

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO
NATURAL



Secado de hígado de cerdo por aire caliente asistido mediante ultrasonidos de potencia

**TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS
ALIMENTOS**

ALUMNO: NURIA MARTÍNEZ SÁNCHEZ

**TUTOR/A: JOSÉ VICENTE GARCÍA PÉREZ
COTUTOR: JOSE JAVIER BENEDITO FORT**

CURSO 2018-2019

VALENCIA, JUNIO DE 2019

Autor: Nuria Martínez Sánchez

Tutor: José Vicente García Pérez

Cotutor: José Javier Benedito Fort

Valencia, Junio 2019

Título
Secado de hígado de cerdo por aire caliente asistido mediante ultrasonidos de potencia
Resumen
<p>El hígado de cerdo es una fuente rica de proteínas de elevado valor biológico, y bajo contenido en grasa, por lo que puede considerarse un excelente producto alimenticio. Sin embargo, en la actualidad debido a su fuerte aroma y textura genera un alto rechazo en el mercado y su consumo directo está descendiendo. Con el fin de aprovechar la fracción proteica del hígado es necesaria su deshidratación, para así estabilizar el producto y eliminar su mayor componente que es el agua. La deshidratación por aire caliente es una de las operaciones unitarias más importantes en el procesado de alimentos. A pesar de ello, puede provocar cambios importantes que pueden afectar a la calidad del producto especialmente cuando se emplean temperaturas elevadas. Es por ello que una alternativa al secado convectivo convencional podría ser el empleo simultáneo de ultrasonidos de potencia para acelerar el proceso y así reducir el tiempo de secado, lo que podría favorecer la calidad del producto.</p> <p>El objetivo principal de éste trabajo fue determinar la influencia de la temperatura en la cinética de secado de hígado de cerdo a diferentes temperaturas, por encima de 30 °C, y a su vez estudiar la influencia que tienen los ultrasonidos de potencia en dicho proceso. Para ello se realizaron experiencias de secado en un secadero convectivo a diferentes temperaturas (30, 40, 50, 60, 70 °C) con y sin aplicación de ultrasonidos y a una velocidad de aire de 2 m/s, todas las experiencias se realizaron por triplicado. A partir de la modelización de las cinéticas de secado con modelos teóricos y empíricos se determinó el efecto de los ultrasonidos en la cinética de proceso. Finalmente, se utilizó la ecuación de Arrhenius para cuantificar la influencia de la temperatura en los parámetros cinéticos de los modelos y se obtuvo la energía de activación.</p> <p>El secado de hígado de cerdo tuvo lugar en todo momento en el periodo de velocidad de secado decreciente. Los resultados de la modelización con el modelo difusivo pusieron de manifiesto el control del proceso por la resistencia interna a la transferencia de materia. La temperatura influyó en las cinéticas de secado de tal modo que a medida que se aumentó la temperatura el proceso de deshidratación se aceleró. La influencia de la aplicación de los ultrasonidos de potencia en el secado por aire caliente dependió de la temperatura del proceso. Los ultrasonidos aumentaron significativamente la velocidad del proceso, aproximadamente en un 30%, desde los 30 a los 50 °C, disminuyendo su efecto a 60 y 70 °C.</p>
Palabras clave
Deshidratación; difusividad; ultrasonidos potencia; hígado de cerdo; secado alta temperatura.

Autor: Nuria Martínez Sánchez

Tutor: José Vicente García Pérez

Cotutor: Jose Javier Benedito Fort

Valencia, Junio 2019

Title
Hot air drying of pork liver assisted by power ultrasound
Abstract
<p>Pork liver is a rich source of proteins of high biological value and low fat content, so it can be considered an excellent food product. However, currently due to its strong aroma and texture generates a high rejection in the market and its direct consumption is decreasing. In order to take advantage of the protein fraction of the liver, it is necessary to dehydrate it, in order to stabilize the product and eliminate its major component, which is water. Dehydration by hot air is one of the most important unit operations in food processing. In spite of this, it can cause important changes that can affect the quality of the product, especially when high temperatures are used. That is why an alternative to conventional convective drying could be the simultaneous use of power ultrasound to accelerate the process and thus reduce the drying time, which could favor the quality of the product.</p> <p>The main objective of this work was to determine the influence of temperature on the kinetics of pork liver drying at different temperatures, above 30 °C, and in turn to study the influence of power ultrasound in this process. To this end, drying experiments were carried out in a convective dryer at different temperatures (30, 40, 50, 60, 70 °C) with and without ultrasonic application and at an air speed of 2 m/s, all the experiments were carried out in triplicate. From the modeling of drying kinetics with theoretical and empirical models, the effect of ultrasound on the kinetics of the process was determined. Finally, the Arrhenius equation was used to quantify the influence of temperature on the kinetic parameters of the models and the activation energy was obtained.</p> <p>The pork liver drying took place at all times in the period of decreasing drying speed. The results of the modeling with the diffusive model showed the control of the process by the internal resistance to the transfer of matter. The temperature influenced the drying kinetics in such a way that as the temperature was increased the dehydration process accelerated. The influence of the application of power ultrasound in hot air drying depended on the temperature of the process. The ultrasound significantly increased the speed of the process, approximately 30%, from 30 to 50 °C, decreasing its effect at 60 and 70 °C.</p>
Keywords
Dehydration; diffusivity; power ultrasound; pork liver; high-temperature drying.

Quiero agradecer en primer lugar, a mis padres por haberme dado la oportunidad de poder tomar el camino que en su momento elegí y por el apoyo que he recibido durante todo éste tiempo.

También, quiero agradecer toda la ayuda aportada en el desarrollo de éste trabajo a Eduardo y felicitarle porque va a emprender una nueva etapa como doctorando en el laboratorio donde hemos estado trabajando, se lo merece más que nadie.

A mi director académico, José Vicente García Pérez, por la oportunidad de realizar éste trabajo fin de carrera y por la ayuda recibida.

Por último, pero no menos importante, a mi hermano Adrián que me ha acompañado en la convivencia y apoyado incondicionalmente durante los dos últimos años de carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE TABLAS	III
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Hígado como co-producto en la industria cárnica	1
1.2 Aplicaciones actuales y futuras del hígado de cerdo	2
1.3 Secado por aire caliente.....	3
1.3.1 Generalidades	3
1.3.2 Proceso de secado en productos cárnicos.....	5
1.4 Ultrasonidos de potencia	6
1.4.1 Generalidades	6
1.4.2 Uso de ultrasonidos de potencia en procesos de secado	7
2. OBJETIVOS	9
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
3.1 Materia prima.....	10
3.2 Determinación del contenido de humedad	11
3.3 Preparación de las muestras para el secado	11
3.4 Secadero convectivo a altas temperaturas	12
3.5 Experiencia de secado	15
3.6 Isotherma de sorción del hígado de cerdo. Modelo de GAB.....	16
3.7 Modelización.....	17
3.7.1 Modelo de Weibull	17
3.7.2 Modelo difusivo.....	18
3.7.3. Ajuste de modelos	18
3.8 Energía de activación	19
3.9 Análisis estadístico	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1 Isotherma de sorción. modelo de GAB.....	21
4.2 Influencia de la temperatura de secado en el proceso de deshidratación	22
4.3 Influencia de los ultrasonidos	24
4.4 Modelización de las cinéticas de secado	26
4.4.1 Modelo de Weibull	26
4.4.2 Modelo difusivo.....	29
4.4.3 Estimación de la energía de activación	32
5. CONCLUSIONES.....	35
6. BIBLIOGRAFÍA.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la producción de carne de cerdo en España	1
Figura 2 Transporte del agua durante la deshidratación en el alimento	3
Figura 3. Etapas del secado convectivo.....	4
Figura 4. Propagación de la onda ultrasónica. Parámetros que caracterizan los ultrasonidos	6
Figura 5. Fotografía de la cara diafragmática del hígado.....	10
Figura 6. Proceso de deshidratación del hígado de cerdo	11
Figura 7. Sacabocados y muestra obtenida para su posterior secado	11
Figura 8. Cilindros de hígado colocados en el portamuestras	12
Figura 9. Cámara de secado asistida por Ultrasonidos de Potencia (US).	13
Figura 10. Esquema detallado del secadero	14
Figura 11. Aplicación informática del secadero	15
Figura 12. Ajuste del modelo de GAB	22
Figura 13. Cinéticas de secado a diferentes temperaturas sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US).....	23
Figura 14. Evolución de la velocidad de secado con el tiempo, cinética realizada a 30 °C	24
Figura 15. Cinéticas de secado a diferentes temperaturas con aplicación de Ultrasonidos de Potencia (US)	24
Figura 16. Comparación de las cinéticas de secado de hígado de cerdo con (US) y sin (NO US) la aplicación de Ultrasonidos de Potencia a 30 y 70 °C	25
Figura 17. Gráfico de interacción del parámetro β del modelo de Weibull a las diferentes temperaturas de secado y con-sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia.....	27
Figura 18. Gráfico de interacción del parámetro α del modelo de Weibull a las diferentes temperaturas de secado y con-sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia.....	27
Figura 19. Ajuste del modelo de Weibull a la cinética de secado a 30 °C sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US) para los valores experimentales (Exp) y los valores calculados (Calc).....	28
Figura 20. Ajuste del modelo de Weibull a la cinética de secado a 30 °C con aplicación de Ultrasonidos de Potencia (US) para los valores experimentales (Exp) y los valores calculados (Calc).....	28
Figura 21. Humedad experimental y calculada para la experiencia a 30 °C con aplicación de Ultrasonidos de Potencia)(US(.....	29
Figura 22. Humedad experimental y calculada para la experiencia a 30 °C con aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US).....	29
Figura 23. Gráfico de interacciones del parámetro D_e del modelo difusivo a las diferentes temperaturas de secado y con-sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia.....	31
Figura 24. Ajuste del modelo difusivo a la cinética de secado a 30 °C sin el empleo de Ultrasonidos de Potencia (NO US), para los valores experimentales (Exp) y los Calculados (Calc)	31
Figura 25. Humedad experimental y calculada para la experiencia a 40 °C sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia.....	32
Figura 26. Ajuste de la ecuación de Arrhenius a la evolución de la difusividad efectiva (D_e) con la inversa de la temperatura (T)..	33
Figura 27. Ajuste de la ecuación de Arrhenius a la evolución de la inversa del parámetro β con la inversa de la temperatura (T).	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Experiencias de secado realizadas.	15
Tabla 2. Relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio a una temperatura de 50 °C.	21
Tabla 3. Parámetros obtenidos para la isoterma de sorción a 50°C con el modelo de GAB.	22
Tabla 4. Resultados del modelo de Weibull para experiencias con y sin la aplicación (NO US) de Ultrasonidos de Potencia (US).....	26
Tabla 5. Resultados del modelo difusivo. Difusividad efectiva (D_e), porcentaje de varianza aplicada (VAR) y error medio relativo para las experiencias con y sin el empleo de ultrasonidos de potencia.	30

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Hígado como co-producto en la industria cárnica

En la Unión Europea, la industria alimentaria es el sector más importante, con una elevada cifra de negocios (MAPAMA, 2018). En España la industria de alimentación y bebidas es la primera rama del sector industrial, según la última Estadística Estructural de Empresas del INE (MAPAMA, 2018).

La industria cárnica es el tercer subsector en cuanto a número de empresas en nuestro país, además dentro del sector de industrias de bebidas y alimentación ocupa el primer puesto con respecto al resto de industrias (ANICE, 2015). Concretamente, el sector porcino presenta un especial interés dentro de la economía española ya que supone el 12,7% de la Producción Final Agraria y alcanza el 36,4% de la Producción Final Ganadera (MAPAMA, 2018). En el año 2016, la carne de cerdo fresca o refrigerada fue uno de los productos tanto exportados como importados más representativos de la economía española y en el año 2017, el sector porcino continuó su expansión y consolidación como uno de los líderes en el mercado mundial de la carne de porcino. España es el cuarto productor de carne de porcino a nivel mundial, después de China, EEUU y Alemania (MAPAMA, 2018).

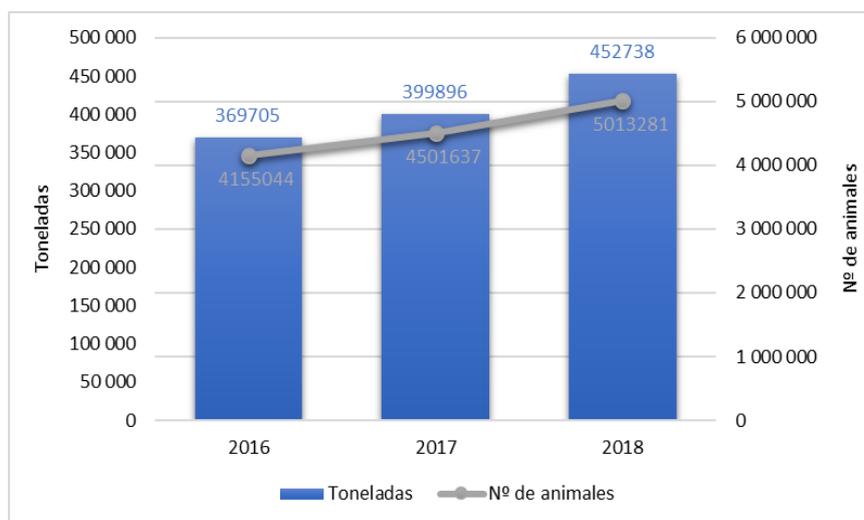


Figura 1. Evolución de la producción de carne de cerdo en España (MAPAMA, 2018)

La producción de carne de cerdo ha aumentado considerablemente en los últimos años (Figura 1). Así, en 2018, y con un crecimiento del 5,2% respecto a 2017, la carne de porcino española registró un nuevo hito de producción, al alcanzar los 4,5 millones de toneladas, lo que marca un año más un nivel histórico nunca alcanzado (ANICE, 2018). España es uno de los mayores consumidores de porcino de la UE-28,

en 2017 se registró un consumo per cápita promedio de 41,2 kg/hab/año (INTERPORC, 2018).

El hígado de cerdo se considera como un co-producto de la industria cárnica debido a la baja demanda que presenta por parte de los consumidores. Se emplea para productos elaborados tales como el paté. Actualmente, no existen datos que indiquen la producción de hígado de cerdo, pero suponiendo que los cerdos se sacrifican con un peso de 100 kg aproximadamente y que cada hígado pesa 1,5 kg de media, se puede afirmar que la producción de hígado de cerdo podría alcanzar en 2018 las 6000 toneladas. Esta elevada cantidad supone un elevado volumen dentro de la industria cárnica de un producto de bajo valor añadido. Por lo tanto, debido a que esto puede suponer un problema ambiental y económico para las empresas del sector, es necesario buscar nuevas aplicaciones para su aprovechamiento.

1.2 Aplicaciones actuales y futuras del hígado de cerdo

La carne de cerdo se compone fundamentalmente por tejido muscular que contiene agua, sales minerales, diferentes vitaminas, proteínas, lípidos, tejido conectivo y un bajo contenido de hidratos de carbono. Aunque hay que tener en cuenta que la composición de la carne de cerdo depende de varios factores tanto intrínsecos (edad, raza, sexo, alimentación...) como extrínsecos (transformaciones tecnológicas) (Villarino, 2004)

El hígado de cerdo es una fuente rica de proteínas de elevado valor biológico (21,40%), de aminoácidos esenciales, vitaminas y minerales (1%) y su contenido en grasas totales es del 3,7% (FUNIBER, 2018). Debido a su composición nutricional, a su alto contenido en proteínas y bajo contenido en grasa, el hígado puede ser un excelente producto alimenticio. Sin embargo, en la actualidad, debido a su fuerte aroma y a su textura genera un rechazo en el mercado y su consumo directo está descendiendo. Es por eso que actualmente solo se emplea para la elaboración de patés o como ingrediente en algunos platos precocinados. Otra de las aplicaciones dentro de la industria alimentaria es la obtención de la enzima transglutaminasa para crear nuevos productos con un menor coste, como la carne reconstituida (Barreiro et al., 2003). También se emplea el hígado para la elaboración de comida animal o como materia prima en productos farmacéuticos, puesto que es una excelente fuente de vitamina B12, B6, ácido fólico y vitamina A (Jayathilaka, et al. 2011).

Como aplicaciones futuras de éste co-producto, podría considerarse su aprovechamiento para obtener una serie de ingredientes con funcionalidad tecnológica, como sería la separación y purificación de su fracción proteica puesto que

cada vez hay una mayor demanda de proteína cárnica. La proteína del hígado de cerdo presenta un alto valor biológico y aporta todos los aminoácidos esenciales (ANICE, 2018). Dichas proteínas podrían reemplazar a otras más alergénicas. En el caso de las proteínas que no presenten ninguna funcionalidad se pueden hidrolizar y así obtener péptidos con actividad microbiana y antioxidante (Téllez y Castaño, 2010).

Para la obtención de la proteína del hígado de cerdo, podría consumirse directamente como un ingrediente proteico o bien se podría llevar a cabo un desgrasado del mismo con el objetivo de aumentar la riqueza proteica del ingrediente. En ambas situaciones, se ha de realizar una deshidratación previa, para así eliminar el agua del hígado ya que supone un 73% de su composición y obtener un producto estable desde un punto de vista microbiológico.

1.3 Secado por aire caliente

1.3.1 Generalidades

La deshidratación por aire caliente consiste en la aplicación de una corriente de aire o vapor de agua sobrecalentado que provoca un flujo de calor desde el medio al alimento y un flujo de materia (agua) en dirección opuesta (García-Pérez, 2007). Es una de las operaciones unitarias más importantes en el procesado de alimentos y una de las más antiguas. Si hablamos de alimentos sólidos como es el caso de la materia prima utilizada en el proyecto actual, se entiende por deshidratación la operación básica por la que el agua contenida en el sólido se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases (Figura 3) (Fito, et al. 2001).

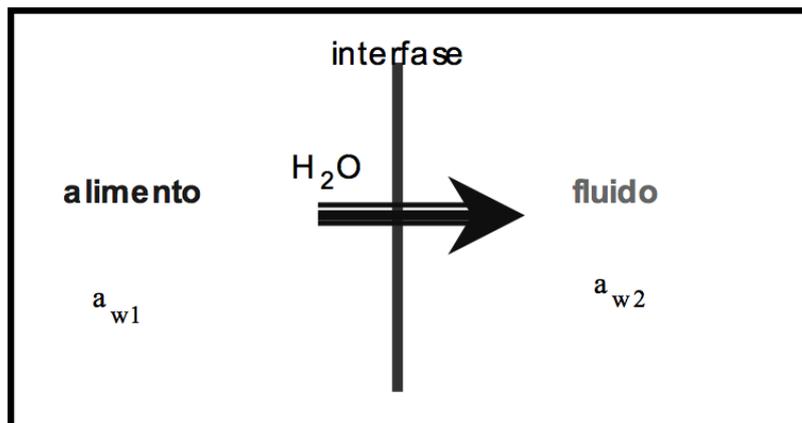


Figura 2. Transporte del agua durante la deshidratación en el alimento (Fito, P et al. 2001)

La deshidratación disminuye la actividad de agua, por tanto limita el desarrollo de microorganismos, reacciones de oxidación y enzimáticas que podrían ocurrir durante el almacenamiento. La reducción de la actividad de agua también lleva asociada una pérdida en volumen y en peso del alimento, hecho que facilita su transporte y almacenamiento. Sin embargo, aunque esta es una de las técnicas más empleadas, puede provocar cambios indeseables en los alimentos como la pérdida de elementos volátiles, cambios en la textura, encogimiento, disminución de los componentes bioactivos o cambios de color, que afectan a la calidad del producto final. Éstos cambios dependen de la técnica de secado empleada o de la temperatura, es por ello que se han de definir las condiciones de secado más apropiadas (Contreras, 2014).

Generalmente, en el secado por aire caliente se pueden distinguir tres etapas, una de velocidad de secado creciente (A), otra de velocidad de secado constante (B) y la última de velocidad de secado decreciente (C) (Figura 3) (García-Pérez, 2007). En la etapa de velocidad creciente, el producto se calienta y aumenta la velocidad de evaporación del agua de la superficie del producto, es el periodo en el cual el producto se adapta a las condiciones expuestas. En la etapa de velocidad constante el movimiento de la humedad dentro del sólido es lo bastante rápido como para mantener saturada la superficie. La velocidad de secado está controlada por la evaporación del agua y su transferencia desde la superficie saturada del material hasta el medio que lo rodea. La transferencia del agua se realiza por difusión. Ésta etapa finaliza cuando el contenido en humedad del sólido desciende por debajo de la humedad crítica. Y en la última etapa, de velocidad decreciente, la superficie del sólido deja de estar saturada, es decir aparecen zonas secas, y el proceso pasa a ser controlado por la resistencia interna a la transferencia de materia.

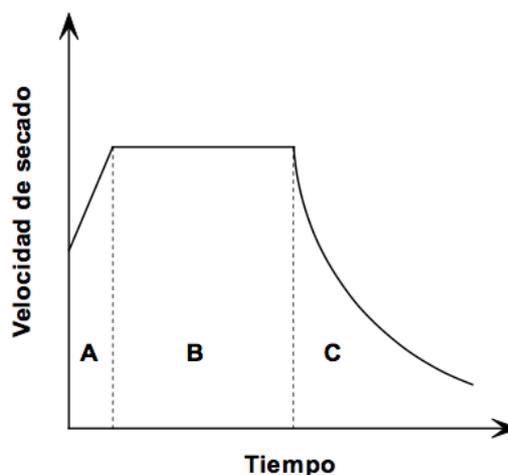


Figura 3. Etapas del secado convectivo. (García Perez, 2007). A. Periodo de velocidad creciente, B. Periodo de velocidad constante, C. Periodo de velocidad decreciente.

El conocimiento de las isoterms es de particular importancia en el diseño de procesos de secado de productos, especialmente en la determinación del punto final de secado que garantiza la seguridad microbiológica, rentabilidad económica y calidad del producto (Faria et al., 1998; Belghit et al., 1999; Rahman et al., 2002). La isoterma de sorción de agua relaciona, a una temperatura constante, el contenido de humedad de equilibrio con la actividad termodinámica del agua en el producto, en un intervalo dado de humedad o actividad. En el equilibrio, la actividad de agua es igual a la humedad relativa del aire que rodea al producto a una temperatura determinada (Vargas et al. 2014).

El secado por aire caliente permite obtener productos homogéneos, aunque debido al uso de elevadas temperaturas, se puede producir una pérdida de calidad. Es por ello que es interesante el uso de nuevas tecnologías para su mejora. En ese sentido, los ultrasonidos de potencia se han utilizado para acelerar el proceso de secado acortando los tiempos de proceso de frutas y vegetales, pero su aplicación a productos cárnicos ha sido abordada en menos profundidad (García-Pérez, 2007).

1.3.2 Proceso de secado en productos cárnicos

La deshidratación de la carne se ha realizado desde la antigüedad utilizando la energía solar colocando la carne sazonada al aire libre para que se deshidratara, por efecto del aire que estaba a temperatura elevada y a humedad baja. Hoy en día el proceso de secado a elevadas temperaturas sigue teniendo una gran importancia dentro del sector cárnico, como un proceso de transformación y/o conservación de productos perecederos en productos estables debido a la disminución de la actividad de agua. Debido a la gran influencia de las condiciones climáticas y por razones de seguridad, hoy en día se lleva a cabo un proceso de secado en cámaras climatizadas ventiladas en las que el producto se mantiene a una temperatura constante en una atmósfera controlada (Petrova, et al. 2015). No obstante, dicho proceso tiene todavía hoy un elevado potencial de mejora, debido a que existen dos principales problemas vinculados con el secado: el riesgo de alteración de la forma, la textura y de la calidad nutricional y organoléptica del producto, y el segundo es el consumo energético de la operación (Boulogne, et al. 2008).

1.4 Ultrasonidos de potencia

1.4.1 Generalidades

Se definen como ultrasonidos a aquellas ondas acústicas cuya frecuencia es superior a la audible por el ser humano, es decir por encima de los 20 kHz. Todos los sonidos son ondas mecánicas que se repiten a lo largo del tiempo. Los ultrasonidos necesitan un medio material para poder propagarse (Mulet et al., 1999), pueden ser de dos tipos, de (i) señal o (ii) potencia que se utilizan para el (i) control de procesos y productos o para (ii) intensificar/mejorar los mismos.

Los parámetros que caracterizan las ondas ultrasónicas son: el periodo (tiempo empleado en completar un ciclo), la amplitud (altura de la onda, intensidad o volumen del sonido), la velocidad (depende del medio a atravesar), la frecuencia (periodos o ciclos que ocurren en un segundo) y longitud de onda (lo que recorre una onda en un ciclo o periodo), detallados en la Figura 4.

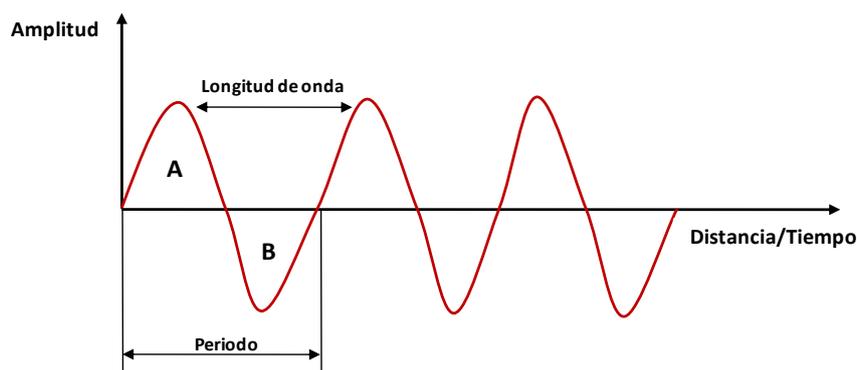


Figura 4. Propagación de la onda ultrasónica. Parámetros que caracterizan los ultrasonidos.

En general, la producción de ultrasonidos consiste en la conversión de cualquier otro tipo de energía en energía acústica (Carlin, 1972). Los dos componentes principales de un sistema ultrasónico son la fuente de energía y el transductor (Cárcel, 2003). El transductor se encarga de transformar la energía proporcionada por la fuente (eléctrica, mecánica o magnética) en energía acústica con las características de intensidad y frecuencia deseadas (Recuero, 1995; García-Pérez, 2007). Los transductores ultrasónicos pueden ser de 3 tipos: operados mediante fluidos, magnetostrictivos y piezoeléctricos.

En 1917, cuando Paul Langevin y Chilowsky produjeron el primer generador piezoeléctrico de ultrasonidos, fue la primera vez que se aplicaron los ultrasonidos en

el ámbito comercial. Desde ese momento se han empleado en numerosas aplicaciones y se han ido expandiendo, como en la limpieza y desinfección, ya que tienen la ventaja particular de alcanzar grietas y zonas que la limpieza convencional no puede (Boucher, 1980), o para la preparación de emulsiones a partir de sopas, salsas, ketchup y mayonesa (Mason, 1998).

1.4.2 Uso de ultrasonidos de potencia en procesos de secado

Los ultrasonidos de potencia, también conocidos como de alta intensidad o de baja frecuencia, son una tecnología prometedora en el campo del procesado de alimentos (Santos, 2013). Ésta técnica ha sido reconocida durante muchos años debido a su gran potencial para su uso en una gran variedad de procesos (Mason, 1999).

La aplicación de ultrasonidos de potencia en el proceso de deshidratación pretende conseguir la reducción del tiempo de secado sin provocar un calentamiento significativo (Gallego-Juárez et al. 2007). La deshidratación asistida por ultrasonidos puede llevarse a cabo a temperaturas mas bajas que sin el empleo de los mismos, y por lo tanto, la degradación del producto puede ser menor (Mason, 1998). Sin embargo, la eficiencia de la aplicación de los ultrasonidos depende en gran medida de las variables del proceso, tales como la temperatura, la velocidad o la potencia aplicada (García-Pérez et al. 2007), al mismo tiempo que del producto a deshidratar. En términos generales, las variables del proceso pueden condicionar el rendimiento ultrasónico debido a su influencia en la relación de la energía ultrasónica disponible, la propagación ultrasónica y la estructura del producto (García-Pérez, et al. 2012).

Para la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo se han empleado emisores de placa escalonada rectangular o circular y emisores de cilindro vibrante. La placa escalonada permite trabajar en contacto directo con el alimento que se deshidrata, el contacto entre el emisor y el producto facilita la transferencia de energía acústica, proporcionando una mejora en la propagación de la energía. Sin embargo, los sistemas por contacto directo tienen un inconveniente, la adaptación del elemento vibrante a los secadores conectivos convencionales (Soriano, 2014). Con el fin de aumentar la adaptabilidad, se han desarrollado sistemas emisores eficientes sin que exista la necesidad de contacto directo entre el elemento vibrante y el producto (García-Pérez, 2007). Dicho sistema se ha empleado para el secado convectivo de alimentos como la zanahoria y piel de limón (García-Pérez et al. 2009), caquis (Cárcel et al. 2010), berenjenas y piel de naranja (Ortuño et al. 2010).

A pesar del potencial que tienen los ultrasonidos de potencia, actualmente la aplicación de esta tecnología en el secado de productos está poco desarrollada y pocos trabajos han abordado el tratamiento de matrices proteicas, como la carne o pescado (Ozuna, et al. 2014). Esto es debido en gran medida a que su aplicación, y desarrollo ha sido muy lento debido a problemas en el diseño de generadores y sistemas de aplicación ultrasónicos de potencia de alto rendimiento (Gamboa-Santos. et al. 2012).

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo fue determinar la influencia de la temperatura en la cinética de secado de hígado de cerdo a diferentes temperaturas, por encima de 30°C, y a su vez estudiar la influencia que tienen los ultrasonidos de potencia en dicho proceso. En base a este objetivo principal, se plantearon los siguientes objetivos particulares:

- Determinar la influencia de la temperatura en la velocidad de secado.
- Evaluar la influencia de los ultrasonidos de potencia en la cinética de secado.
- Modelizar las cinéticas de secado empleando modelos empíricos y teóricos.
- Determinar la energía de activación del proceso.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materia prima

En este trabajo experimental se utilizaron hígados de cerdo frescos que fueron adquiridos en un mercado local (Cabañal, Valencia). Antes de la realización de las experiencias, se dividió el hígado en cuatro partes: lóbulo lateral derecho, lóbulo medial derecho, lóbulo lateral izquierdo y lóbulo medial izquierdo (Figura 5).

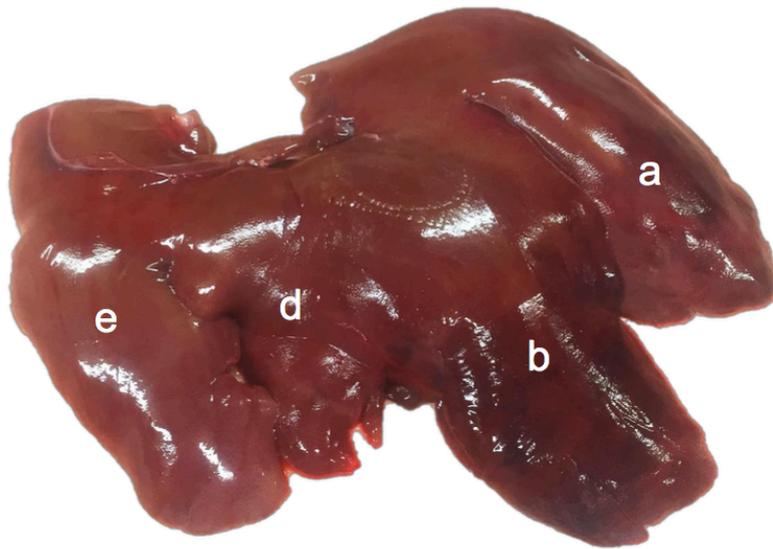


Figura 5. Fotografía de la cara diafragmática del hígado. Se distingue: (a) lóbulo lateral izquierdo, (b) lóbulo medial izquierdo, (d) lóbulo medial derecho y (e) lóbulo lateral derecho.

Una vez dividido el hígado, se envasó cada parte por separado a vacío y posteriormente, se congelaron en un abatidor de temperatura (240 min a -18°C , King ABF 05 C, Everlasting, España) Posteriormente, se mantuvieron en congelación (-18°C) hasta el inicio de las experiencias (protocolo de acopio de hígado fresco descrito en el anexo I).

3.2 Determinación del contenido de humedad

Para determinar la humedad inicial del hígado de cerdo en cada una de las experiencias, se empleó el método de la AOAC nº 940.44 (AOAC, 1997). En primer lugar, para la preparación de las muestras se trituró una porción de hígado (Manta BL201, 200W, España) (Figura 6) y a continuación se añadieron 2 g de la muestra resultante a un pesasustancias. Se añadieron 2 g de arena para disgregar la muestra y con la ayuda de etanol al 96% v/v se homogenizó todo. Seguidamente, el pesasustancias se llevó a una estufa de secado por convección (ED 115, Binder GmbH, Alemania) a 105 °C durante 24 h. Para finalizar, se dejaron enfriar los pesasustancias en un desecador y se pesaron.

Se calculó el contenido en humedad experimental a partir de la variación del peso y por triplicado (tal y como se describe en el Anexo II)



Figura 6. Proceso de deshidratación de hígado. Trituración de la muestra (izquierda); Preparación de pesasustancias (derecha).

3.3 Preparación de las muestras para el secado

Se obtuvieron muestras cilíndricas de las diferentes partes del hígado de diámetro 12,6 mm y 15 mm de altura utilizando un sacabocados (Figura 7). La obtención de los cilindros se llevó a cabo tras el atemperamiento del hígado en nevera durante 3 horas a una temperatura de 2°C. Se obtuvieron un total de 16 cilindros por cada experiencia.

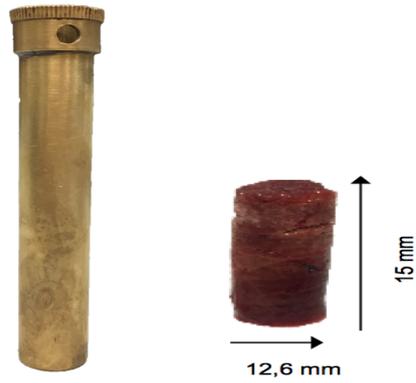


Figura 7. Sacabocados y muestra obtenida para su posterior secado

Los cilindros se colocaron en un porta muestras, como se muestra en la Figura 8. Una vez colocados las 16 muestras cilíndricas se procedió a introducirlo en el equipo de secado. En el anexo II se describe de manera más detallada el proceso de obtención de muestras.



Figura 8. Cilindros de hígado colocados en el portamuestras

3.4 Secadero convectivo a altas temperaturas

Las experiencias de secado se llevaron a cabo en un secadero convectivo (Figura 9) de aire caliente a escala de laboratorio a diferentes temperaturas, con y sin aplicación de ultrasonidos de potencia. Dicho secadero fue desarrollado en el departamento de Tecnología de Alimentos de la UPV.

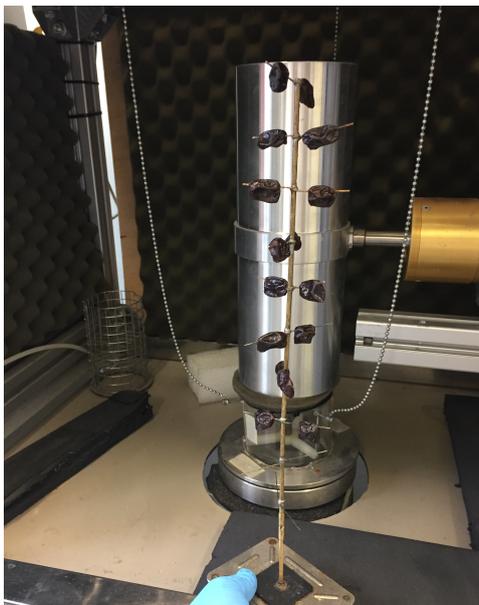


Figura 9. Cámara de secado asistida por ultrasonidos de potencia.

El sistema está constituido por un sistema de ventilación, el cual posee un soplante centrífugo de media presión (COT-100, Soler & Palau, Barcelona, España) que impulsa el aire de secado, a través de las resistencias de calefacción, hacia la cámara de secado. La velocidad del aire impulsado se controla por medio del PC que actúa sobre un variador de frecuencia (Inverter DV-551, Panasonic, EEUU). La velocidad del aire (± 0.1 m/s) se mide mediante un anemómetro de rueda alada (Wilh. Lambrecht GmbH, Göttingen, Alemania). El anemómetro está conectado a un instrumento indicador/convertidor (TTM-104, Redlion, EEUU) que digitaliza el valor de la velocidad del aire (García Pérez, 2007).

El secadero dispone de resistencias para el calentamiento del aire de secado. El sistema presenta una potencia total de 300 W a 220 V. Posee una termorresistencia Pt-100 para medir la temperatura del aire. El sistema calefactor está controlado por el ordenador que actúa sobre un variador de intensidad que alimenta a las resistencias (Nixa 80 A, Valencia, España).

La cámara de secado (Figuras 9 y 10) está constituida por un cilindro portamuestras vibrante accionado por un transductor ultrasónico piezoeléctrico tipo sándwich (número 9 Figura 10). El portamuestras permite conseguir una distribución aleatoria de muestras en la cámara de secado y no provoca perturbación alguna del campo acústico. El secadero dispone de un sistema de pesada automático de las muestras que utiliza una balanza (PM4000, Mettler Toledo, EEUU) (número 12 Figura 10) conectada a un ordenador. De este modo, se registra la evolución del peso de las muestras durante toda la experiencia

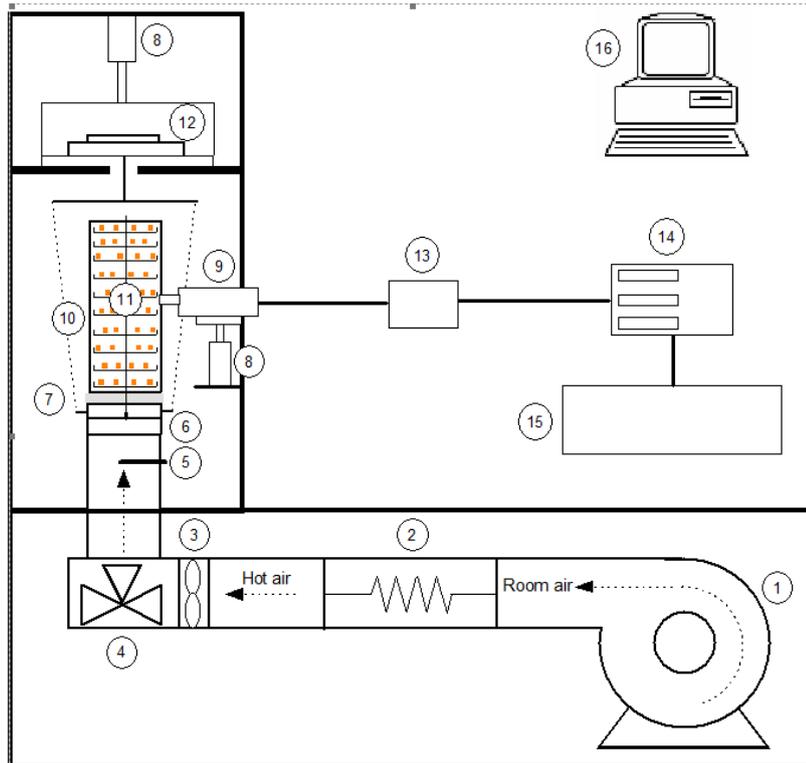


Figura 10. Esquema detallado del secadero (García Pérez, 2007). 1.Ventilador, 2.Resistencias eléctricas, 3. Anemómetro, 4. Válvula de 3-vías, 5.Pt-100, 6.Cámara de metacrilato, 7.Material de acople plástico, 8.Cilindros de desplazamiento neumáticos, 9.Transductor ultrasónico, 10.Cilindro vibrante, 11.Portamuestras, 12.Balanza, 13.Unidad de acoplamiento de impedancias, 14.Controlador de impedancias, 15.Generador ultrasónico.

El resto del sistema ultrasónico está constituido por un generador ultrasónico (Diseñado y construido en el Instituto de Acústica, CSIC, España) el cual se encarga de generar la señal eléctrica a la frecuencia de resonancia (21,8 kHz) y de su amplificación y una una caja de impedancias para la optimización eléctrica del sistema.

Se empleó una aplicación informática desarrollada en Microsoft Visual Basic, para la supervisión de las experiencias de secado (Figura 11). El programa permite seleccionar los valores de consigna de las variables de secado (temperatura y velocidad) y el intervalo de tiempo entre pesadas. Además, el programa genera un archivo de datos con toda la información relativa al proceso de secado, es decir, la evolución del peso de las muestras, la temperatura y velocidad del aire de secado (García-Pérez, 2007).

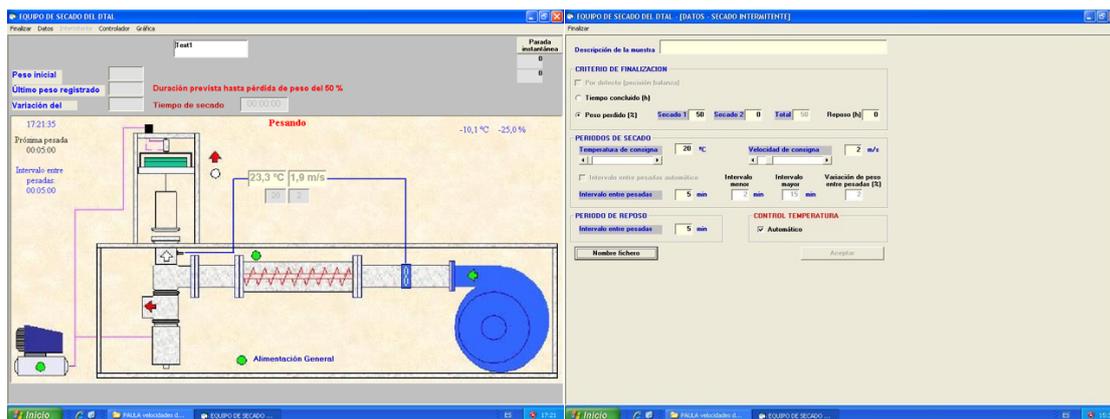


Figura 11. Aplicación informática del secadero

Las condiciones ambientales de cada experiencia, es decir, la temperatura y humedad relativa ambiental se determinaron accediendo a la página web de la estación meteorológica más cercana al puesto de trabajo, la estación meteorológica de Benimaclet (Valencia).

3.5 Experiencia de secado

La finalidad con la que se llevaron a cabo las experiencias de secado fue la de determinar cómo afectan las condiciones de secados a la cinética del proceso. Se realizaron experiencias a una velocidad constante del aire, 2 m/s y a temperaturas diferentes (30, 40, 50, 60, 70 °C), con y sin aplicación de ultrasonidos de potencia (suministrando 50 W al transductor ultrasónico). Se realizaron 3 repeticiones para cada condición de secado diferente (Tabla 1), lo que hace un total de experiencias de $5 \times 2 \times 3 = 30$. El criterio de finalización del proceso de secado fue que la muestra alcanzase una pérdida de peso del 60% del inicial. El intervalo de pesada de las muestras fue cada 5 minutos.

Tabla 1. Experiencias de secado realizadas.

Temperatura (°C)	30	40	50	60	70
Réplicas	x3 con US x3 sin US				

3.6 Isoterma de sorción del hígado de cerdo. Modelo de GAB.

Debido a que no existían datos de isotermas de sorción de hígado de cerdo, ni de otros animales, se llevó a cabo la determinación experimental de la isoterma de sorción. Para su obtención se deshidrató hígado de cerdo, el cual había sido triturado previamente, durante diferentes tiempos (desde 1 hasta 48 horas) para así conseguir diferentes contenidos de humedad. Se colocaron 2 g de hígado en crisoles formando una lámina fina y se introdujeron en una estufa de aire caliente (ED 155, Binder GmbH, Alemania) a una temperatura de 45 °C a diferentes tiempos. Posteriormente, las muestras se dejaron durante 24 h para obtener una distribución homogénea del contenido en humedad y se midió la actividad de agua a 50 °C con un higrómetro eléctrico (Novasina, two TH200 model and one AW SPRINT TH500 model). Dicha medida de actividad de agua se llevó a cabo por triplicado para cada una de las muestras deshidratadas empleando el método citado anteriormente en el apartado 3.2 (García-Pérez, 2007).

Para el cálculo de la humedad de equilibrio es necesaria la isoterma del producto. Para ello se modelizaron las isotermas experimentales empleando el modelo de GAB, uno de los modelos más utilizados para describir las isotermas de alimentos (García Pérez et al., 2008) y mediante la Ecuación 1 se determinó la humedad de equilibrio.

$$W_e = W_m \frac{C \cdot K a_w}{(1 - K a_w)(1 + (C - 1)K a_w)}$$

Ecuación 1

a_w : Actividad de agua

W_e : Humedad en el equilibrio del alimento (kg agua/kg materia seca)

W_m : Humedad en la monocapa (kg agua/kg materia seca)

C y K : Constantes del modelo de GAB , *adimensionales*

El ajuste del modelo de GAB se realizó del mismo modo que para los modelos cinéticos, tal y como se expone en el apartado 3.7.3. En este caso, se identificaron los valores de los parámetros de la ecuación de GAB (W_m , C y K) que minimizaron el sumatorio de los errores cuadráticos entre la humedad de equilibrio experimental y calculada.

3.7 Modelización

La modelización matemática de las cinéticas de secado se llevó a cabo mediante dos modelos diferentes, un modelo teórico basado en las leyes difusionales (apartado 3.7.2) y un modelo empírico (apartado 3.7.1).

3.7.1 Modelo de Weibull

El modelo empírico de Weibull, fue utilizado para la descripción matemática de las cinéticas de secado. Está basado en una función probabilística para describir el comportamiento de sistemas complejos variantes. Dicho modelo fue desarrollado en 1930 por W. Weibull (Cunha et al, 1998). El modelo de Weibull se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\psi = e^{\left(-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right)}$$

Ecuación 2

ψ : humedad adimensional

t : tiempo en segundos

α y β : parámetros característicos del modelo de Weibull.

En cuanto a los parámetros característicos del modelo, β es considerada como la constante de la velocidad de la reacción, teniendo una relación inversa con la velocidad del proceso de secado, es decir, si β disminuye, aumenta la velocidad del proceso. α es el parámetro de forma reflejando un índice de comportamiento de la muestra durante el secado (Cunha et al., 1998). Si $\alpha > 1$ predice tiempos muertos del proceso y si $\alpha = 1$ significa que el modelo presenta una cinética de primer orden (García-Pérez, 2007).

En tecnología de alimentos, la utilización de este modelo se centra en la descripción de procesos degradativos, puesto que la degradación del alimento se puede considerar como un fallo del sistema alimento al someterse a unas condiciones determinadas de estrés (García-Pérez, 2007). En el trabajo actual la ecuación empleada para la aplicación del modelo de Weibull se obtuvo despejando la humedad media del producto a partir de la humedad adimensional, tal y como se muestra en la Ecuación 3.

$$W(t) = W_0 + (W_e - W_0) \cdot (1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha})$$

Ecuación 3

W indica el contenido en humedad (kg agua/kg de materia seca) y los subíndices 0 y e hacen referencia al tiempo inicial y el tiempo en el equilibrio.

3.7.2 Modelo difusivo

Se utilizó un modelo difusivo para un cilindro finito considerando la simetría de la geometría, constante la difusividad efectiva y despreciando la resistencia externa al transporte de agua (Ecuación 4):

$$W(t) = W_e + (W_0 - W_e) \cdot \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2 \cdot n + 1)^2 \cdot \pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_e \cdot (2 \cdot n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{4 \cdot L^2}\right) \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\alpha_n^2} \cdot \exp\left(-\frac{D_e \cdot \alpha_n^2 \cdot t}{R^2}\right) \right]$$

Ecuación 4

W indica el contenido de humedad (kg agua/kg de materia seca), t es el tiempo (s), D_e es la difusividad efectiva (m^2/s), L y R indican la mitad de la altura y el radio de los cilindros (m), α_n representa los valores característicos del modelo determinados por las raíces de la función de Bessel de primer tipo y orden cero y los subíndices e y 0 hacen referencia a estado inicial y estado de equilibrio, respectivamente.

3.7.3. Ajuste de modelos

Tanto el modelo difusivo como el modelo de Weibull se ajustaron a las cinéticas de secado utilizando la herramienta de optimización Solver, disponible en la hoja de cálculo Excel (Microsoft), la cual usa el método del Gradiente Reducido Generalizado para obtener el valor óptimo. Se identificó el valor de la difusividad efectiva en el modelo difusivo o los parámetros α y β en el modelo empírico de Weibull, que minimizaron la suma de los errores de cada modelo, es decir la diferencia cuadrática entre la humedad experimental y la calculada.

3.8 Energía de activación

Se relacionó la difusividad efectiva del modelo difusional y la inversa de β del modelo de Weibull con la temperatura considerando la ecuación de Arrhenius, tal y como se muestra en las ecuaciones 5 y 6.

$$D_e = D_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

Ecuación 5

$$1/\beta = 1/\beta_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

Ecuación 6

$1/\beta$ y D_0 : Factores pre-exponenciales (m^2/s)

E_a : Energía de activación (kJ/kg)

R : Constante de los gases ideales (8,314 kJ/kmol·K)

T : Temperatura (K)

Las ecuaciones 5 y 6 se ajustaron a partir de su forma lineal.

3.9 Análisis estadístico

La bondad del ajuste de los modelos cinéticos y del modelo de GAB se estimó mediante el porcentaje de varianza explicada (Ecuación 7) y el error medio relativo (Ecuación 8).

$$VAR (\%) = 1 - \left(\frac{\Sigma S^2_{yx}}{\Sigma S^2_y}\right) \cdot 100$$

Ecuación 7

$$EMR (\%) = \frac{100}{N} \left[\sum_{i=1}^N \frac{|W_{exp} - W_{calc}|}{W_{exp}} \right]$$

Ecuación 8

ΣS^2_y : Desviación estándar de la muestra

ΣS^2_{yx} : Desviación estándar de la estimación

N : número de valores de W (kg agua/kg ms)

W_{exp} : Humedad experimental (kg agua/kg ms)

W_{calc} : Humedad obtenida a partir de los modelos (kg agua/kg ms)

Finalmente, para analizar la influencia de la temperatura y de los ultrasonidos en los parámetros cinéticos se empleó el análisis de varianza multifactorial (ANOVA). Se consideró un p-valor de 0,05 para la significación estadística, realizándose el

análisis en el Statgraphics Centurion XVII.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Isotherma de sorción. modelo de GAB

En el estudio realizado en el presente trabajo, se relacionó la actividad de agua y la humedad de equilibrio a una temperatura de 50 °C. Los resultados obtenidos para la isoterma de sorción a 50 °C se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 12. Se puede observar, que la relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio es de tipo II o III, que son los más frecuentes en alimentos no porosos. Dichas formas se han observado en productos cárnicos de cerdo y ternera (Clemente, 2003; Comaposada et al., 2002), en jamón de cerdo cocido (González et al. 2014), en alimentos como la patata (Sánchez et al. 1997). Al inicio del proceso de secado la a_w es muy elevada y por tanto eliminar el agua contenida en el producto a deshidratar es muy sencillo. Sin embargo, a medida que se va desarrollando el proceso de secado, la actividad de agua disminuye y es más complejo eliminar el agua contenida. Ello es debido a que el agua está fuertemente ligada a la materia en el producto (al sustrato).

Tabla 2. Relación entre la actividad de agua y la humedad de equilibrio a una temperatura de 50 °C.

a_w	W_e (kg agua/kg ms)
0,999	0,57
0,928	0,37
0,832	0,23
0,812	0,22
0,786	0,20
0,761	0,15
0,585	0,14
0,490	0,10
0,475	0,10
0,468	0,07
0,451	0,11
0,450	0,08
0,432	0,07
0,378	0,07
0,213	0,04

Para poder estimar la humedad de equilibrio en las cinéticas de deshidratación se requiere una modelización de las isotermas. En éste caso, se empleó el modelo de GAB, el cual se ajustó de manera satisfactoria (Tabla 3). A pesar de que la varianza (VAR) fue de un 98,1% y el error medio relativo (EMR) del 12,3%, superior al 10%, se puede considerar que el modelo se ajusta de forma adecuada, tal y como se observa

en la Figura 12. El relativamente bajo valor de VAR y alto EMR (Tabla 3) está asociado a la elevada variabilidad experimental.

Tabla 3. Parámetros obtenidos para la isoterma de sorción a 50°C con el modelo de GAB.

W_m (kg agua/kg ms)	0,059
C	14,7
K	0,89
VAR (%)	98,1
EMR (%)	12,3

El valor obtenido para el hígado de cerdo de la constante característica del modelo de GAB (K) fue 0,89, cercano a 1. Es por ello que se puede afirmar que las propiedades multicapa son muy similares a las de las moléculas de agua pura (García-Pérez, 2007). La humedad en la monocapa (W_m) fue 0,059, valor similar los obtenidos en trabajos anteriores, en jamón de cerdo (Clemente, 2003; González et al. 2014) o en los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* de carne de cerdo (Clemente et al., 2009). Puesto que actualmente, no hay bibliografía sobre datos de isotermas de hígado o vísceras de cerdo.

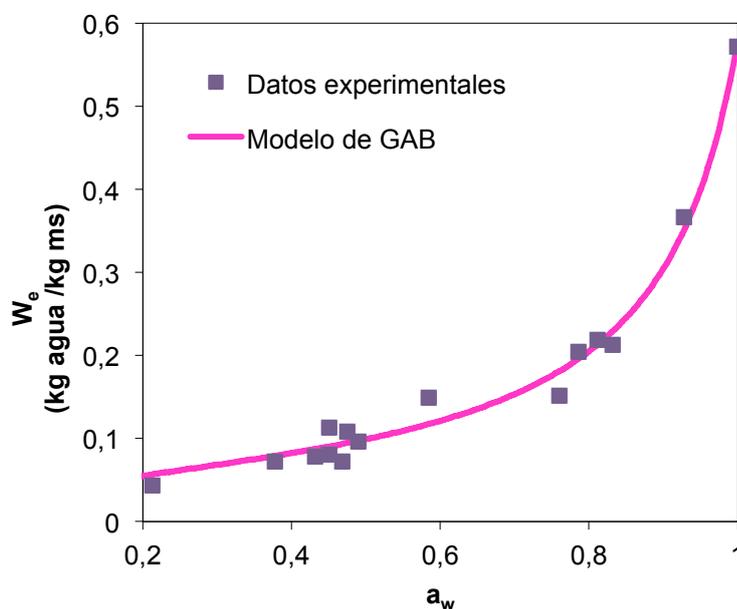


Figura 12. Ajuste del modelo de GAB.

4.2 Influencia de la temperatura de secado en el proceso de deshidratación

En la Figura 13 se muestran las cinéticas de deshidratación de hígado de cerdo realizadas a diferentes temperaturas de proceso. La cinética se obtuvo a partir de la evolución del peso de las muestras con el tiempo y la media de la humedad inicial se obtuvo de la cinética de deshidratación. Para poder comparar las diferentes experiencias entre sí y así analizar la influencia de cada factor, la humedad se mostró en base seca. La representación de la humedad frente al tiempo ofrece una visión global del proceso de deshidratación.

Las cinéticas de deshidratación del hígado de cerdo mostraron el comportamiento característico de los alimentos con la temperatura, como bien se puede observar en la Figura 13. Es decir, la velocidad de secado aumentó a medida que aumentó la temperatura de secado. Se observa que a medida que aumenta la temperatura del proceso el tiempo de secado necesario para alcanzar un determinado valor de humedad resulta inferior. Es decir, para alcanzar un valor de humedad de 0,5 kg agua/kg ms a una temperatura de secado de 30 °C se necesitaron 71400 s mientras que a una temperatura de 70 °C fueron suficientes 17400 s.

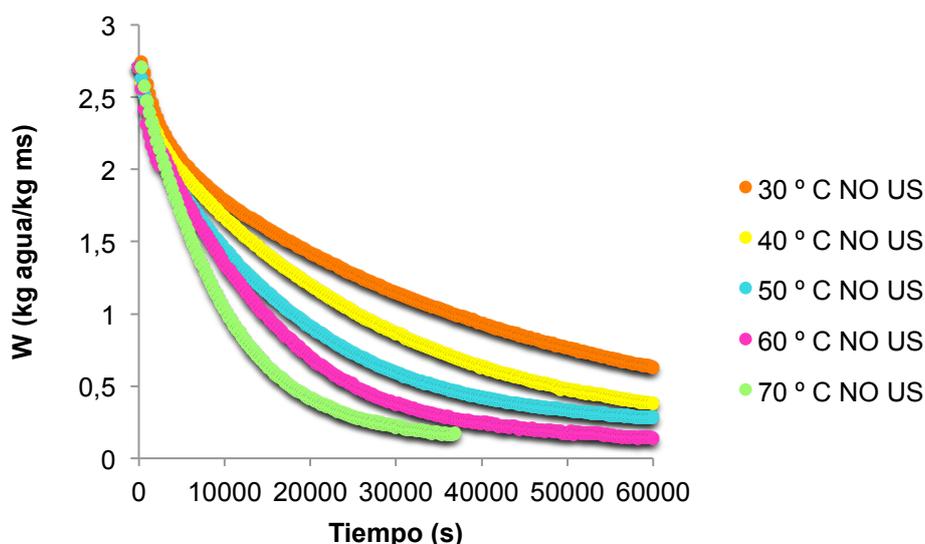


Figura 13. Cinéticas de secado a diferentes temperaturas sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US).

La Figura 14 muestra la velocidad de secado para la deshidratación por aire caliente de hígado de cerdo. En las curvas de deshidratación no se observaron los periodos de velocidad creciente y constante, dicho efecto se observa para todas las temperaturas y para las experiencias en las cuales se aplicaron ultrasonidos de potencia y en que no. Por lo tanto, se considera que la humedad inicial del producto coincide con la humedad crítica (0,730 kg agua/kg de hígado). Con ello, cabe esperar que las cinéticas estén controladas principalmente, por los mecanismos difusionales del movimiento del agua en el interior del sólido.

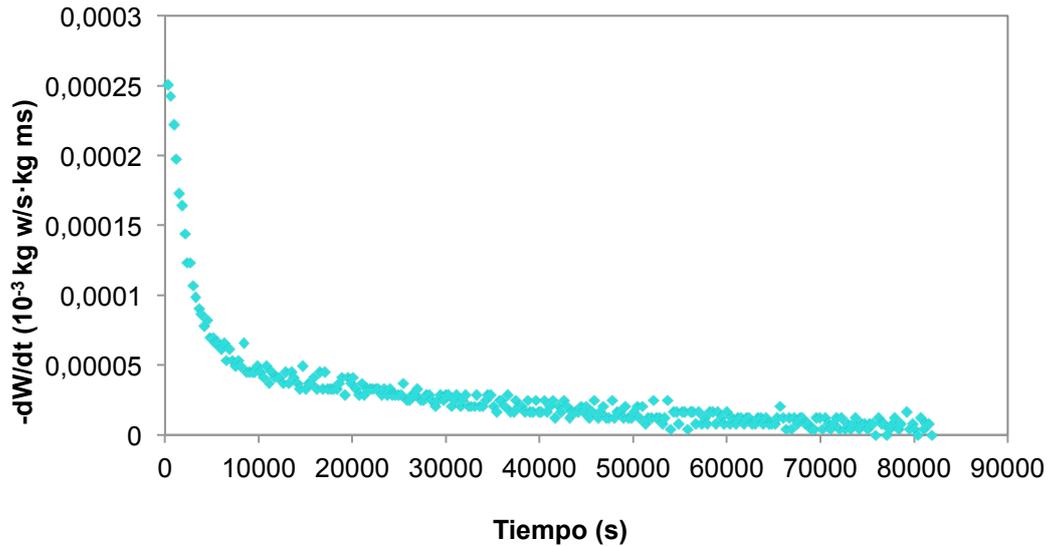


Figura 14. Evolución de la velocidad de secado con el tiempo, cinética realizada a 30 °C.

4.3 Influencia de los ultrasonidos

En la Figura 15 se muestran las cinéticas de deshidratación de hígado de cerdo a diferentes temperaturas, pero con la aplicación de ultrasonidos de potencia. Del mismo modo que ocurre en las experiencias en las que no se aplican ultrasonidos, la velocidad de secado aumentó a medida que la temperatura del proceso era mayor. Es decir, se necesitaron 56700 s para alcanzar una humedad de 0,5 kg agua/kg ms a una temperatura de 30 °C y sin embargo a una temperatura de 70 °C fueron suficientes 15000 s. También únicamente se observó un periodo de velocidad de secado decreciente, sin ningún periodo previo de velocidad constante.

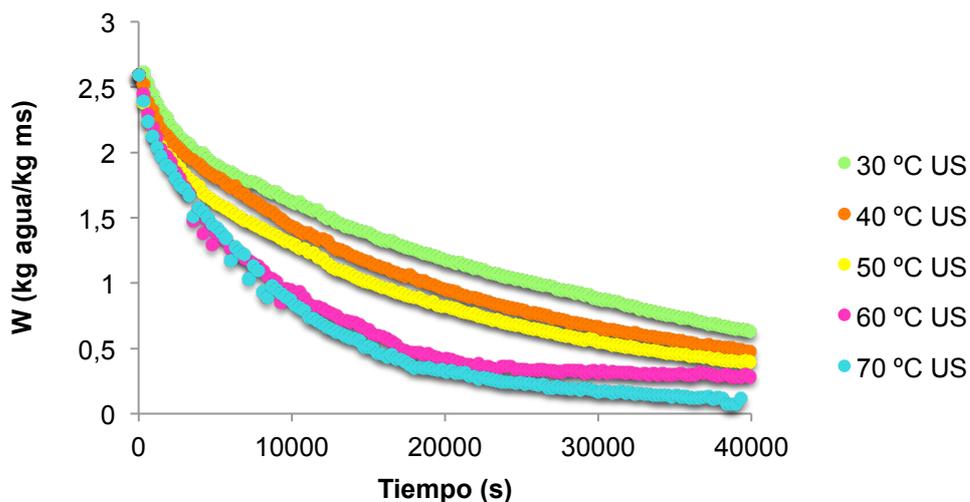


Figura 15. Cinéticas de secado a diferentes temperaturas con aplicación de Ultrasonidos de Potencia (US).

En la Figura 16, se muestran experiencias realizadas a la misma temperatura del proceso (30 y 70 °C) con y sin la aplicación de ultrasonidos de potencia. Los ultrasonidos aumentaron la velocidad de secado para todas las temperaturas, aunque su efecto parece disminuir conforme aumenta la temperatura. Para alcanzar un contenido en humedad de 0,5 kg de agua/kg de materia seca, se necesitaron aproximadamente 70000 s a una temperatura de secado de 30 °C sin aplicación de ultrasonidos, mientras que si el secado se realizó a la misma temperatura pero con la aplicación de ultrasonidos el tiempo de secado se redujo a aproximadamente 50000 s. Así, a bajas temperaturas de secado se pudo observar que los ultrasonidos de potencia redujeron el tiempo de secado en un 30% aproximadamente, un valor cercano al observado para el bacalao (Ozuna. et al. 2012). Sin embargo, dicho efecto no se observa a altas temperaturas, a una temperatura de 70 °C sin aplicación de ultrasonidos se necesitaron aproximadamente 15000 s para alcanzar un contenido en humedad de 0,5 kg agua/kg materia seca, el mismo tiempo que fue necesario para alcanzar dicho valor de humedad al aplicar ultrasonidos.

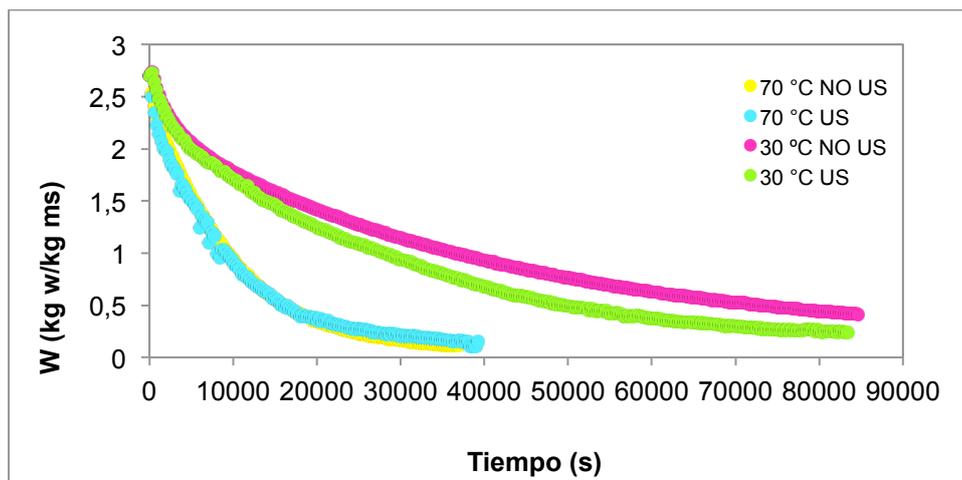


Figura 16. Comparación de las cinéticas de secado de hígado de cerdo con (US) y sin (NO US) la aplicación de Ultrasonidos de Potencia a 30 y 70°C.

4.4 Modelización de las cinéticas de secado

4.4.1 Modelo de Weibull

En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos mediante el ajuste del modelo de Weibull a las cinéticas de secado de hígado de cerdo a las diferentes temperaturas.

Tabla 4. Resultados del modelo de Weibull para experiencias con y sin la aplicación (NO US) de Ultrasonidos de Potencia (US).

Temperatura (°C)	Ultrasonidos	α	β (10^5 s)	VAR (%)	EMR (%)
30	NO US	0,7±0,03	3,4±0,4	99,70	2,29
40	NO US	0,8±0,06	2,4±0,3	99,67	3,47
50	NO US	0,7±0,05	1,9±0,15	99,70	5,70
60	NO US	0,8±0,07	1,3±0,3	99,33	4,32
70	NO US	0,9±0,1	1,06±0,11	99,40	6,61
30	US	0,8±0,03	2,8±0,5	99,03	2,43
40	US	0,8±0,05	1,9±0,18	99,60	5,15
50	US	0,7±0,05	1,5±0,1	99,33	4,32
60	US	0,7±0,08	1,5±0,6	98,83	10,60
70	US	0,8±0,06	1±0,3	99,57	7,23

El parámetro β representa el parámetro cinético del modelo de Weibull. Como se puede apreciar en la Tabla 4, dicho parámetro disminuyó al aumentar la temperatura, independientemente de la aplicación o no de los ultrasonidos de potencia. Es decir, valores pequeños de β representan una velocidad elevada del proceso (Cunha et al. 1998). A una temperatura de 30 °C sin aplicación de ultrasonidos el valor del parámetro β fue $3,36 \cdot 10^5$ s, mientras que a 70 °C en las mismas condiciones de trabajo fue $1,06 \cdot 10^5$ s. Al aplicar los ultrasonidos se observa también un descenso en el valor de β para todas las temperaturas empleadas. Así, a 30°C con aplicación de ultrasonidos β fue $2,80 \cdot 10^5$ s y a 70 °C fue $0,98 \cdot 10^5$ s.

A diferencia de lo que ocurre con el parámetro β , el parámetro α no se vio afectado de forma significativa por la temperatura de secado (Tabla 4) ni tampoco por el empleo de US. Efecto observado con anterioridad en diversos productos (Cunha et al. 2001; Blasco et al. 2006). Por lo tanto, dicho parámetro representa un índice de comportamiento del hígado de cerdo en el proceso de deshidratación independiente de las condiciones de secado.

El análisis estadístico también confirmó lo observado con anterioridad, el valor de α no varió de forma significativa con la temperatura ni con los ultrasonidos ($p > 0,05$)

(Figura 18). Mientras que por el contrario, el parámetro β disminuyó de manera significativa ($p < 0,05$) al aumentar la temperatura y al aplicar ultrasonidos durante el proceso de secado (Figura 17).

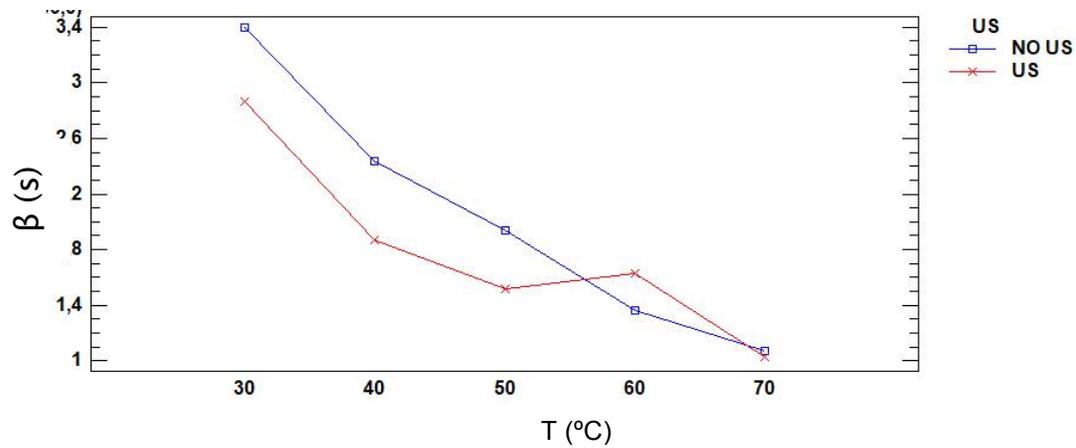


Figura 17. Gráfico de interacción del parámetro β del modelo de Weibull a las diferentes temperaturas de secado y con-sin aplicación de ultrasonidos de potencia

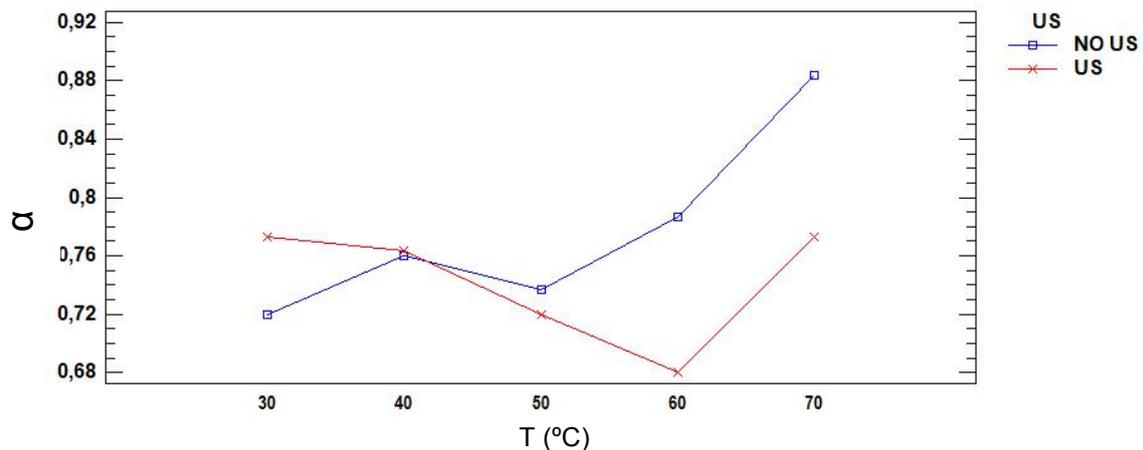


Figura 18. Gráfico de interacción del parámetro α del modelo de Weibull a las diferentes temperaturas de secado y con-sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia

Los porcentajes de varianza explicada fueron superiores al 99% en prácticamente todas las experiencias realizadas y el error medio relativo fue inferior al 10% (Tabla 4). Estos datos indican que el modelo de Weibull fue capaz de modelizar adecuadamente las cinéticas de deshidratación del hígado de cerdo. En las Figuras 19 y 20 se muestran ejemplos de la modelización con el modelo de Weibull, donde se observa como los datos calculados son muy similares a los valores experimentales. Del mismo modo, al graficar los valores de la humedad calculados frente a los teóricos (Figuras 21 y 22) se aprecia como los puntos se sitúan alrededor de una recta de

pendiente 1, lo cual indica la alta bondad del ajuste tanto para experiencias en las cuales se han aplicado ultrasonidos como para las que no.

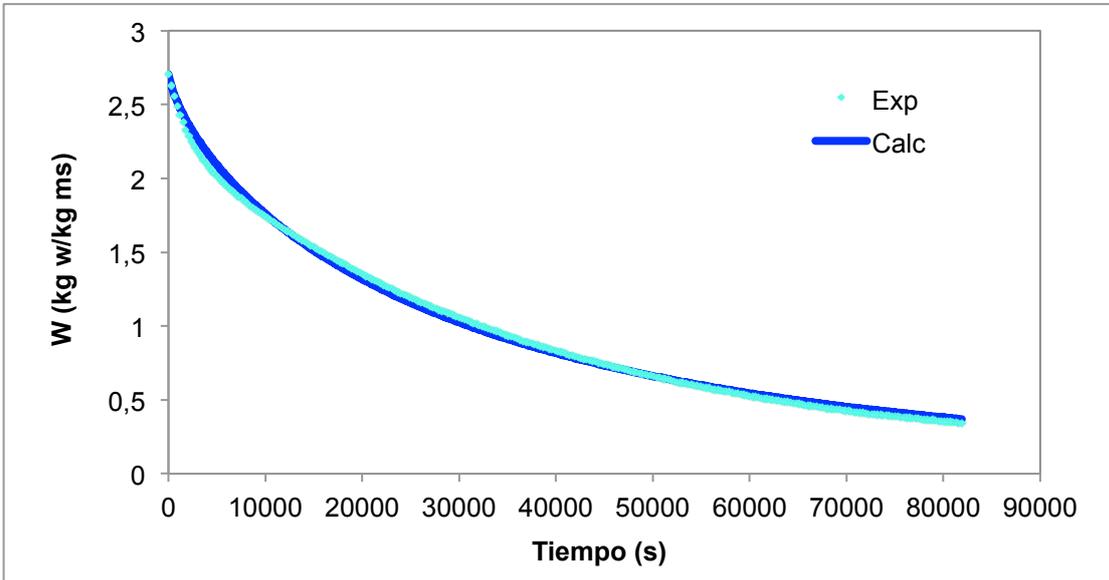


Figura 19. Ajuste del modelo de Weibull a la cinética de secado a 30 °C sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US). Valores experimentales (Exp) y calculados (Calc)

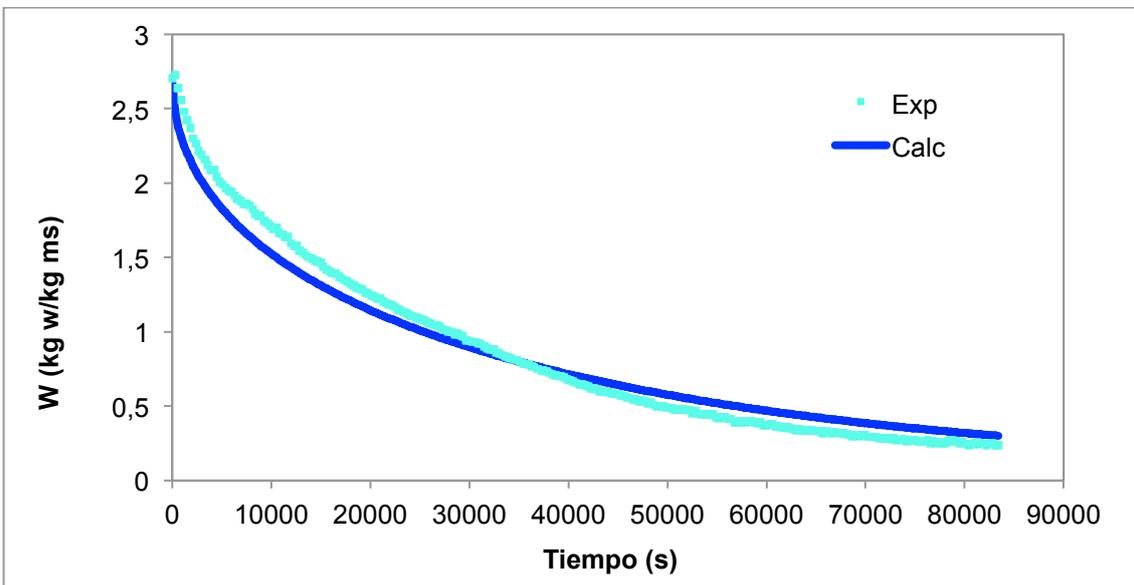


Figura 20. Ajuste del modelo de Weibull a la cinética de secado a 30 °C con aplicación de Ultrasonidos de Potencia (US). Valores experimentales (Exp) y calculados (Calc)

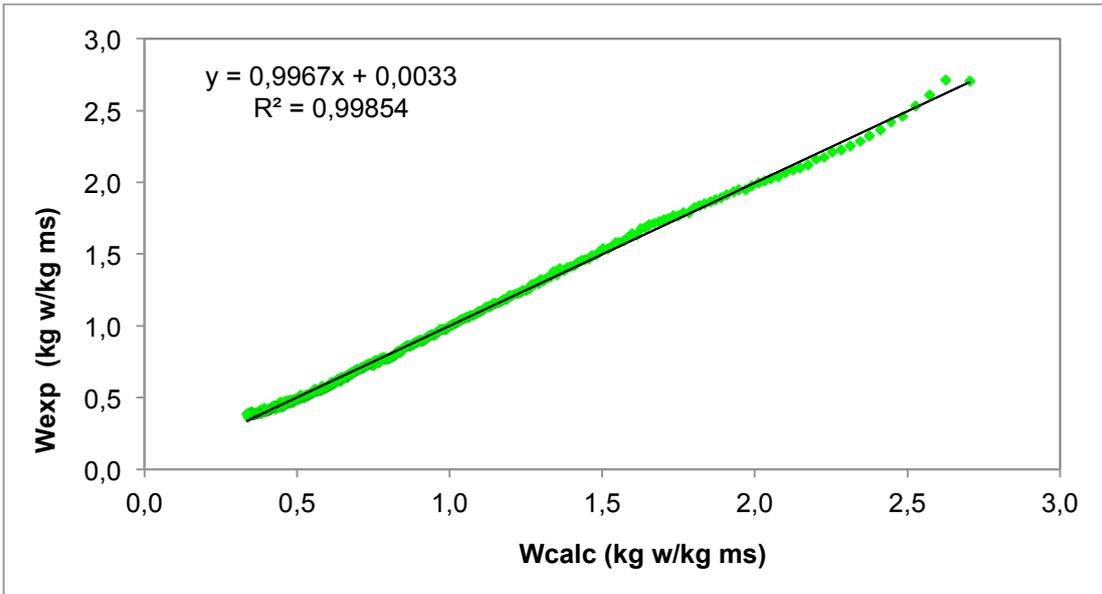


Figura 21. Humedad experimental y calculada para la experiencia a 30°C con aplicación de Ultrasonidos de Potencia (US).

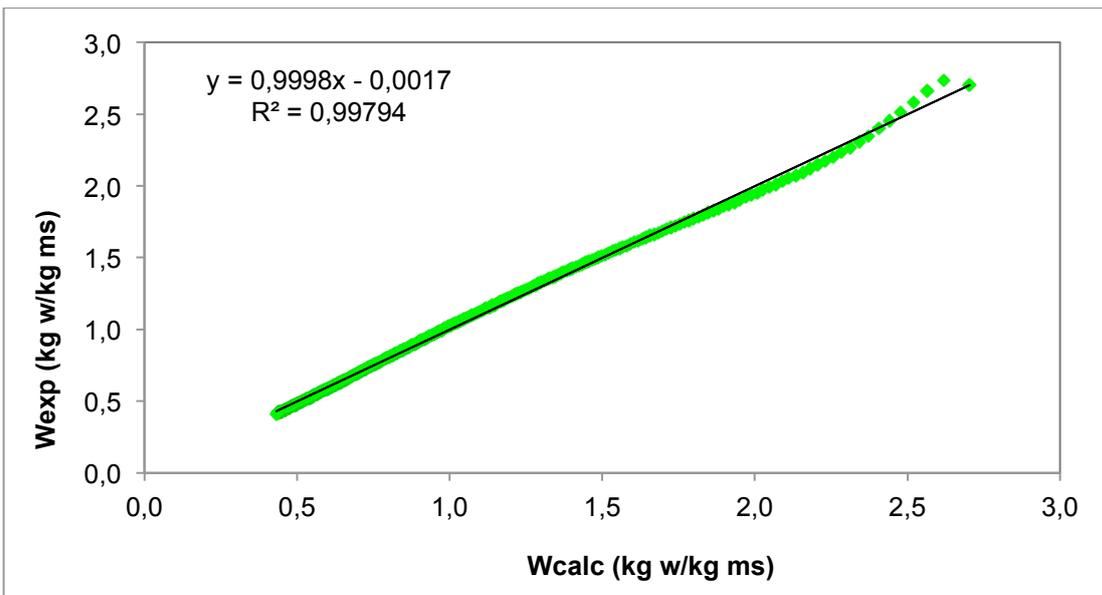


Figura 22. Humedad experimental y calculada para la experiencia 30°C sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US).

4.4.2 Modelo difusivo

Los resultados experimentales obtenidos de la modelización de las cinéticas de secado con aire caliente utilizando el modelo teórico difusivo para cilindro finito se muestran a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del modelo difusivo. Difusividad efectiva (D_e), porcentaje de varianza aplicada (VAR) y error medio relativo (EMR) para las experiencias con (US) y sin (NO US) el empleo de ultrasonidos de potencia.

Temperatura (°C)	Ultrasonidos	D_e (10^{-10} m ² /s)	VAR (%)	EMR (%)
30	NO US	1,01±0,13	98,70	5,70
40	NO US	1,4±0,2	98,20	8,88
50	NO US	1,8±0,15	98,20	9,58
60	NO US	2,5±0,6	97,26	15,70
70	NO US	3,5±0,5	95,02	26,46
30	US	1,2±0,3	97,43	8,64
40	US	1,9±0,2	97,80	11,18
50	US	2,2±0,2	98,55	8,30
60	US	2,5±1	97,03	16,74
70	US	3,4±0,9	98,16	9,99

La difusividad efectiva aumentó a medida que aumentó la temperatura tanto en experiencias en las que se aplicaron ultrasonidos como en las que no. A una temperatura de secado de 30 °C sin aplicación de ultrasonidos el valor de D_e fue $1,01 \cdot 10^{-10}$ m²/s, mientras a que a 70 °C aumentó a $3,45 \cdot 10^{-10}$ m²/s. Los valores de la difusividad efectiva obtenidos son similares a los obtenidos para otros tejidos animales (Ozuna, 2014).

La aplicación de ultrasonidos condujo a una mejora en el coeficiente de difusión a bajas temperaturas. Así, el valor medio obtenido de la difusividad efectiva a 30 °C con aplicación de ultrasonidos fue de $1,21 \cdot 10^{-10}$ m²/s, lo que representa aproximadamente un 20% superior al obtenido cuando no se aplicaron ultrasonidos. Sin embargo a 70 °C, no se observaron diferencias cuando se aplicaron ultrasonidos. Incrementos similares en la difusividad debido a la aplicación de ultrasonidos se han observado en estudios anteriores realizados con otros productos de origen animal como el bacalao (Ozuna, 2014). Este incremento de la difusividad a bajas temperaturas es debido a los efectos mecánicos que provocan los ultrasonidos en material que se está secando (Puig et al., 2012). Los ultrasonidos introducen una serie de compresiones y expansiones rápidas y cíclicas del material que pueden compararse con una esponja que se aprieta y libera repetidamente, lo que mejora la difusión de agua en la partícula. Además de ello, la energía acústica introduce variaciones de presión, velocidades de oscilación y microcorrientes en las interfases gas-sólido, lo que reduce el espesor de la capa límite y mejora así la transferencia de agua desde la superficie sólida al aire (Cárcel et al. 2012). El análisis estadístico realizado confirma lo anteriormente observado, la D_e aumenta de forma significativa con la temperatura ($p < 0,05$) y el empleo ultrasonidos de potencia afectó de forma

significativa al coeficiente de difusividad ($p < 0,05$) (Figura 23) mejorando la transferencia de agua de la superficie del sólido.

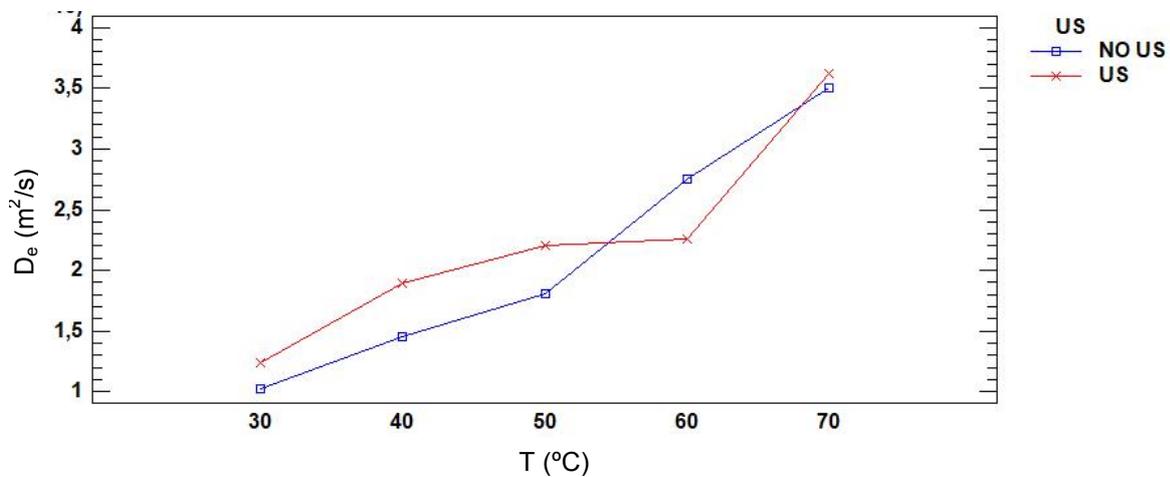


Figura 23. Gráfico de interacciones del parámetro D_e del modelo difusivo a las diferentes temperaturas de secado y con (US) y sin (NO US) la aplicación de ultrasonidos de potencia.

En este caso, los valores de varianza fueron cercanos al 98% en muchos casos, aunque también se observaron valores cercanos al 95%. En cuanto al error medio relativo, se llegaron a encontrar valores superiores al 20%. En la Figura 24 se muestra la cinética experimental realizada a 40 $^{\circ}C$ sin el empleo de ultrasonidos de potencia, así como la cinética con los valores calculados con el modelo difusivo. Se puede apreciar como el modelo difusivo sigue parcialmente la tendencia de los datos experimentales. Este hecho también se muestra en la Figura 25 donde se comparan valores experimentales y calculados. En trabajos futuros, debería de modificarse el modelo difusional incluyendo aspectos no considerados como la resistencia externa a la transferencia de materia y el encogimiento, que pueden considerarse significativos, y que mejoraría la capacidad de descripción del proceso de secado.

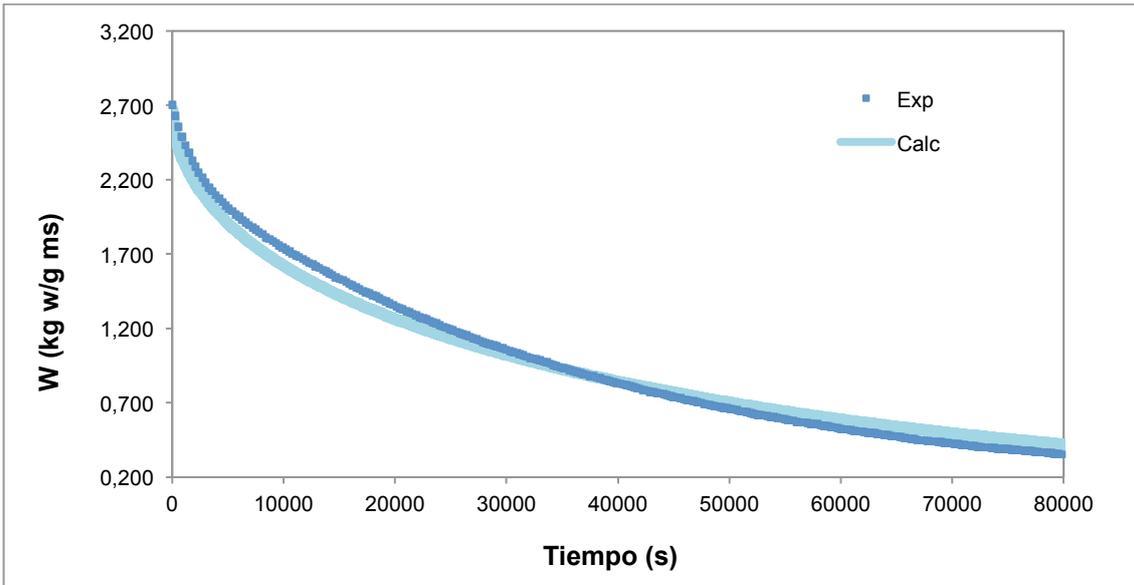


Figura 24. Ajuste del modelo difusivo a la cinética de secado a 30°C sin el empleo de Ultrasonidos de Potencia (NO US). Valores experimentales (Exp) y calculados (Calc)

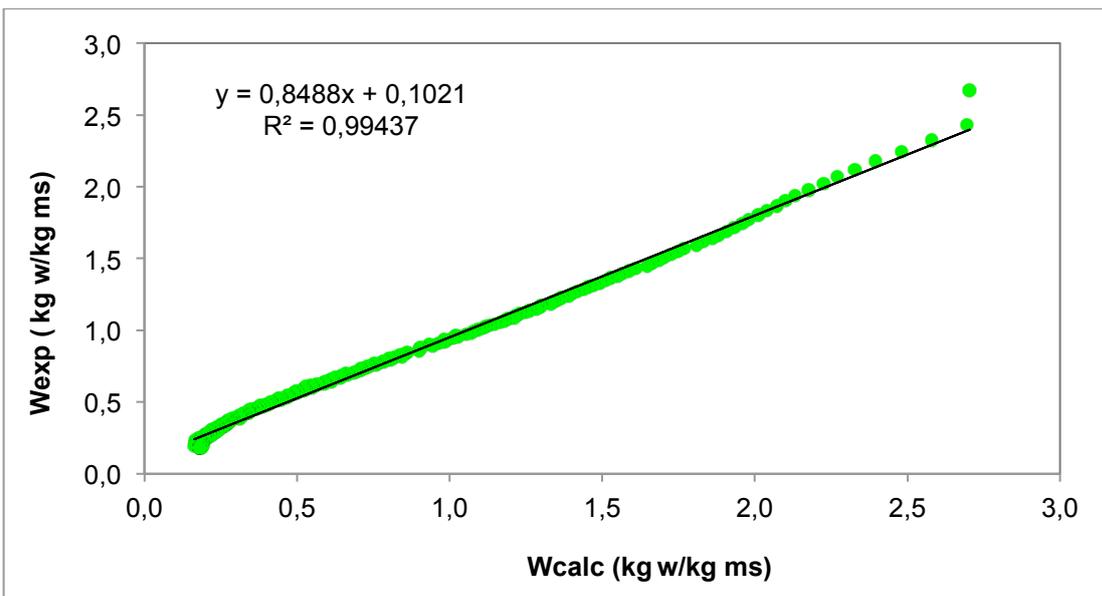


Figura 25. Humedad experimental y calculada para la experiencia 40°C sin aplicación de Ultrasonidos de Potencia (NO US).

4.4.3 Estimación de la energía de activación

La relación de los parámetros cinéticos de los modelos con la temperatura del aire de secado generalmente sigue la ecuación de Arrhenius (Ecuaciones 5 y 6). En la Figura 26, se muestra el ajuste lineal de la D_e a la ecuación de Arrhenius, es decir la

representación del logaritmo neperiano de la difusividad efectiva identificada frente a la inversa de la temperatura para las experiencias de secado de hígado de cerdo con y sin la aplicación de ultrasonidos de potencia.

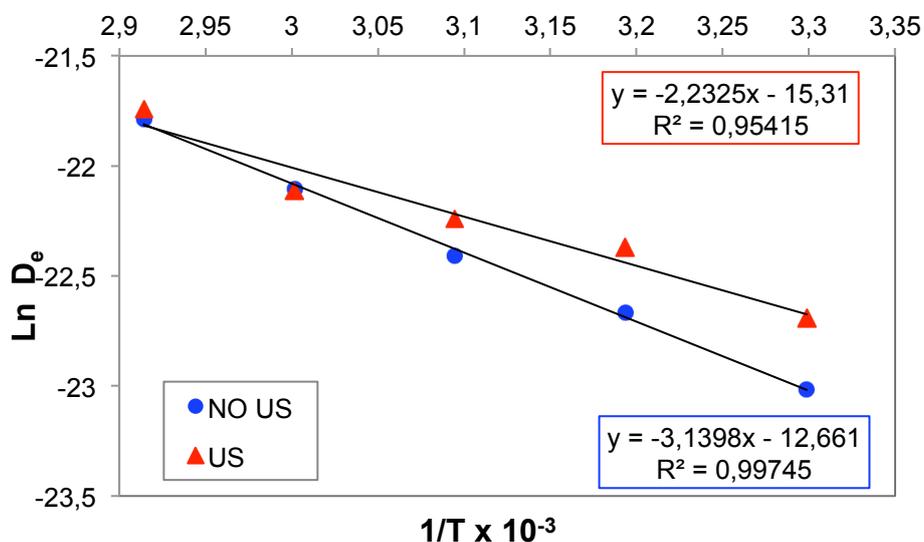


Figura 26. Ajuste de la ecuación de Arrhenius a la evolución de la difusividad efectiva (D_e) con la inversa de la temperatura (T).

Los valores obtenidos a partir de las experiencias donde no se aplicaron ultrasonidos se alinean entorno a una recta. A partir de la pendiente de la recta obtenida se determinó el valor de la energía de activación 26,11 kJ/mol, valores similares a los obtenidos en estudios anteriores para el secado del músculo de tiburón salado (Park, 1998). En las cinéticas de secado asistidas por ultrasonidos de potencia, también se observa una relación lineal pero el valor de la energía de activación fue mucho menor, 18,56 kJ/mol. El descenso de la energía de activación podría estimar el impacto de la aplicación de ultrasonidos en la energía necesaria para la eliminación de agua. El efecto de los ultrasonidos no fue el mismo para todo el rango de temperaturas, a partir de los 50 °C el efecto de los ultrasonidos disminuyó. Debido a la gran cantidad de energía térmica del sistema a las temperaturas por encima de los 50 °C los ultrasonidos de potencia no tienen una influencia significativa. Dicho efecto fue observado con anterioridad en el secado de vegetales (García-Pérez et al 2006; Gallego-Juarez, et al. 2007). Por esa misma razón, en la Figura 26 se puede apreciar como los puntos de ambas curvas conforme va aumentando la temperatura se van acercando, para los 60 y 70 °C son prácticamente idénticos.

En la Figura 27 se muestra el ajuste de β a la ecuación de Arrhenius, se representa el logaritmo neperiano de $1/\beta$ frente a la inversa de la temperatura para ambos tipos de experiencias. El valor de la energía de activación obtenido para las

experiencias a las cuales no se les aplicó ultrasonidos de potencia fue 25,19 kJ/mol, mientras que el valor obtenido para las experiencias a las que sí que se les aplicó ultrasonidos fue 21,72 kJ/mol. Los ultrasonidos de potencia aumentaron el valor del parámetro cinético $1/\beta$ para todas las temperaturas utilizadas (Figura 27) tal y como ocurre con el modelo difusivo, y se observa un ligero descenso de la influencia de los ultrasonidos a altas temperaturas y el descenso de la energía de activación.

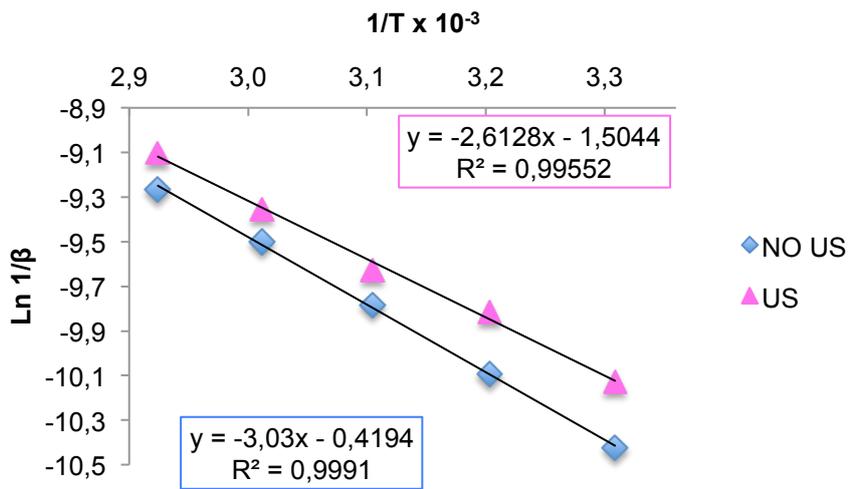


Figura 27. Ajuste de la ecuación de Arrhenius a la evolución de la inversa del parámetro β con la inversa de la temperatura (T).

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden obtener de este trabajo se exponen a continuación:

1. Las cinéticas de secado del hígado de cerdo presentaron únicamente el periodo de velocidad de secado decreciente. No se observaron los periodos de velocidad creciente ni constante.
2. Se observó una clara influencia de la temperatura de secado sobre la cinética de deshidratación. El incremento de la temperatura supuso un aumento de la velocidad de secado.
3. Los ultrasonidos de potencia influyeron en el proceso de secado. Así, a 30 °C su aplicación conllevó un descenso de 30 % del tiempo de secado. Aunque, su efecto fue disminuyendo a medida que aumentó la temperatura, siendo prácticamente despreciable a 70°C.
4. El modelo empírico de Weibull ajustó de manera más satisfactoria que el modelo teórico difusional las cinéticas experimentales.
5. La aplicación de ultrasonidos de potencia provocó un aumento de hasta el 20% de la difusividad efectiva.
6. Se observó un descenso de la Energía de activación para las experiencias donde se aplicaron ultrasonidos de potencia.
7. Trabajos futuros deben de ir encaminados al desarrollo de modelos difusionales más precisos y a determinar el efecto de las condiciones de secado, temperatura y aplicación de ultrasonidos, en parámetros de calidad del hígado.

6. BIBLIOGRAFÍA

6. BIBLIOGRAFÍA

- ANICE. (2018). *Asociación nacional de industrias de la carne en España (ANICE)*. Consultado el 16-09-2018 de https://www.anice.es/industrias/carne-y-salud/la-carne-y-sus-derivados_17849_172_25245_0_1_in.html.
- AOAC (2000) Official methods of analysis of the AOAC 986.15 Multielement method. 17th ed. Arlington, Virginia, USA.
- BARREIRO, F. J.; SESELOVSKY, R. (2003). Usos de la transglutaminasa en la industria alimentaria. Elaboración de carne reconstituida. *Invenio*, 6, 157-164.
- BLASCO, M.; GARCÍA-PÉREZ, J.V.; BON, J.; CARRERES, J.E.; MULET, A. (2006). Effect of blanching and air flow rate on turmeric drying. *Food Science and Technology International*, 12, 315-323.
- BOUCHER, R.M.G. (1980). US Patent 4 211 744.
- BOULOGNE, S.; MÁRQUEZ, E.; GARCÍA, Y.; MEDINA, A.; CAYOT, P. (2008). Optimización de la operación de secado de la carne de lombriz (*Eisenia andrei*) para producir harina destinada al consumo animal. *Ciencia e Ingeniería*, 29, 91-96.
- CÁRCEL, J. A. (2003). Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de material. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- CARCEL J.A.; BENEDITO, J.; BON, J.; MULET, A. (2007). High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Science*, 76, 611-619.
- CÁRCEL, J. A.; GARCÍA-PÉREZ, J. V.; BENEDITO, J.; & MULET, A. (2012). Food process innovation through new technologies: use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 110, 200-207.
- CARLIN, B. (1972). *Ultrasonica*. Urmo, Bilbao, España.
- CLEMENTE, G. (2003). Efecto de la Contracción en la Cinética de Secado de Músculos de Jamón. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- CLEMENTE, G.; BON, J.; BENEDITO, J.; MULET, A. (2009). Desorption isotherms and isosteric heat of desorption of previously frozen raw pork meat. *Meat Science*, 82, 413-418.
- COMAPOSADA; J.; GOU, P.; PAKOWSKI, Z.; ARNAU, J. (2002). Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. *Drying Technology*, 18, 723-746.

- CONTRERAS RUIZ, M. (2014). Estudio de Parámetros de Calidad de Manzana Deshidratada mediante Secado a baja Temperatura Asistido con Ultrasonidos. Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Valencia.
- CUNHA, L. M.; OLIVEIRA, F. A. R.; OLIVEIRA, J. C. (1998). Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of processes described by the Weibull probability distribution function. *Journal of Food Engineering*. 37, 175-191.
- CUNHA, L.M.; OLIVEIRA, F.A.R.; ABOIM, A.P.; FRÍAS, J.M.; PINHEIRO-TORRES, A. (2001). Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic and improved parameter estimation. *International Journal of Food Science and Technology*. 36, 253-262.
- FUNIBER. (2018). Composición nutricional del hígado de cerdo (FUNIBER) Consultado el 16-09-2018 de <https://www.composicionnutricional.com/alimentos/HIGADO-DE-CERDO-1>.
- GALLEGO-JUÁREZ, J.A.; RIERA, E., DE LA FUENTE, S.; RODRÍGUEZ-CORRAL, G.; ACOSTA-APARICIO, V.M.; BLANCO, A. (2007). Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and device. *Drying Technology*. 25, 1893-1901.
- GAMBOA-SANTOS, J.; MONTILLA, A.; CÁRCEL, J.A.; GARCÍA-PÉREZ, J.V.; VILLAMIEL. M. (2012). Aplicación de ultrasonidos de potencia en el pretratamiento y la deshidratación de hortalizas y frutas. Instituto de Investigación en Ciencias de la Alimentación. *Artículos originales*, 438, 94-103.
- GARCÍA, A.; MUÑIZ, S.; HERNÁNDEZ, A.; GONZÁLEZ, L. M.; FERNANDEZ, D. (2013). Análisis comparativo de la cinética de deshidratación osmótica y por flujo de aire caliente de la piña (Ananas Comosus , variedad Cayena lisa). *Revista Ciencias Tecnicas Agropecuarias*. 22, 62-69.
- GARCÍA-PÉREZ, J.V.; ROSSELLÓ, C.; CÁRCEL, J.A.; DE LA FUENTE, S.; MULET, A. (2006b) Effect of air temperature on convective drying assisted by high power ultrasound, *Defect Diffus Forum*. 258-260, 563-574.
- GARCÍA-PÉREZ, J.V. (2007). *Contribución Al Estudio De La Aplicación De Ultrasonidos De Potencia En El Secado Convectivo De Alimentos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

- GARCÍA-PÉREZ, J.V.; CÁRCEL, J.A.; BENEDITO, J.; MULET, A. (2007). Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. *Food and Bioprocess Processing*. 85, 247-254.
- GARCIA-PEREZ, J.V.; CÁRCEL, J.A.; RIERA, E.; ROSSELLÓ, C.; MULET, A. (2012) Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Drying Technology*, 30, 1199-1208.
- GONZALEZ, M.; PORRAS L.; AGUDELO, A.; QUINTERO, O.; DIOSA, C. (2014) Determinación de isothermas de desorción en jamón de cerdo cocido almacenado entre 4 °C y 12 °C. *Vitae*, 21, 97-106.
- INTERPOC. (2018). Organización Interprofesional Agroalimentaria del Porcino de Capa Blanca (INTERPORC). Consultado el 26-12-2018 de <https://interporc.com/2019/01/31/el-consumo-de-porcino-de-capa-blanca-en-espana-en-2018?cat=actualidad/noticias-actualidad>.
- JAYATHILAKAN, K.; SULTANA, K.; RADHAKRISHNA, K.; & BAWA, A. S. (2011). *Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. Journal of Food Science and Technology*. 49, 278-293.
- MARTI, D. L., JOHNSON, R. J., & MATHEWS, K. H. (2012). Where's the (not) Meat? Byproducts from Beef and Pork Production. *Journal of Current Issues in Globalization*. 5, 397-423.
- MASON, T.J. (1998). Power ultrasound in food processing. The way forward. En: *Ultrasound in Food Processing*. Poverly, M. J. W. Y Manson, T. J. Chapman & Hall, London, UK.
- FITO, P.; ANDRÉS, A.; BARAT, J.; ALBORS, A. (2001). *Introducción Al Secado De Alimentos Por Aire Caliente*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. 216 pp.
- M.A.P.A.M.A (2018). *Informe anual de la industria alimentaria española*. Consultado el 28/09/2018 de https://www.mapa.gob.es/es/alimentacion/temas/industria-agroalimentaria/_informeanualindustria2017-2018_tcm30-87445.pdf
- MULET, A.; BERNA, A.; BORRÁS, M.; PIÑAGA, F. (1987). Effect of air flow rate on carrot drying. *Drying Technology*, 5, 245-258.

- OZUNA, C.; HESPOS, T.; PEÑA, R.; GARCÍA-PÉREZ, J.V.; MULET, A.; CÁRCEL, J.A. (2012). Influencia de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en la cinética de desalado de bacalao (*Gadus morhua*). VII Congreso Español de Ingeniería de los Alimentos (CESIA 2012). Ciudad Real.
- OZUNA, C.; CÁRCEL, J. A.; WALDE, P. M.; GARCIA-PEREZ, J. V. (2014). *Low-temperature drying of salted cod (Gadus morhua) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties. Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 23, 146–155.
- PARK, K. J. (1998). Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. *Drying Technology*, 16, 889–905.
- PETROVA, I.; BANTLE, M.; EIKEVIK, T. M. (2015). Manufacture of dry-cured ham: A review. Part 2. Drying kinetics, modeling and equipment. *European Food Research and Technology*, 241, 447–458.
- PUIG, A.; PEREZ-MUNUERA, I.; CARCEL, J. A.; HERNANDO, I.; GARCIA-PEREZ, J. V. (2012). Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying. *Food and Bioprocess Processing*, 90, 624–632.
- SÁNCHEZ, S.; SANJUÁN, N.; SIMAL, S.; ROSSELLÓ, C. (1997) Calorimetric techniques applied to the determination of isosteric heat of desorption for potato. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 74, 57-63.
- GAMBOA, J. (2013). Impacto de los ultrasonidos de potencia en la calidad de vegetales y frutas durante el proceso de deshidratación. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- SIMAL, S.; FEMINA, A.; GARAU, M.C.; ROSSELLÓ, C. (2005). Use of exponential Page's and diffusional models to simulate the drying Kinetics Kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66, 323-328
- SORIANO RODRÍGUEZ, J.R. (2014). Influencia de la Temperatura y la Velocidad del Aire en el Secado de Berenjena a baja Temperatura Asistido por Ultrasonidos de Potencia. Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- TÉLLEZ, G. A.; CASTAÑO, J. C. (2010). *Péptidos antimicrobianos*. 14, 55–67.

Ramírez-Miranda, M.; Cruz y Victoria, M.; Vizcarra-Mendoza, M., & Anaya-Sosa, I. (2014). Determinación de las isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*,13, 165-178.

VILLARINO MARÍN, A. (2004). La carne de cerdo: Coma bien, coma sano. *Carne de Cerdo & Alimentación Saludable*. Consultado el 23/03/2019 en <http://www.icvillar.es/salud/salud5.pdf>.