geometría de las muestras permaneció constante durante los tratamientos en fase líquida realizados. Es decir, se despreciaron los fenómenos de expansión o contracción. Asumiendo estas hipótesis se puede encontrar una solución analítica al problema. Para ello, se expresa la humedad de las muestras en forma adimensional con el fin de conseguir que las condiciones de entorno sean homogéneas.

$$\Psi(x, t) = \frac{C_w(x,t) - C_{weq}}{C_{w_0} - C_{weq}} \quad (7)$$

Con este cambio de variable, la resolución de la Ecuación 3, considerando las condiciones de contorno (Ecuaciones 4 y 5) y la condición inicial (Ecuación 6) permite calcular la humedad puntual en el interior de la muestra.

$$\Psi(x, t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda_n L} e^{-D_w \lambda_n^2 t} \cos(\lambda_n x) \quad (8)$$

Donde  $\lambda_n$  son los valores característicos que cumplen:

$$\lambda_n L = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

Integrando la expresión obtenida para todo el volumen de la pieza, se obtiene una relación entre la humedad media de la muestra y el tiempo de tratamiento (Cranck, 1975).

$$\Psi(t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2 L^2} e^{-D_w \lambda_n^2 t} \quad (10)$$

Estas mismas ecuaciones se utilizaron para modelizar la evolución del contenido de NaCl de las muestras de lomo durante los tratamientos, sustituyendo la humedad por el contenido de NaCl.

Por otra parte, conviene destacar que el cambio de variable propuesto para la Ecuación 7, hace que se exprese la variación de la concentración de un componente de forma adimensional. Esto supone que las unidades en las que se expresa la concentración no influyan en las unidades de difusividad, que en este caso son  $m^2/s$ .

Este modelo se utilizó para estimar el valor de la difusividad del agua y de NaCl en los diferentes tratamientos. Para ello, se elaboró una hoja de cálculo (Excel™) en la que se incluyeron 50 términos de la serie definida de la Ecuación 10. La estimación de la difusividad se realizó planteando y resolviendo un problema de optimización mediante la herramienta SOLVER de la propia hoja de cálculo. SOLVER aplica el método del Gradiente Reducido Generalizado (GRG). La difusividad identificada fue aquella que minimizó la suma de las diferencias al cuadrado entre las humedades medias determinadas experimentalmente y las calculadas mediante la aplicación del modelo.

Cabe destacar que la difusividad ( $D_w$ ) identificada, en realidad supone una difusividad efectiva ( $D_{ef}$ ), ya que engloba todos los aspectos relacionados con la cinética del proceso (resistencia externa, resistencia interna, encogimiento, etc.)

### **Análisis estadístico**

Se utilizó el análisis de varianza multifactorial (ANOVA) y los intervalos LSD (Least Significant Difference) ( $p < 0,05$ ) para evaluar la significación de la influencia de la concentración de la salmuera en las diferentes variables. El análisis estadístico se realizó utilizando el paquete Statgraphics Plus 5.1.

La bondad de los ajustes del modelo se evaluó a través del cálculo del porcentaje de la varianza explicada. Para ello se utilizó la siguiente expresión (Lipson y Sheth, 1973):

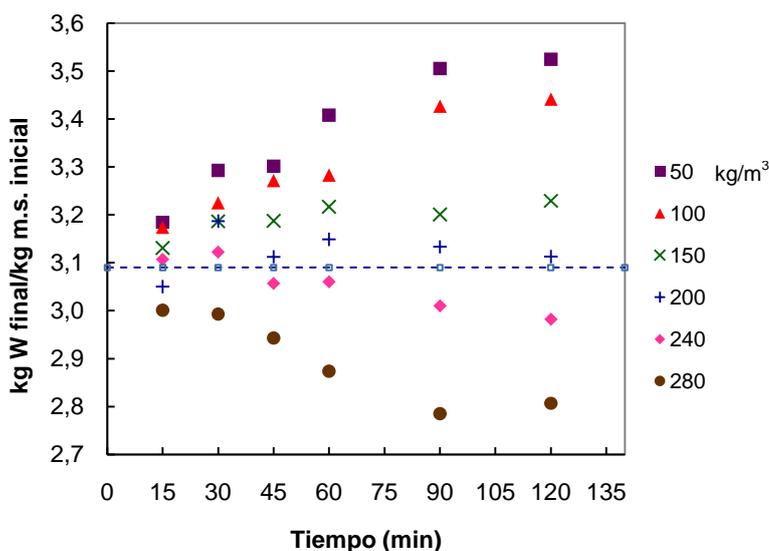
$$\% \text{ Varianza} = \left[ 1 - \frac{S_{xy}^2}{S_y^2} \right] \cdot 100 \quad (11)$$

A partir de la Ecuación 11, se determinó el porcentaje de la variabilidad experimental que quedó explicado con el modelo. El porcentaje restante se atribuyó a factores no considerados entre los que se encontraría el error experimental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Transporte de agua

La evolución del contenido de agua de las muestras durante los tratamientos sólido-líquido dependió de la concentración de la salmuera utilizada, como puede observarse en la Figura 4. Cada punto representa la media del contenido de agua de, al menos, tres muestras saladas independientemente y analizadas cada una de ellas por triplicado. Esto supone en total nueve medidas por punto.



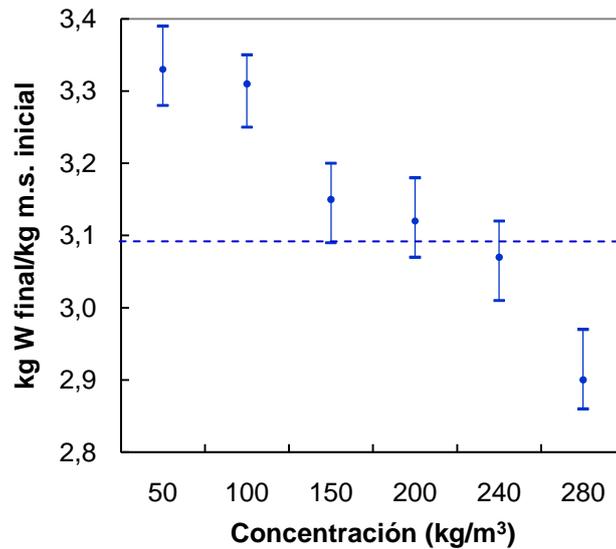
**FIGURA 4.** Influencia de la concentración ( $\text{kg/m}^3$ ) de la salmuera en la evolución del contenido de humedad de láminas de lomo.

Puede observarse que, las muestras tratadas con salmueras de concentraciones inferiores a  $200 \text{ kg/m}^3$  experimentaron una ganancia neta de agua que se incrementó con el tiempo de tratamiento. En el caso de las muestras tratadas a concentraciones superiores a  $200 \text{ kg/m}^3$ , el contenido de humedad fue inferior con el tiempo de tratamiento. La deshidratación fue más acusada en las muestras tratadas en salmuera saturada ( $280 \text{ kg/m}^3$ ). En cuanto a las concentraciones próximas a  $200 \text{ kg/m}^3$ , las muestras de carne no presentaron una variación importante del contenido de humedad respecto a su contenido inicial. Estos resultados son similares a los obtenidos por Graiver et al. (2009) empleando muestras del mismo músculo con geometría cilíndrica en tratamientos similares.

Los datos obtenidos indicarían que entorno a la concentración de  $200 \text{ kg/m}^3$  se encontraría el punto isotónico respecto al contenido de humedad de la carne utilizada. Por tanto, el tratamiento con salmueras de concentraciones superiores produce la deshidratación de las muestras, y con salmueras de concentración inferior, la hidratación de las mismas.

A partir de la realización de un ANOVA multifactorial y de la determinación de los intervalos LSD (95%) se pudo establecer la

significación estadística de las diferencias entre los distintos tratamientos. Se planteó como variable independiente la variación del contenido de agua referido al contenido de materia seca inicial de la carne. La concentración de la salmuera y el tiempo de tratamiento se consideraron como los factores responsables de la variabilidad muestral. El resultado del ANOVA mostró la existencia de diferencias significativas entre las medias de contenido de humedad a las concentraciones de salmuera utilizadas ( $p < 0,05$ ).



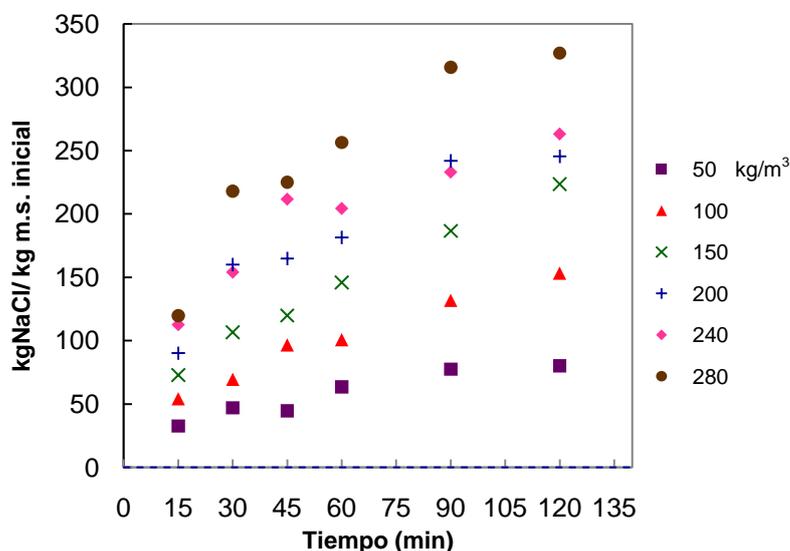
**Figura 5.** Intervalos LSD (Least Significant Difference) (95%) para el contenido medio de humedad de láminas de lomo tratadas en salmueras de diferentes concentraciones.

Así, mediante la determinación de los intervalos LSD (Figura 5) se distinguieron tres bloques de tratamientos significativamente diferentes entre sí. Un primer bloque (salados con salmueras de 50 y 100 kg/m<sup>3</sup>) en la que las muestras presentaron una ganancia media de agua significativa ( $p < 0,05$ ) respecto al contenido inicial de la carne. Un segundo bloque (salados con salmueras de 280 kg/m<sup>3</sup>) en el que las muestras se deshidrataron, y por tanto, mostraron un contenido de agua significativamente inferior que el inicial. Y un tercer bloque (salados con salmueras de 150, 200, 240 kg/m<sup>3</sup>) en los que el contenido medio de agua no difiere significativamente del inicial. Así, en los tratamientos realizados a 200 kg/m<sup>3</sup> no se observa claramente una tendencia en el sentido del flujo de agua. Las muestras tratadas con las salmueras de concentraciones de 150 y 240 kg/m<sup>3</sup> presentan flujos contrarios en las muestras tratadas, siendo hidratadas en el primer caso y deshidratadas en el segundo. Sin embargo, estas diferencias no resultaron significativas.

### Transporte de NaCl

El contenido inicial de NaCl en la carne fresca resultó despreciable por lo que, a efectos prácticos, se consideró como cero. En las muestras tratadas,

y para todas las concentraciones de salmuera ensayadas, se observó un incremento del contenido de NaCl que varió con el tiempo de tratamiento y con la concentración de salmuera utilizada (Figura 6).

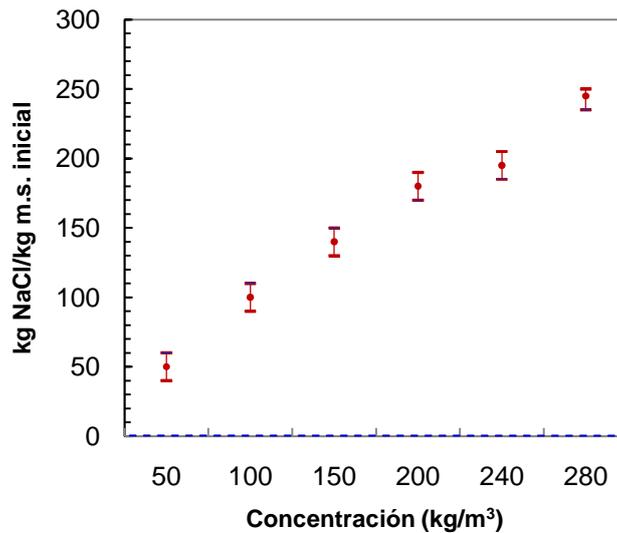


**FIGURA 6.** Influencia de la concentración ( $\text{kg/m}^3$ ) de la salmuera en el contenido de NaCl de láminas de lomo para diferentes tiempos de salado.

Así, para un mismo tiempo de tratamiento, el contenido de NaCl de las muestras se incrementó con la concentración de la salmuera utilizada. Cabe destacar que cada punto que aparece en la Figura 6, de igual forma que en el contenido de humedad, representa la media del contenido de NaCl de, al menos, tres muestras saladas independientemente y analizadas cada una de ellas por triplicado. Esto supone en total nueve medidas por punto.

Con objeto de establecer la significación de las diferencias entre tratamientos, se realizó un ANOVA multifactorial considerando como variable dependiente el contenido de NaCl de las muestras y como factores, el tiempo de tratamiento y la concentración de la salmuera. Ambos factores resultaron significativos con más de un 95% de probabilidad. A su vez, la interacción doble, concentración x tiempo, también resultó ser significativa. Esto indica que las diferencias entre tratamientos no sólo son dependientes del tiempo de salado y de la concentración de la salmuera utilizada, sino que también depende de la combinación de ambos factores.

En la Figura 7 se muestran los intervalos LSD ( $p < 0,05$ ) determinados para identificar los niveles de concentración ensayados que resultaron significativamente diferentes entre sí. Como se puede observar, el contenido medio de NaCl de las muestras tratadas a diferentes concentraciones de salmuera presentan diferencias significativas entre sí ( $p < 0,05$ ), exceptuando las concentraciones de 200 y  $240 \text{ kg/m}^3$ . Para estas concentraciones, aunque el contenido medio de NaCl de las muestras resultó superior en las tratadas con la salmuera de  $240 \text{ kg/m}^3$ , las diferencias no resultaron significativas.



**Figura 7.** Intervalos LSD (Least Significant Difference) (95%) para el contenido medio de NaCl de láminas de lomo tratadas en salmueras de diferentes concentraciones.

### Modelización de la transferencia de materia

Con el objeto de profundizar en el estudio del transporte de agua y NaCl durante el salado en salmueras a diferentes concentraciones, se recurrió a la modelización de los resultados experimentales.

#### TRANSPORTE DE AGUA

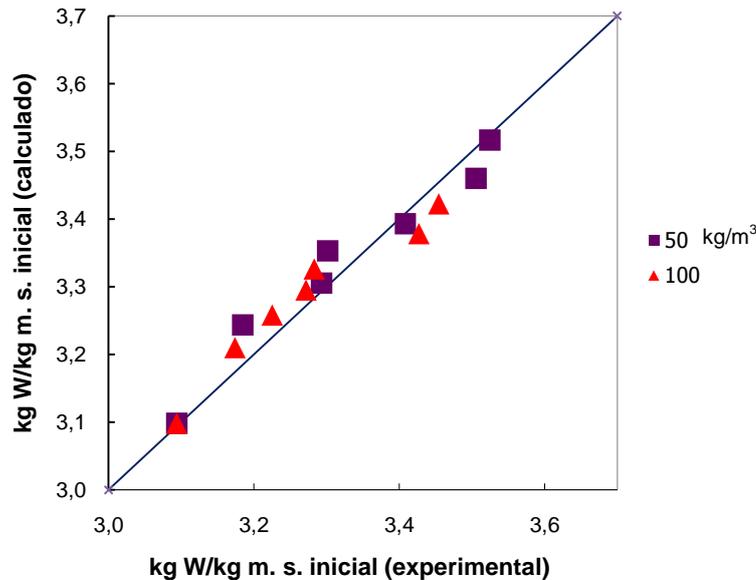
A partir de los contenidos de agua experimentales se realizó la identificación paramétrica de la difusividad en los distintos tipos de tratamientos ensayados.

Respecto a la bondad de los ajustes conseguidos por el modelo, en general, no fueron excesivamente buenos como se puede observar a partir de los bajos valores de porcentaje de la varianza explicada. (Tabla 1).

**Tabla 1.** Coeficientes de difusión identificados y % de varianza explicada para el transporte de agua en los tratamientos de lomo en salmuera (5 °C) a diferentes concentraciones.

Concentración de salmuera (kg/m³)	Difusividad ( $D_w$ )	% de varianza explicada
	$\frac{m^2}{s} \times 10^{-10}$	
50	0,76	90,66
100	0,62	90,24
150	0,17	89,07
200	-	-
240	-1,04	81,14
280	-1,83	90,07

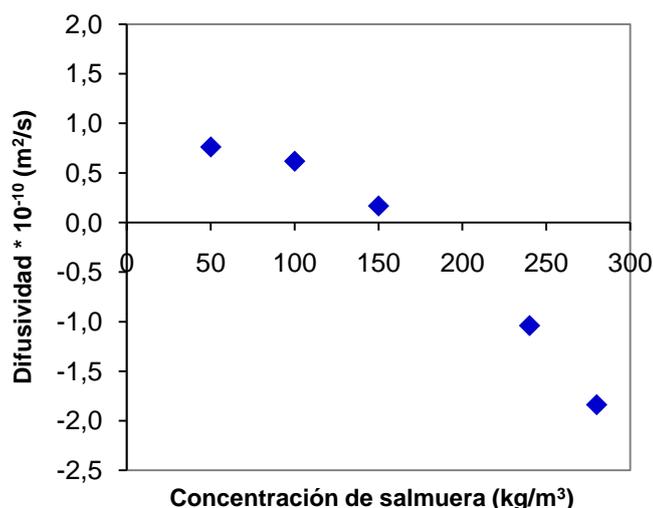
Esto puede ser debido, entre otros factores, a la gran variabilidad de la materia prima que, a pesar de realizar tres repeticiones de cada una de las condiciones de salado ensayadas, generó mucha incertidumbre en las cinéticas experimentales. Sin embargo, hay que destacar que, prácticamente en todos los casos, y pese al mal ajuste, se observó una tendencia similar entre los valores experimentales y los calculados (Figura 8). Este hecho hace que los valores de difusividad efectiva identificados, constituyan una medida aceptable de la cinética de proceso.



**FIGURA 8.** Contenido de agua experimental frente a la calculada. Salado de lomo a diferentes concentraciones ( $\text{kg/m}^3$ ).

Cabe destacar el bajo valor del porcentaje de varianza explicada obtenido en el caso de la salmuera de  $240 \text{ kg/m}^3$ . Respecto a la salmuera de  $200 \text{ kg/m}^3$  resultó imposible ajustar el modelo. En estos casos, principalmente en la concentración de  $200 \text{ kg/m}^3$ , no se observó una tendencia clara hacia la ganancia o pérdida de agua por parte de las muestras durante el salado (Figura 4). Esto impidió la identificación de una cinética de transporte clara y fue un factor que imposibilitó modelizar dicha concentración y la obtención de bajos valores de varianza explicada en concentraciones muy próximas a ésta. En este sentido, Graiver et al. (2009) encontraron un comportamiento similar en tratamientos realizados con salmueras de igual concentración.

Los valores de difusividad aparente identificados en los tratamientos con diferentes concentraciones de salmuera, se muestran en la Figura 9.



**Figura 9.** Evolución de los coeficientes de difusión identificados para el transporte de agua en un tratamiento sólido-líquido de lomo en salmuera a diferentes concentraciones ( $5 \pm 1$  °C).

En general puede observarse una disminución del valor de difusividad conforme aumenta la concentración de la salmuera. En concentraciones inferiores a  $200 \text{ kg/m}^3$  se apreció un valor de difusividad positivo, lo cual hace referencia a que las muestras se hidrataron. La baja concentración de NaCl que presentan estas salmueras, permitió el transporte de agua hacia el interior de la carne. Por otra parte, los valores de difusividad en concentraciones superiores a  $200 \text{ kg/m}^3$  (concentraciones próximas a la saturación) presentaron valores negativos, debido a que el transporte de agua se produjo hacia el exterior de las muestras, produciendo la deshidratación de las muestras analizadas.

Estos resultados indicarían la existencia de dos tipos de procesos bien identificados. Por un lado, las salmueras de baja concentración ( $50$  y  $100 \text{ kg/m}^3$ ), que producen la hidratación de las muestras, y por otro la salmuera saturada ( $280 \text{ kg/m}^3$ ) que produce la deshidratación. En el primer caso, los valores de difusividad identificados resultaron similares entre sí como cabría esperar al aplicar el modelo, ya que la diferencia de concentración de salmuera está incluida en el mismo.

Por otro lado, estarían los salados a concentraciones intermedias ( $150$ ,  $200$  y  $240 \text{ kg/m}^3$ ), en los que los valores variables de difusividad identificadas indicarían la existencia de otros mecanismos de transporte que el modelo difusivo no es capaz de explicar con precisión.

## TRANSPORTE DE NaCl

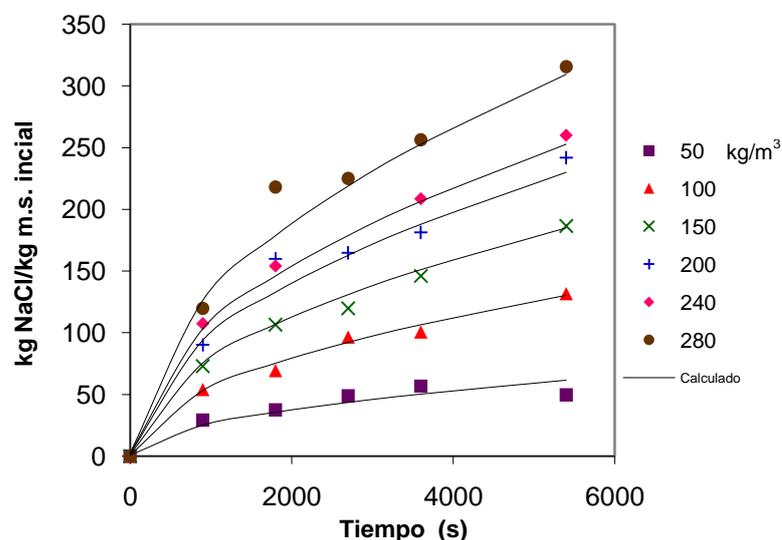
La evolución del contenido de NaCl de muestras de lomo durante el salado, se estudió utilizando un modelo similar al propuesto para el transporte de agua. Las difusividades de NaCl estimadas para cada uno de los tratamientos ensayados se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Coeficientes de difusión identificados y % de varianza explicada por el modelo para el transporte de NaCl en los tratamientos de lomo en salmuera (5 °C) a diferentes concentraciones.

Concentración de salmuera (kg/m <sup>3</sup> )	Difusividad (D <sub>s</sub> )	% de varianza explicada
	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 10^{-10}$	
50	1,24	90,88
100	2,04	99,23
150	2,11	99,00
200	1,99	96,44
240	1,73	90,89
280	1,96	96,13

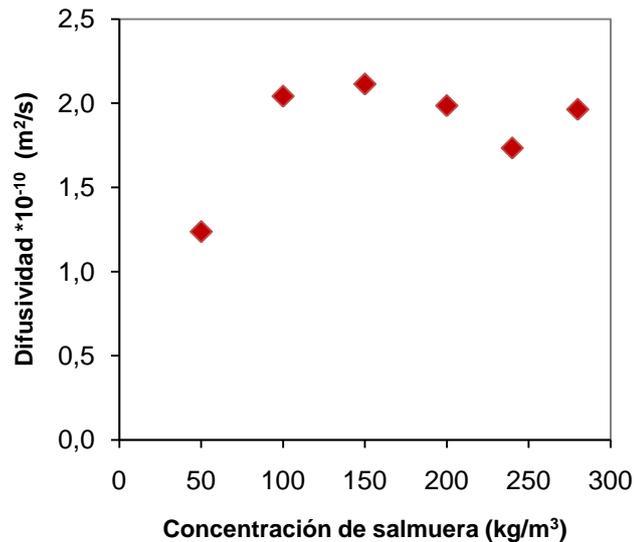
Respecto a la bondad del ajuste realizado por el modelo, es destacar el buen ajuste conseguido. Así, los porcentajes de varianza explicada se encuentran, en general, por encima del 96% llegando a ser superiores a 99% para los salados realizados con salmueras de 100 y 150 kg/m<sup>3</sup> de concentración. Esto indica que la distancia entre los puntos determinados experimentalmente y los calculados mediante la aplicación del modelo es relativamente pequeña.

Para evaluar el ajuste del modelo, también conviene comparar las tendencias que marcan los datos experimentales y calculados. En este caso, como se puede observar en la Figura 10, las tendencias resultaron muy similares. El porcentaje de varianza no explicada por el modelo, podría atribuirse al error experimental.



**Figura 10.** Evolución del contenido de NaCl en muestras de lomo. Tratamientos en salmueras a diferentes concentraciones (kg/m<sup>3</sup>). Modelo matemático aplicado a una geometría de lámina infinita.

En este caso, las diferencias de concentración de NaCl existentes entre la carne y la salmuera son muy importantes. Así, en las muestras de lomo fresco la fracción másica de sal es prácticamente despreciable frente a las concentraciones de las salmueras ensayadas. Estas diferencias tan importantes entre las fases suponen una importante fuerza impulsora del transporte de sal entre la salmuera y el lomo lo que generó un flujo importante de materia, el cual siempre tuvo lugar en el mismo sentido, hacia el interior de las muestras.



**Figura 11.** Evolución de los coeficientes de difusión de NaCl identificados en un tratamiento sólido-líquido de lomo en salmuera a diferentes concentraciones ( $5 \pm 1^\circ\text{C}$ ).

Los valores de difusividad aparente identificados para los diferentes tratamientos (Figura 11) no presentaron una tendencia clara con la concentración de la salmuera, oscilando entorno a  $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dado que el modelo utilizado considera como fuerza impulsora del transporte a la diferencia de concentraciones y dado que es ésta, la diferencia de concentraciones, la única variable que se modifica en los ensayos, es lógico que el valor de la difusividad identificada sea similar en todos los casos. Esto también indica que el modelo difusivo es apropiado para describir el transporte de NaCl en estos tratamientos.

Los valores de difusividad identificados son del orden de los identificados por otros autores para concentraciones superiores a  $150 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Así, Wood (1966) encontró utilizando salmueras de  $320 \text{ kg}/\text{m}^3$  a  $12^\circ\text{C}$  un coeficiente de  $2,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Fox (1980), en disoluciones de  $180 \text{ kg}/\text{m}^3$ , obtuvo un coeficiente de difusión de  $2,2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Siró et al (2008), por su parte, obtuvo en concentraciones de  $200 \text{ kg}/\text{m}^3$  a  $5^\circ\text{C}$  un coeficiente de  $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Sabadini et al. (1998) encontró un valor de  $2,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para el coeficiente de difusión de NaCl en músculo de ternera (*m. semimembranosus*) en soluciones saturadas a  $10^\circ\text{C}$ .

## CONCLUSIONES

A partir de los estudios realizados en los diferentes tratamientos de salado del músculo de cerdo *Longissimus dorsi* se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La concentración de la salmuera tuvo un efecto significativo ( $p < 0,05$ ) en la evolución del contenido de humedad y NaCl en las láminas de lomo de cerdo.
- Respecto a la evolución del contenido de humedad, el tratamiento en salmueras con concentraciones superiores a  $200 \text{ kg/m}^3$ , produjo una deshidratación de las muestras, y una hidratación con concentraciones inferiores. En concentraciones cercanas a  $200 \text{ kg/m}^3$ , no se observó una tendencia clara en la cinética de transporte.
- En el caso de la evolución del contenido de NaCl, para un mismo tiempo de tratamiento, el contenido de NaCl de las muestras se incrementó con la concentración de la salmuera utilizada.
- El modelo difusivo empleado para el transporte de agua, pese al pobre ajuste de los datos experimentales conseguidos, describió la tendencia de los mismos. La elevada variabilidad natural podría ser la causa más probable de este mal ajuste.
- Los valores de difusividad para el transporte de agua experimentaron claramente un decremento en su valor conforme aumentó la concentración de la salmuera.
- En el caso de la concentración de  $200 \text{ kg/m}^3$ , no fue posible ajustar el modelo ya que no se observó una cinética de transporte clara.
- El modelo difusivo resultó adecuado para describir la cinética de NaCl.
- Los valores de difusividad para el transporte de NaCl, oscilaron todos entorno a  $2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$ .

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Valencia, por la asignación de la Beca de Formación de Personal de Investigación (FPI), con la cual es posible la realización del presente trabajo.

Al Dr. D. Antonio Mulet Pons por abrirme las puertas de su grupo de investigación, en el cual he encontrado siempre la amistad y el apoyo por parte de mis compañeros.

Al Dr. D. Juan A. Cárcel Carrión, por guiarme en todo momento en la parte experimental y en la redacción del presente trabajo.

A mi familia, por su amor incondicional y la motivación que siempre me brindaron para iniciar esta nueva etapa en mi vida.

A Luis Miguel y a su familia, ya que gracias a su amistad y cariño me hacen sentir como en casa.

## REFERENCIAS

- A.O.A.C. (1997) Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists international. 16<sup>th</sup> edition, 3<sup>rd</sup> revision, March.
- Cárcel, J.A. 2003. Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cárcel, J.A., Benedito, J., Bon, J., Mulet, A., 2007. High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Science* 76, 611–619.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press. Londres. Reino Unido.
- Djelveh, G., Gros, J.B., 1988. Measurement of effective diffusivities of ionic and non-ionic solutes through beef and pork muscles using a diffusion cell. *Meat Science* 23, 11–20.
- Fox, J.B., 1980. Diffusion of chloride, nitrite and nitrate in beef and pork. *Journal of Food Science* 45, 1740–1744.
- Gerla, P.E., Rubiolo, A.C., 2002. A model for determination of multicomponent diffusion coefficients in foods. *Journal of Food Engineering* 56, 401–410.
- Graiver, N., Pinotti, A., Califano, A., Zaritzky, N., 2009. Mathematical modeling of the uptake of curing salts in pork meat. *Journal of Food Engineering* 95, 533-540.
- Graiver, N., Pinotti, A., Califano, A., Zaritzky, N., 2006. Diffusion of sodium chloride in tissue. *Journal of Food Engineering* 77, 910–918.
- Guiheneuf, T.M., Gibbs, S.J., Hall, L.D., 1997. Measurement of the inter-diffusion of sodium ions during pork brining by one-dimensional Na-23 magnetic resonance imaging (MRI). *Journal of Food Engineering* 31, 457–471.
- Hernández, P., Navarro, J. L. y Toldrá, F. (1999). Lypolytic and oxidative changes in two Spanish pork loin products: dry cured loin and pickled-cured loin. *Meat Science*, 51, 123-128.
- Jiokap Nono Y., Reynes M., Zakhia N., Raoult-Wack A. L. y Giroux F. (2002). Mise au point d'un procédé combine de déshydratation-impregnation par immersion et séchage de bananas (*Musa acuminata* groupe Cavendish). *Journal of Food Engineering*, 55, 231-236.
- Lambert, I. H., Nielsen, J.H., Andersen, H.J., y Ortennland N. (2001). Cellular model for induction of drip loss in meat. *Journal Agric. Food Chem.*, 49, 4876-4883.
- Lazarides, H. N., Gekas, V. y Mavroudis, N. (1997). Apparent mass diffusivities in fruit a vegetables tissues undergoing osmotic processing. *Journal of Food Engineering*, 31, 315-324.
- Lazarides, H. N., Katsanidis, E. y Nickolaidis, A. (1995). Mass transfer kinetics during osmotic preconcentration aiming at minimal solid uptake. *Journal of Food Engineering*, 25, 151-166.
- Le Maguer, M. (1988). Osmotic dehydration in food science: Review and future directions. En *Low Temperature Biotechnology. Engineering Applications and Engineering Contributions*. Macgrath and Diller (editores). The American Society of Mechanical Engineers (ASME) New York.
- Lipson, C. y Sheth, N. J. (1973). *Statistical design and analysis of engineering experiments*. McGraw-Hill. New York.
- MAPA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2010). Censos y producciones ganaderas. En: *Hechos y cifras del sector agroalimentario y del medio rural español*.
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and water diffusivity in vegetables. *Journal of Food Engineering*, 22, 329-348.
- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53, 1216-1219.
- Sabadini, E., Carvalho, B. C., Jr., Sobral, P. J. do A., y Hubinger, M. D. (1998). Mass transfer and diffusion coefficient determination in the wet and dry salting of meat. *Drying Technology*, 16, 2095–2115.
- Samir, M., Mahlau, M. y Furitsch, P. (1996). Comportamiento del consumidor español frente a la demanda de productos cárnicos (I). *EuroCarne*, 43, 35-44.
- Siró, I., Vén, Cs., Balla, Cs., Jónás, G., Zeke, I., Friedrich, L. (2008). Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. *Journal of Food Science*, 91, 363-362.

- Vestergaard, C., Lohmann Andersen, B., Adler-Nissen, J., (2007). Sodium diffusion in cured pork determined by  $^{22}\text{Na}$  radiology. *Meat Science* 76, 258–265.
- Wang, D., Tang, J., Correia, L., 2000. Salt diffusivities and salt diffusion in farmed Atlantic salmon muscle as influenced by rigor mortis. *Journal of Food Engineering* 43, 115–123.
- Wood, F. W. (1966). The diffusion of salt in pork muscle and fat tissue. *Journal of Science and Food Agriculture*, 17, 138–140.

## NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Superficie	$\text{m}^2$
C	Concentración de un componente	$\text{kg}/\text{m}^3$
C'	Concentración de un componente referido al sólido seco inicial	$\text{kg}/\text{kg}$ s.s. inicial
C <sub>s</sub>	Contenidos de soluto/sal	$\text{kg}_{\text{soluto}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$
C <sub>w</sub>	Contenido de agua	$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$
C <sub>we</sub>	Contenido de agua en equilibrio	$\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$
D	Difusividad	$\text{m}^2/\text{s}$
D <sub>ef</sub>	Difusividad efectiva	$\text{m}^2/\text{s}$
D	Distancia	m
J	Densidad de flujo	$\text{kg}/\text{sm}^2$
L	Semiespesor de la lámina	m
L	Longitud característica	m
M	Caudal másico	$\text{kg}/\text{s}$
m <sub>w</sub>	Masa del agua	kg
t	Tiempo	s