



**Universitat de les
Illes Balears**

Facultat de Ciències

Memòria del Treball de Fi de Grau

**Efecte de la mida de la peça sobre el procés
d'assecat del formatge Mahón-Menorca.
Implicacions sobre la qualitat del producte.**

Francisca Vallespir Torrens

Grau de Química

Any acadèmic 2012-13

DNI de l'alumne: 41573428P

Treball tutelat per Carmen Rosselló Matas

Departament de Química

L'autor autoritza l'accés públic a aquest Treball de Fi de Grau.

Paraules clau del treball: Formatge, assecat, modelització

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos.....	5
1.1 El queso Mahón-Menorca.....	5
1.1.1. Curvas de secado.....	8
1.1.2. Humedad puntual. Determinación de los tiempos de relajación con RMN de campo bajo.....	8
1.1.3. Textura	9
1.2 Modelos difusivos	9
1.3 Objetivos	10
2. Materiales y métodos.....	11
2.1.Elaboraciones de queso	11
2.2 Equipo de resonancia magnética nuclear de bajo campo.....	12
2.3. Técnicas experimentales	12
2.3.1. Determinación de las curvas de secado	12
2.3.2. Determinación de los perfiles de humedad.	12
2.3.3 Determinación de la densidad del queso	13
2.4. Análisis físico-químicos	13
2.4.1. Determinación de humedad.....	13
2.4.2 Determinación de la dureza	13
2.5. Análisis estadístico.....	13
3. Resultados y discusión.....	14
3.1. Curvas de secado	14
3.2. Relación textura-humedad	15
3.4. Modelo difusivo.....	17
3.4.1. Identificación paramétrica y validación del modelo.....	19
3.4.3. Simulación del proceso de maduración de piezas de diferentes tamaños	21
3.4.4. Perfiles de humedad.....	24
4. Conclusiones	27
5. Bibliografía	28

RESUMEN

Con la finalidad de comercializar piezas de queso de menos de 1kg amparadas por la Denominación de Origen Protegida queso Mahón-Menorca se ha planteado estudiar la pérdida de agua de piezas amparadas de mayor tamaño, obteniendo información sobre sus curvas de secado, coeficiente de difusión y la evolución de su textura.

Para ello se ha elaborado un lote de queso en tres firmas, dos que comercializan queso Mahón-Menorca (elaborado con leche pasteurizada) y la otra queso Mahón-Menorca artesano (elaborado con leche cruda), siguiendo las pautas de elaboración propias de cada empresa.

Para cada uno de los lotes, constituido por 10 piezas, se procedió al envío a la UIB de una pieza de queso para la determinación inicial de la humedad media. Asimismo, en la propia empresa colaboradora se llevó a cabo el seguimiento de la pérdida de peso de tres piezas durante un período de unos 60 días de maduración. Finalizado el período de maduración, se ha determinado la textura de las piezas mediante un ensayo de dureza realizado mediante un durómetro. Los valores de dureza obtenidos de cada pieza se han relacionado con la humedad, de manera que, se pudo observar un incremento de la dureza con la disminución de la humedad media durante la maduración.

Para cada elaborador se ha podido establecer la existencia de una relación lineal entre dureza con humedad. Dicha regresión permitirá predecir la dureza de piezas durante su proceso de maduración, garantizando así la calidad del producto.

Al final del proceso de maduración, para cada pieza se ha llevado a cabo la determinación experimental de la distribución de humedad

Finalmente, se ha diseñado y validado un modelo difusivo, en el que se considera despreciable la resistencia externa, a partir de las curvas de secado experimentales para cada uno de los tres elaboradores. El modelo ha sido resuelto mediante el método de separación de variables asumiendo que el sólido se comporta como un material isotrópico, que la humedad inicial de la pieza es uniforme en todos sus puntos, y que la pieza está en equilibrio con el aire que le rodea, así como una geometría paralelepípedica.

Los coeficientes de difusión identificados presentaron valores similares que los obtenidos para otros quesos, y publicados en la bibliografía.

Considerando que las piezas de menor tamaño, pueden ser elaboradas con la misma materia prima y en las mismas condiciones que las piezas de mayor tamaño, ha sido posible, mediante la aplicación del modelo propuesto simular sus curvas de secado utilizando los mismos coeficientes de difusión efectivos identificados

anteriormente. Para realizar la simulación se han propuesto cuatro tamaños diferentes correspondientes a piezas entre 500 g y 1500 g.

Las curvas calculadas presentan un comportamiento similar a la curva de secado experimental de la pieza original. Interpolando en la curva de una pieza de tamaño pequeño, para un estado de maduración determinado, se puede determinar el tiempo equivalente de maduración respecto a la pieza grande.

El concepto de tiempo equivalente permite conocer en qué momento la pieza pequeña se encontrará en el mismo estado de maduración que la pieza grande lo cual permite calcular el tiempo de permanencia de la pieza en cámara asegurando, a la vez, una humedad y textura adecuadas.

Se han analizado los perfiles de las piezas al final de la maduración mediante RMN de campo bajo. Esta técnica consiste en la medida combinada de los tiempos de relajación de agua y grasa del queso. El conocimiento de la distribución de humedad ofrece una perspectiva diferente a la humedad media ya que da más información sobre el estado de maduración de la pieza. Una pieza con un perfil de humedad prácticamente plano confirma que no hay fenómenos de encostramiento y que el secado se está llevando a cabo a una velocidad adecuada.

1. Introducción y objetivos

La elaboración de queso es, probablemente, la forma más antigua de procesado de la leche. La transformación de la leche en queso consta fundamentalmente de tres procesos: cuajado, salado y maduración (Fox, McSweeney, Cogan, & Guinee, 2004). El proceso de maduración implica, la pérdida de agua del queso, así como una serie de complejos fenómenos bioquímicos que en general, pueden agruparse en: glicólisis, proteólisis y lipólisis (Soccol, Pandey, & Larroche, 2013). Como consecuencia de estos cambios la cuajada adquiere nuevas características. La pasta, originalmente dura, compacta y sin gran sabor, sufre modificaciones en su composición y estructura y como consecuencia de ello, en su aspecto, consistencia y color. Simultáneamente se acentúan el sabor y el aroma (Dilanjan, 1976). Estas transformaciones estarán condicionadas por los factores ambientales durante el proceso (temperatura y humedad) (Kapoor, 2003), características físico-químicas de la leche y tipos y actividades de las enzimas presentes (de los coagulantes y/o de origen microbiano) (Tamime, 2011). Hay muchos tipos de quesos en España que tienen características individuales excepcionales (Cenzano, 1992) pero el que ocupa el presente estudio es el queso Mahón-Menorca.

1.1 El queso Mahón-Menorca

El queso Mahón-Menorca es un queso de pasta prensada, no cocida, elaborado con leche de vaca, con una proporción máxima de leche de oveja del 5%. Presenta una forma paralelepípedica con cantos y aristas redondeadas, con un peso de unos 3 kg y dimensiones aproximadas de 20 cm de lado y entre 5 y 9 cm de altura. Su corteza es compacta, grasienta y de color entre amarillo y pardo. Al corte, la pasta es de textura firme de color blanco marfil a amarillo intenso. Presenta ojos de forma más o menos redondeada, distribuidos irregularmente y en número escaso, siendo su tamaño variable aunque siempre inferior al de un guisante (El Queso Mahón-Menorca DOP, 1994). Su sabor y aroma son característicos.

La zona de producción de la leche y de elaboración y curación del queso Mahón-Menorca está limitada a la isla de Menorca. La isla de Menorca tiene un microclima bastante diferente del resto de las islas vecinas, caracterizado por la ausencia casi total de grandes relieves y sobre todo por la cantidad de lluvia, que es relativamente abundante por tratarse de una isla del Mediterráneo (unos 600 mm anuales), repartida estacionalmente desde el otoño hasta la primavera, además de las características escarchas nocturnas. Dado que, a su vez, disfruta de unas temperaturas típicas de la zona mediterránea, con valores mínimos invernales de 5°-10°C y máximos en verano de 30°C, resulta un paraje adecuado para el crecimiento de las plantas forrajeras y, por tanto, para el pastoreo del ganado. Las vacas

lecheras de Menorca son mayoritariamente de raza frisona y de singulares ganaderías de raza menorquina.

Según el tratamiento aplicado a la leche, los quesos amparados por la Denominación de Origen Protegida (DOP) se clasifican en dos variedades, cada una de las cuales presenta tipos diferenciados por el grado de maduración (hasta 150 días queso semicurado y curado al queso sometido a más de 150 días de maduración)

- Queso Mahón-Menorca elaborado a partir de leche sometida a algún procedimiento de conservación.

- Queso Mahón-Menorca artesano, elaborado con leche cruda.

La elaboración del queso Mahón-Menorca se lleva a cabo siguiendo las pautas establecidas en el Reglamento de la DOP Queso Mahón-Menorca (BOE 160 de 5/7/1985). Dicho proceso de elaboración consta de unas etapas características que se describirán a continuación, respetando el orden en que se realizan (Law & Tamime, 2011).

Cuajado

La dosis de cuajo utilizada es la necesaria para que se realice la coagulación en un tiempo mínimo de 30 min. La temperatura a la que se realiza el proceso oscila entre 30 y 34°C, debiendo mantenerse esta temperatura durante todo el proceso de coagulación, cortado y desuerado de la pasta. Una vez finalizado el proceso se obtiene un gel, la cuajada, que es necesario desmenuzar en fragmentos homogéneos del tamaño aproximado de un guisante, que se dejan en reposo en el seno del suero durante un tiempo aproximado de 8 min.

La finalidad de esta operación es la obtención de una gran superficie libre, a través de la cual podrá salir más fácilmente el suero que todavía contiene la cuajada, a causa de la sinéresis que se produce. Esta operación puede realizarse utilizando una lira o con las propias manos del maestro quesero.

Moldeo

En el queso elaborado con leche pasteurizada, después de un proceso de prepressado, la cuajada es cortada en cubos que se introducen en moldes de plástico de forma paralelepípedica, previamente recubiertos interiormente con un lienzo de algodón denominado "*fogasser*".

Para el queso Mahón-Menorca artesano, este proceso se realiza embolsando la cuajada en el *fogasser*, suspendiéndolo por sus cuatro vértices y colocado sobre una

mesa, se consigue eliminar el suero y dar cohesión a la pasta con hábiles manipulaciones.

Prensado

El prensado tiene por finalidad endurecer la masa de cuajada y eliminar el suero sobrante. Las industrias generalmente emplean prensas neumáticas, horizontales, siendo práctica habitual aumentar progresivamente la presión del prensado. Para el caso del queso Mahón-Menorca artesano la primera fase se realiza a mano y, una vez atado el lienzo con un cordel, denominado “*lligam*”, se coloca la pieza en una prensa individual exenta de paramentos laterales, a presión constante.

Salado

Finalizado el prensado las piezas son liberadas del *fogasser* y del molde y se introducen en salmuera. Las condiciones habituales de operación son concentración a saturación, un tiempo de inmersión no superior a 48 h y una temperatura comprendida entre 10 y 15°C.

Oreado

Una vez saladas, limpias y secas, las piezas pasan a la fase de oreado, para lo cual se colocan sobre estantes hechos con listones de madera, denominados “*canyissos*”, que permiten la circulación de aire entre ellos. El oreado se prolonga durante una semana, en condiciones de humedad y temperatura muy variables, pero que normalmente oscilan entre 12 y 15°C de temperatura y entre 80 y 85% de humedad. La finalidad del oreado es la eliminación de restos de líquido y la ventilación de la pieza.

Maduración

Una vez oreadas, las piezas de queso son recogidas y llevadas a locales de maduración donde permanecerán el tiempo necesario hasta su distribución, y en los que adquirirán las características organolépticas propias del queso Mahón-Menorca. Las piezas a madurar se colocan sobre los *canyissos*, en condiciones de temperatura y humedad adecuadas, que por regla general, se sitúan en torno a los 15°C y entre 80 y 90% de humedad relativa. Estas condiciones se pueden alcanzar de dos formas diferentes: por medio de cava natural o de cámara de maduración (Frau, 1994). El proceso de maduración tiene una duración muy variable, dependiendo del grado de curado deseado, ya que es precisamente esta duración la que permite diferenciar los tipos de queso Mahón-Menorca.

**Figura 1.1.1 DOP queso Mahón-Menorca**

1.1.1. Curvas de secado

La curva de secado es la representación de la humedad media de la pieza respecto al tiempo de secado. Dicha curva de secado se puede obtener de forma simple mediante el seguimiento de la pérdida de peso de la pieza. La obtención de la humedad de la pieza en un momento de la maduración se lleva a cabo a partir del valor del extracto seco que se mantiene constante a lo largo del proceso.

1.1.2. Humedad puntual. Determinación de los tiempos de relajación con RMN de campo bajo

La humedad del queso puede diferir de una posición a otra en el interior de la pieza. Se denomina humedad local o puntual al valor de humedad determinado en un punto determinado de la pieza. Esa humedad puntual puede diferir de la media. Ya que los procesos bioquímicos dependen de la humedad para su activación y también condiciona su velocidad,, La distribución de la humedad en el interior de un queso puede ser muy heterogénea, detectándose zonas internas con elevados valores de humedad y zonas externas de humedad baja, apreciándose incluso fenómenos de encostramiento. Por ello resulta imprescindible conocer tanto la humedad media como la puntual resulta porque es posible que se den procesos que según la humedad media no se darían.

El perfil de humedad se construye con los datos de humedad puntual a lo largo de un eje. Si los perfiles obtenidos son planos se tiene una pieza homogénea pero perfiles muy acusados pueden ser indicativos de que hay procesos de encostramiento o que el secado es muy rápido.

Normalmente, se utilizan técnicas de hidrólisis ácida para cuantificar el contenido de agua y grasa de una muestra de queso pero resulta más sencillo y menos peligroso, ya que se evita la utilización de ácidos, el análisis de agua y grasa mediante resonancia magnética nuclear de bajo campo (Chen & Putranto, 2013). Esta técnica ha demostrado ser más rápida y exacta tanto con queso como con otros alimentos (Farhat, Belton, Webb, & Chemistry, 2007). Consiste en el análisis de la relajación combinada de las moléculas de agua y grasa donde se determinan los tiempos de relajación longitudinal (T1) y transversal (T2) tras una serie de impulsos magnéticos de campo bajo (radiofrecuencias). La técnica se suele utilizar en muestras donde uno de los dos componentes es mayoritario, agua o grasa. Sin embargo, con un

proceso de calibración adecuado, también se puede utilizar con otros fines como para la determinación de la grasa vegetal en quesos (Monakhova, Godelmann, Andlauer, Kuballa, & Lachenmeier, 2013) o la determinación simultánea de agua y grasa. (Castell-Palou, Rosselló, Femenia, & Simal, 2012; Castell-Palou et al., 2012).

Tras la determinación de los tiempos de relajación se utiliza una calibración basada en una regresión por mínimos cuadrados de ambos tiempos de relajación para obtener el contenido en humedad de la muestra. La calibración utilizada es válida en intervalos de contenido en grasa desde 27.2 a 44.9% y en intervalos de contenido en agua desde 10.3 a 45.3%.

1.1.3. Textura

Para la valoración de la calidad de un queso no es sólo importante que tenga una humedad o una distribución de la humedad en el interior de la pieza adecuada sino que también son importantes aspectos sensoriales como la textura del queso. Uno de los parámetros objetivos de medida de la textura es la dureza (Moskowitz, 1987). La dureza se puede determinar mediante un durómetro que mide la resistencia que opone la superficie, a una determinada presión ejercida. Esta medida depende de la humedad de la muestra (Gunasekaran & Ak, 2010). Otra forma de medir la dureza de un queso es con un penetrómetro (Zúñiga Hernández, Ciro Velásquez, & Osorio Saraz, 2007). Relacionando la dureza con la humedad se podrá predecir el valor de este parámetro en próximas piezas y así garantizar la calidad del producto (Bourne, 2002). En algunos casos la determinación de la dureza también se puede hacer de forma sensorial con un panel de cata (González, Benedito, Cárcel, & Mulet, 2001).

1.2 Modelos difusivos

La maduración de un queso es un proceso complejo que supone, entre otros fenómenos, una importante pérdida de agua (Welti-Chanes & Velez-Ruiz, 2010). Para analizar este proceso de transferencia es frecuente suponer que viene regido por un mecanismo difusivo (Fox & Fox, 2000).

Los modelos matemáticos más frecuentemente utilizados en el campo de la Ingeniería de Alimentos están basados en la aplicación de leyes físicas y químicas (modelos fenomenológicos), (Cameron, Hangos, Perkins, & Stephanopoulos, 2001). La construcción del modelo se realiza en base a las ecuaciones de conservación (balances de materia, energía y cantidad de movimiento) de cara a desarrollar relaciones entre las variables de entrada y salida del sistema.

La modelización de un proceso consta básicamente de dos etapas. Una primera, en la cual se desarrolla o se construye el modelo y una segunda, donde el modelo desarrollado es aplicado a un sistema real. El procedimiento recomendado para el desarrollo de un modelo es el siguiente:

- Definición y formulación del problema.
- Identificación de los factores controlantes: desarrollo de una descripción física del funcionamiento del sistema que ayude a su comprensión.
- Evaluación de los datos del problema: parámetros (coeficientes de dispersión, difusión, conductividad térmica, etc.) y datos propiamente dichos.
- Establecimiento un modelo matemático: definición de la situación, tipo de límites del sistema y ecuaciones que describan el comportamiento del sistema con el grado de detalle que se desea incluir para alcanzar los objetivos.
- Implantación de un procedimiento de solución.

Una vez desarrollado el modelo, éste se aplica a un proceso real. La primera etapa para poder aplicar el modelo a un sistema real suele ser la identificación de los parámetros incluidos en el modelo. La identificación de estos parámetros puede realizarse utilizando datos experimentales del sistema objeto de estudio y mediante el uso de las herramientas informáticas adecuadas. Con el objeto de evaluar la capacidad del modelo para simular el proceso se comparan los valores experimentales con los valores estimados mediante la utilización de ese modelo (Cameron & Gani, 2011).

1.3 Objetivos

La DOP queso Mahón-Menorca (MM) desea comercializar piezas de queso amparado con un peso inferior a 1 kg, y para ello es necesario garantizar que la calidad del producto reúne los requisitos fijados por el propio reglamento.

Para ello, y como fase inicial del estudio encaminado a tal fin, se ha establecido como objetivo principal de este TFG analizar el proceso de transferencia de agua que tiene lugar durante el proceso de maduración, así como definir parámetros objetivos representativos de su calidad sensorial. Para ello se han planteado diferentes objetivos específicos:

1. Estudio del proceso de transferencia de materia
 - Diseñar un modelo matemático representativo del transporte de agua y determinar teóricamente el tiempo necesario para que piezas de diferentes tamaños, maduradas en las mismas condiciones de temperatura y humedad de las cámaras, alcancen la misma humedad media que las piezas de queso MM amparadas.
 - Validar el modelo mediante la determinación de la humedad de piezas pequeñas maduradas en las mismas condiciones.

2. Parámetros de calidad: Textura y perfil de humedad
- Analizar las posibles relaciones existentes entre la dureza del queso y su humedad media.
 - Determinar la humedad puntual a lo largo de los dos ejes del queso, el longitudinal y el transversal, en vistas a valorar posibles fenómenos de encostramiento. Posteriormente, y fuera del ámbito de este TFG, se realizará la elaboración controlada de piezas de pequeño tamaño y se analizarán sus características sensoriales y texturales con el objeto de validar el modelo propuesto.

2. Materiales y métodos

2.1. Elaboraciones de queso

En el momento actual hay 18 elaboradores de queso Mahón-Menorca adscritos a la DOP. Se han llevado a cabo elaboraciones de queso en las firmas colaboradoras para este estudio (Cooperativa Insular ganadera (COINGA), “ALA DE ORO”: Hijo de Fco. Quintana (Quintana) y Dalrit SL) . Cada elaborador sigue sus pautas habituales de fabricación y la maduración se realiza en las cámaras de cada empresa. Las piezas, con diferente tiempo de maduración se mandan refrigeradas para su análisis a la UIB. En la Tabla 2.1.1 se indican las condiciones de maduración de cada elaborador y las dimensiones de las piezas analizadas.

Tabla 2.1.1 Condiciones de maduración y dimensiones medias de las piezas

	Temperatura cámara maduración (°C)	Humedad relativa cámara maduración (%)	Dimensiones (10 ²) (m)		
			X	Y	Z
Coinga	11-13	80-85	20.0	20.3	8.2
Quintana	16	80	21.2	21.8	6.6
Dalrit	14	75-80	21.0	20.6	7.7

Preparación de la muestra.

Para realizar el análisis de una pieza de queso se sigue siempre el mismo patrón de corte.

- Corte de una loncha central de 1 cm de la base cuadrada de la pieza por su lado más largo. Esa loncha se considerará representativa de todo el queso y, por esa razón, será la que se utilizará para el estudio del perfil de humedad.
- Justo en contacto con la loncha central se corta una loncha de 0.5 cm que también será representativa de todo el perfil de queso y que se utilizará para la medida de la humedad media de la pieza una vez mezclada y triturada.

De las dos lonchas descritas se cortan 3 mm de la zona más cercana a la corteza, que se descartan.

- Finalmente la medida de la dureza se toma en $\frac{1}{4}$ de la pieza y en la mitad de la pieza. Por tanto, se toma la dureza en las dos caras d del corte de $\frac{1}{4}$ de pieza y en las dos d de media pieza. Los puntos elegidos para tomar la dureza en cada cara son dos y siempre se toman los mismo os. Estos puntos corresponden a la zona intermedia entre el centro y la corteza. De esa manera, se realizan las 8 medidas de dureza.

2.2 Equipo de resonancia magnética nuclear de bajo campo

El equipo de resonancia magnética nuclear de bajo campo utilizado es un Bruker Minispec mq20 RMN Analyzer (Bruker Biosciences Española, Madrid, Spain). La fuerza del campo en operación es de 0.47 T, resultando una frecuencia Larmor de 19.98 MHz para ^1H . La temperatura de trabajo es de $40.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$. La optimización de la frecuencia se realiza cada 24 h con un material de referencia suministrado por el fabricante.

2.3. Técnicas experimentales

2.3.1. Determinación de las curvas de secado

La determinación de las curvas de secado se realizó mediante el seguimiento del cambio de peso de tres piezas de la elaboración. En dicha pesada se utiliza una báscula con dos decimales de precisión.

2.3.2. Determinación de los perfiles de humedad.

A la hora de preparar las muestras de los perfiles se sigue un patrón de corte preciso para tener suficientes puntos significativos de todo el perfil trasversal y longitudinal del queso (figura 2.3.1).

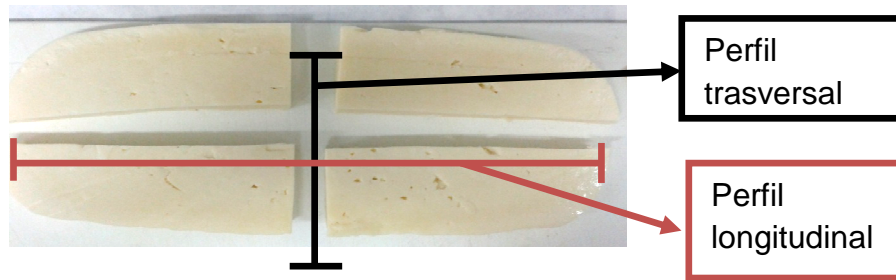


Figura 2.3.1 Patrón de corte de perfiles de humedad

Cada sección se divide en cubos de 1 cm x 1 cm x 1cm, si se trata del perfil longitudinal o, en cubos de 1 cm x 1 cm x 0.5 cm si se trata del perfil trasversal. Cada cubo se pesa sobre un film transparente para evitar la evaporación de agua y se envuelve para introducirlo en un tubo de vidrio de 18 mm de diámetro que será previamente atemperado antes de realizar la determinación. La determinación se realiza a 40°C.

2.3.3 Determinación de la densidad del queso

Se determina la densidad mediante el peso de una porción de la muestra de masa conocida y la medida del desplazamiento de volumen de agua cuando dicho trozo se introduce en una probeta de 200 ml conteniendo 100 ml de agua. Por cociente entre masa y volumen se obtiene la densidad.

2.4. Análisis físico-químicos

Todas las determinaciones se han realizado por triplicado.

2.4.1. Determinación de humedad

El método experimental utilizado para obtener la humedad media de cada pieza de queso Mahón-Menorca consiste en una evaporación al vacío del agua que contiene en queso (Norma FIL-IDF 4:1958).

2.4.2 Determinación de la dureza

Para medir la textura de la pieza se utiliza el durómetro Bareiss HPE que tiene una escala de dureza de 0 a 100 Shore con precisión de décima de unidad.

2.5. Análisis estadístico

Para la elaboración del modelo se utiliza en Programa Matlab R2009A acoplado al simulador COMSOL Multiphysics 3.4.

Para valorar el modelo se utilizan los intervalos de confianza y el error relativo medio.

El error relativo medio se calcula con la siguiente ecuación:

$$MRE = \frac{100}{N} \sum_{I=1}^N \frac{|V_{ei} - V_{ci}|}{V_{ei}} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Siendo, V_{ei} los valores experimentales y, V_{ci} los valores calculados.

Los intervalos de confianza son el par de números entre los cuales se estima que estará cierto valor desconocido con una determinada probabilidad de acierto.

Formalmente, estos números determinan un intervalo, que se calcula a partir de datos de una muestra, y el valor desconocido es un parámetro poblacional. La probabilidad de éxito en la estimación se representa con $1 - \alpha$ y se denomina *nivel de confianza*. En estas circunstancias, α es el llamado error aleatorio o *nivel de significación*, esto es, una medida de las posibilidades de fallar en la estimación mediante tal intervalo.

3. Resultados y discusión

A continuación se van a exponer los resultados más relevantes y se va a proceder a su discusión.

3.1. Curvas de secado

Las curvas de secado de productos agroalimentarios, suelen presentar períodos de inducción y de velocidad de secado constante muy cortos; por lo cual el período de secado con velocidad decreciente es, habitualmente, representativo del proceso.

La humedad del producto W , en base seca, se calculó a partir del peso inicial de la materia fresca (P_0) y humedad inicial del producto W_0 en base húmeda, obtenido según el método descrito en el apartado 2.4.1 y, empleando la ecuación 3.1

$$W = \frac{W_0 \cdot P_0}{100 - (W_0 \cdot P_0)} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

La disminución del contenido de humedad, con respecto al tiempo, se representó en la figura 3.1.1, para cada una de las elaboraciones.

**Efecto del tamaño de la pieza en queso Mahón-Menorca.
Implicaciones sobre la calidad del producto.**

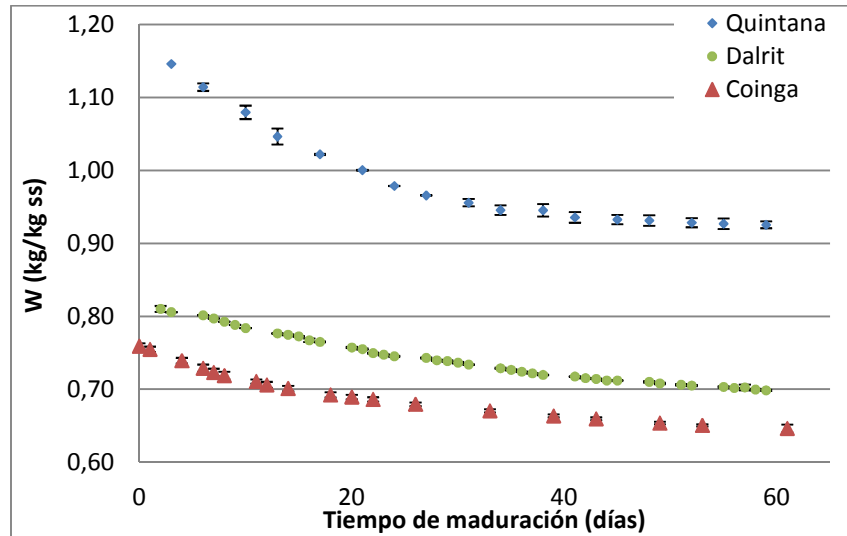


Figura 3.1.1 Curvas de secado. Empresas colaboradoras: Quintana, Coinga y Dalrit.

El seguimiento de pesos se ha realizado durante 59 días para las elaboraciones realizadas en las firmas Quintana y Dalrit y durante 61 días en la de Coinga. Las piezas de queso presentaron diferente humedad inicial. Las piezas elaboradas por Quintana presentaron mayor humedad. Mientras las piezas de Dalrit y Coinga iniciaron la maduración con una humedad de 0,759 y 0,810 kg/kg ss respectivamente, las de Quintana iniciaron el proceso a una humedad de 1,146 kg/kg ss.

Puede observarse, en todas ellas, una disminución continua de la humedad con el tiempo. La curva de secado de las piezas elaboradas en la firma Quintana es más pronunciada que las de Dalrit y Coinga que tienen una velocidad de disminución similar. Estas diferencias se deben a la humedad inicial de la materia prima: consecuencia de los procesos previos a la maduración: Cuajado, Moldeo, Prensado, Salado y Oreo y a las condiciones de maduración, es decir, la temperatura y la humedad relativa del aire en la cámara que se especifican en la Tabla 2.1.

En concreto, tras aproximadamente 60 días de maduración, los contenidos en humedad de las piezas de cada elaborador fueron los siguientes: 0,926. 0.699 y 0.647 kg agua/kg ss para las muestras de Quintana, Dalrit y Coinga respectivamente.

3.2. Relación textura-humedad

Se ha llevado a cabo la determinación de la dureza de las diferentes muestras siguiendo la metodología propuesta en el apartado 2.4.2 y se han obtenido los resultados presentados en la Figura 3.2.1. En cada pieza se realizaron 8 medidas de dureza, mostrándose en la figura los valores medios junto con las correspondientes desviaciones estándar.

**Efecto del tamaño de la pieza en queso Mahón-Menorca.
Implicaciones sobre la calidad del producto.**

Los resultados de dureza obtenidos para las muestras de queso Mahón-Menorca son similares los encontrados en la bibliografía sobre otros ensayos con quesos (Brighenti, Govindasamy-Lucey, Lim, Nelson, & Lucey, 2008).

Para cada lote de muestras, correspondiente a cada elaborador, se ha realizado un ajuste lineal de los datos de dureza con respecto a la humedad media.

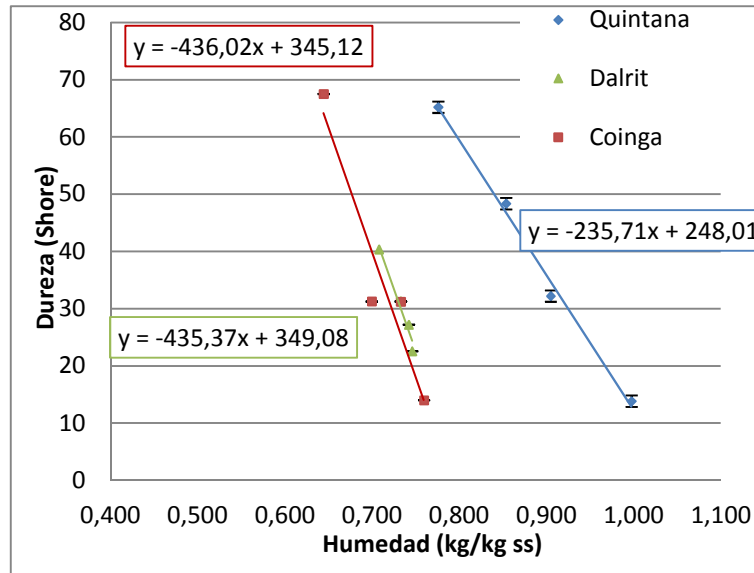


Figura 3.2.1. Representaciones de dureza frente a la humedad.

Se observa que la dureza aumenta con la disminución de la humedad, es decir, así como avanza el proceso de maduración del queso su textura evoluciona de forma que aumenta su dureza, de modo que, la pieza cada vez es más consistente. Para Coinga y Dalrit dicha evolución es muy similar y las dos representaciones de la dureza con respecto a la humedad se solapan. Ambas evoluciones son bastante pronunciadas puesto que las representaciones resultan ser casi verticales. En contraposición, para Quintana la evolución no es tan pronunciada. Por tanto, con un mismo cambio de humedad de la pieza, Quintana presentaría una evolución de la dureza menor que en el caso de Coinga y Dalrit.

El ajuste lineal de la dureza de las piezas con su humedad media ha dado los siguientes resultados:

Tabla 3.2.1 Ajustes lineales de dureza respecto a humedad

Coinga	Dureza=-436.02*W(b.s.)+345.12	$r^2= 0.92$
Quintana	Dureza=-235.71*W(b.s.)+248.01	$r^2= 0.99$
Dalrit	Dureza=-435.37*W(b.s.)+349.08	$r^2= 0.96$

Se han obtenido unos coeficientes de correlación superiores a 0,9 para todas las elaboraciones y superiores a 0,95 para las muestras elaboradas por Quintana y Dalrit. Este hecho es indicativo de la existencia de una relación lineal entre la humedad de la pieza y su dureza. Por tanto, una medida de la dureza nos proporciona una valoración indirecta de la humedad y viceversa.

Hay que tener en cuenta que esta relación es válida para el periodo de maduración estudiado, es decir, para 60 días.

3.4. Modelo difusivo

La difusión es un mecanismo de transporte de materia basado en movimientos moleculares y es frecuente considerar que la transferencia de humedad durante el período de secado con velocidad decreciente sigue un mecanismo difusivo, (ya que el fenómeno difusivo es el predominante), y que puede describirse correctamente mediante la segunda Ley de Fick, combinada con el balance microscópico de materia (Cameron, Hantos, Perkins, & Stephanopoulos, 2001; Fox & Fox, 2000).

Para ello, un coeficiente de difusión efectivo (D_{ef}), representativo del proceso global de transporte, combina los diferentes mecanismos de transferencia de materia como la difusión molecular, la difusión líquida, la capilaridad, la difusión de vapor y todos los otros factores que pueden afectar a las características del secado.

De este modo, los modelos matemáticos que describen el proceso de secado sobre la base de mecanismos difusivos utilizan el gradiente de concentración de agua como la fuerza impulsora del proceso.

Asumiendo que el comportamiento del sólido es isótropo respecto a la especie que se transfiere, la expresión diferencial espacial que se obtiene por combinación del balance microscópico de materia con la ley de Fick, adopta la siguiente forma:

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = D_{ef} \nabla^2 W_i \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Esta expresión general tomará diferentes formas según la geometría del sólido. En geometría laminar y paralelepípedica adopta las siguientes formas:

· Geometría laminar

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

· Geometría paralelepípedica

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 W_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_i}{\partial z^2} \right) \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

t : tiempo (s)

W_i : Contenido en humedad puntual (kg agua/kg sólido seco)

D_{ef} : Coeficiente de difusión efectivo (m^2/s)

x,y,z: coordenadas del punto del que se tiene la humedad (m)

Las ecuaciones consideradas en la resolución del modelo de difusión por separación de variables son las siguientes:

$$\text{Humedad adimensional} = Y = \frac{W_{aire} - W_i}{W_{aire} - W_o} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

$$\text{Tiempo adimensional} = X = \frac{\alpha \cdot t}{r_m^2} \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

$$\text{Posición adimensional} = n = \frac{r}{r_m} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

$$\text{Inversa Num. de Biot} = m = \frac{k}{h \cdot r_m} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

Cuando predomina la resistencia interna, es decir, puede considerarse que $m=0$, la ecuación representativa del transporte de materia en un sólido con geometría laminar puede escribirse como se muestra en la ecuación 3.9.

$$Y_{li} = 2 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(-1)^{v-1}}{(v - 1/2) \cdot \pi} \exp\left(-\left(v - 1/2\right)^2 \pi^2 X\right) \cos\left(\left(v - 1/2\right) \pi n\right) \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

Y si en lugar de la humedad puntual se quiere estimar la humedad media, la ecuación representativa sería la ecuación 3.10.

$$Y_{li_{medio}} = 2 \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{\left(v - 1/2\right)^2 \pi^2} \exp\left(-\left(v - 1/2\right)^2 \pi^2 X\right) \quad (\text{Ecuación 3.10})$$

Estas ecuaciones son las que se utilizarían en el caso de una lámina pero para una geometría paralelepédica, en este caso, se tienen que considerar tres láminas perpendiculares que forman el paralelepípedo. Por tanto se multiplican las soluciones de las tres láminas para obtener la solución de paralelepípedo.

Una vez planteadas las ecuaciones hay que tener en cuenta las condiciones de maduración y las medidas de las piezas que se resumen en la tabla 2.1.1. El número de términos utilizados es de 250 y la humedad de equilibrio se considera del 12.81% que es la humedad de la isoterma en las condiciones de maduración utilizadas.

3.4.1. Identificación paramétrica y validación del modelo

Se considera que las medidas de las piezas ofrecen un volumen de pieza no correspondiente con la realidad ya que las piezas no son paralelepípedos perfectos. Por ello, a partir de la densidad y la masa de la pieza se obtuvo un volumen equivalente. Dicho volumen es el que se utilizó para llevar a cabo la identificación del coeficiente de difusión para cada lote de muestras.

Los resultados del volumen equivalente se resumen en la tabla 3.4.1

Tabla 3.4.1 Resultados de la obtención del volumen equivalente

	Densidad (g/cm ³)	Peso pieza (g)	Volumen equivalente (cm ³)	Volumen inicial con medidas (cm ³)	Dimensiones equivalentes (cm)		
					X	Y	Z
Coinga	1.090	3163.4	2902.9	3334.1	19.1	19.4	7.8
Quintana	1.099	2698.2	2454.3	3050.3	19.7	20.3	6.1
Dalrit	1.234	3452.3	2797.2	3334.3	19.81	19.5	7.3

El volumen equivalente resulta ser diferente al volumen inicial (variación del 13, 19 y 16% respectivamente) obtenido con las medidas de la pieza. Eso confirma que la forma no es un paralelepípedo perfecto.

Por esta razón, se utilizan las medidas del volumen equivalente para el desarrollo del modelo. Para ello se va a suponer una reducción de las tres dimensiones en igual proporción, obteniéndose las dimensiones equivalentes que se muestran en la tabla.

Utilizando las dimensiones equivalentes adecuadas y las condiciones de maduración específicas para cada elaborador se realiza la modelización obteniendo los resultados representados en la figura 3.4.1.

Se observa que el modelo permite simular adecuadamente las curvas de secado experimentales.

Los coeficientes de difusión identificados mediante el modelo son los siguientes:

Tabla 3.4.2 Coeficientes de difusión identificados.

	D _{ef} (10 ¹²)(m ² /s)	Intervalos de confianza D _{ef} (10 ¹²) (m ² /s)		%ERM
Coinga	2.78	2.241	2.556	3.56E-03
Quintana	3.93	3.086	3.712	1.18
Dalrit	1.92	1.529	1.792	0.94

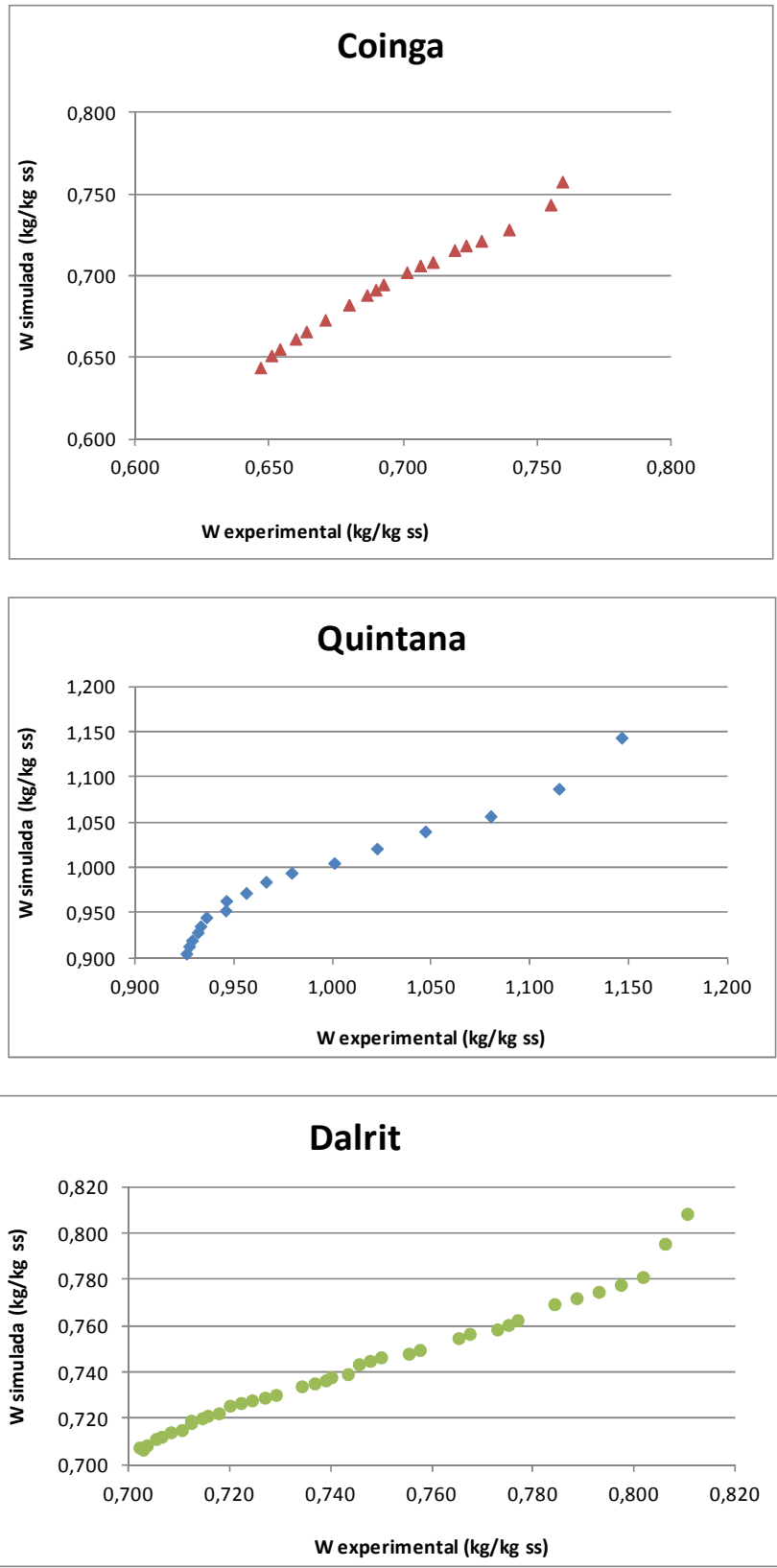


Figura 3.4.1 Contenido en humedad estimado mediante el modelo frente al correspondiente experimental para cada elaborador.

Los tres coeficientes de difusión efectiva identificados son del mismo orden de magnitud pero son distintos. Eso se debe a los mismos factores que hacen que las curvas de secado sean distintas, es decir, a los procesos previos a la maduración y a las condiciones de maduración de cada elaborador. Estos coeficientes de difusión identificados son similares a los identificados por otros autores en diferentes tipos de queso (Floury, Jeanson, Aly, & Lortal, 2010; Payne & Morison, 1999 ;Rossello, Femenia, Bon, & Simal, 2011).

Para la valoración del modelo se utilizan los intervalos de confianza y el error medio. Los intervalos de confianza son bastante pequeños con lo cual se demuestra que el modelo se ajusta apropiadamente a los datos experimentales. Por otra parte, el error medio que es error que comete el modelo en el ajuste a los datos experimentales resulta ser diferente para los tres elaboradores. En el caso de Coinga el error medio es muy pequeño pero en los casos de Quintana y Dalrit es más grande.

3.4.3. Simulación del proceso de maduración de piezas de diferentes tamaños

Para predecir las curvas de secado de piezas de menor tamaño se admitió como hipótesis de partida, que tendrían el mismo comportamiento que las piezas grandes estudiadas y que, por tanto, el coeficiente de difusión sería el mismo ya que se encuentran en las mismas condiciones de maduración y se producirían con la misma materia prima.

Por ello, y a modo de ejemplo, se han propuesto cuatro pesos iniciales diferentes para piezas más pequeñas que las originales y se han simulado las correspondientes curvas de secado. Para la simulación se utilizaron unas dimensiones proporcionales a las dimensiones de las piezas grandes teniendo en cuenta su densidad y el peso propuesto.

Los pesos propuestos han sido de 1500, 1000, 750 y 500 g. Para dichos pesos las dimensiones estimadas son las que se recogen en la tabla 3.4.3.

Tabla 3.4.3 Dimensiones piezas pequeñas propuestas

Peso (g)	Dimensiones Coinga (cm)			Dimensiones Quintana (cm)			Dimensiones Dalrit (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
500	10.33	10.50	4.23	11.24	11.56	3.50	10.40	10.21	3.81
750	11.82	12.02	4.85	12.87	13.23	4.01	11.91	11.69	4.37
1000	13.01	13.22	5.33	14.16	14.56	4.41	13.10	12.87	4.81
1500	14.89	15.14	6.11	16.21	16.67	5.05	15.00	14.73	5.50

Tal y como se observa en la tabla, las tres dimensiones de las piezas van disminuyendo progresivamente con la disminución del peso propuesto. Con estas dimensiones se simula la humedad de las piezas pequeñas para los mismos días de maduración que en el estudio de las piezas grandes. En las siguientes figuras se

representan los resultados de las curvas de secado simuladas para las 4 piezas pequeñas propuestas y para las piezas grandes correspondientes.

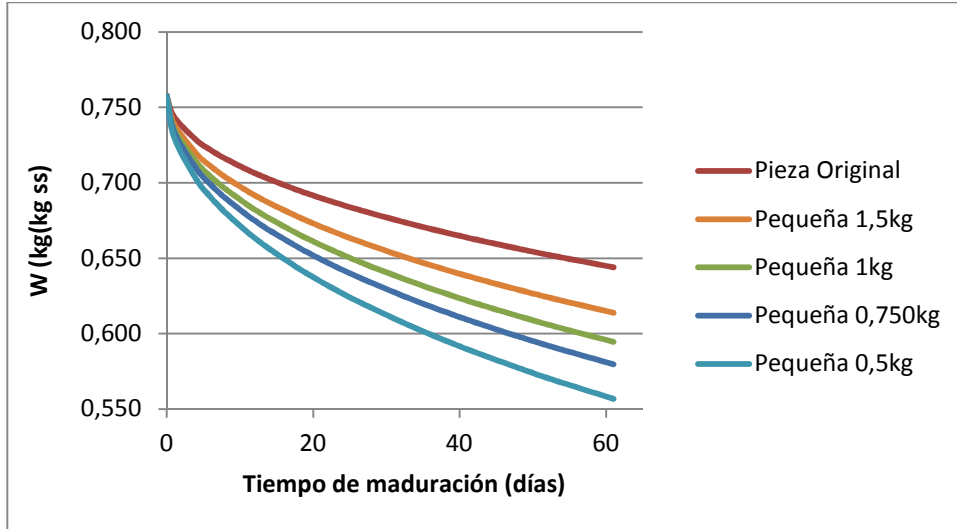


Figura 3.4.2. Simulación de las curvas de secado de queso Coinga con diferentes pesos iniciales

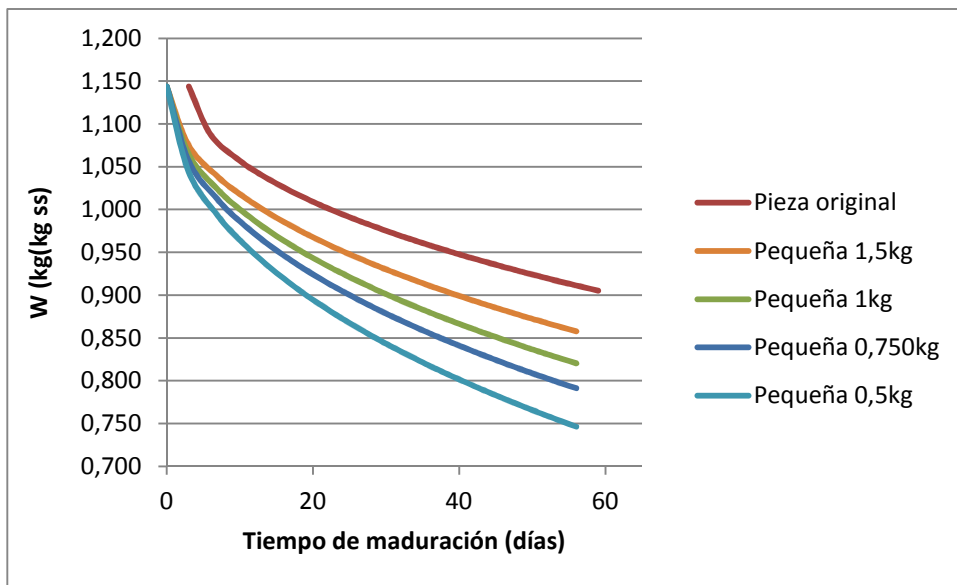


Figura 3.4.3 Simulación de las curvas de secado de queso Quintana con diferentes pesos iniciales

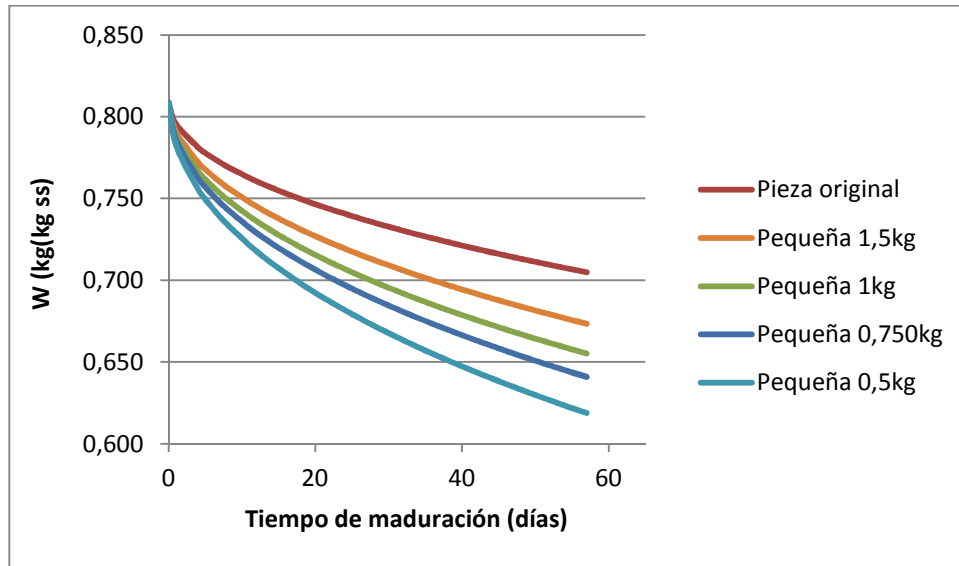


Figura 3.4.4 Simulación de las curvas de secado de queso Dalrit con diferentes pesos iniciales

Todas las curvas de secado obtenidas para piezas pequeñas tienen la misma humedad inicial que las piezas grandes y quedan siempre por debajo de las curvas de secado de las piezas grandes correspondientes. Este hecho era predecible puesto que las piezas pequeñas presentan una maduración más rápida que las grandes ya que su tamaño es menor. Además, cuanto menor es el peso de la pieza y por tanto, su tamaño, más rápida resulta ser su maduración.

Para los tres elaboradores se obtienen curvas de evolución paralela para las piezas pequeñas propuestas. Por esta razón, éstas permiten determinar, mediante interpolación, en las curvas de secado, los tiempos equivalentes de maduración para las piezas pequeñas.

Si, por ejemplo, se quisiera obtener piezas pequeñas en el mismo estado de maduración que las grandes al final de la curva de secado experimental se tendría que interpolar sobre la curva de secado simulada de las piezas pequeñas. Así se conocería el tiempo de maduración equivalente que requieren las piezas pequeñas para dicho objetivo.

Se han realizado estas interpolaciones con la finalidad de ejemplificar el método que se seguiría puesto que, si no se quisieran piezas pequeñas en el mismo estado de maduración que las grandes al final de la curva de secado sino en otro estado de maduración intermedio, el procedimiento sería análogo.

Este procedimiento permitiría una predicción del comportamiento de las piezas pequeñas para poder optimizar así el tiempo de permanencia en la cámara de maduración durante su producción y, además, tener un control sobre la humedad media de las piezas en cada momento.

Estas curvas garantizarían al elaborador obtener un producto con la humedad deseada en el tiempo requerido. Esta posibilidad permite al elaborador asegurarse de ofrecer un producto de calidad al consumidor y eso es, en parte, lo que se supervisa por el consejo regulador de la DOP del queso Mahón-Menorca.

El resultado de las interpolaciones para obtener piezas pequeñas en el punto de maduración final de las piezas grandes se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3.4.4 Tiempos equivalentes de maduración piezas pequeñas en el estado de maduración final de las piezas grandes.

Pieza	Coinga Tiempo de maduración (días).	Quintana Tiempo de maduración (días). Humedad objetivo	Dalrit Tiempo de maduración (días). Humedad objetivo
Original	61	56	57
1500 g	37.0	38.0	32.7
1000 g	28.3	28.9	25.0
750 g	23.3	23.9	20.6
500 g	17.8	18.2	15.7
Humedad objetivo	0.644 kg/kg ss	0.905 kg/kg ss	0.705 kg/kg ss

Para las piezas de Coinga y Quintana los tiempos equivalentes resultan casi los mismos para alcanzar una humedad final similar. Las muestras de Dalrit presenta un tiempo equivalente menor para la misma humedad.

De este modo, se sabría que para obtener una pieza pequeña de 1kg de Quintana con una humedad de 0.905 kg/kg ss se necesitarían 29 días de maduración que es el tiempo equivalente a 56 días de maduración para una pieza grande.

3.4.4. Perfiles de humedad

Se ha seguido el procedimiento experimental detallado en el apartado 2.3.2 y se han obtenido los perfiles de humedad de las piezas al final de su maduración. Para las piezas elaboradas por Quintana se presenta una pieza de 41 días de maduración y para Coinga y Dalrit piezas de 56 días de maduración.

Las representaciones corresponden a la humedad en base seca (kg/kg ss) respecto a la longitud adimensional del perfil transversal o longitudinal, según corresponda. Dicha longitud adimensional se utiliza para poder comparar todas las piezas puesto que no todas tienen las mismas medidas tal y como ya se ha indicado anteriormente.

Para obtener la longitud adimensional se pondera la posición de la humedad puntual determinada según el espesor de la muestra. A la vez, dicho espesor se obtienen proporcionalmente al peso del cubo cortado para cada punto.

**Efecto del tamaño de la pieza en queso Mahón-Menorca.
Implicaciones sobre la calidad del producto.**

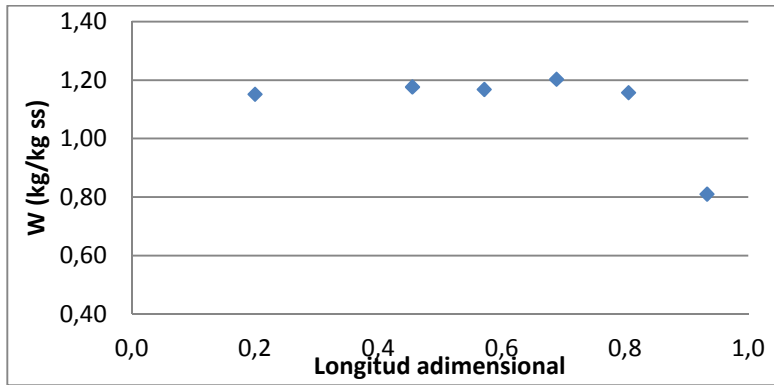


Figura 3.4.5 Perfil de humedad transversal. Queso Quintana de 41 días de maduración.

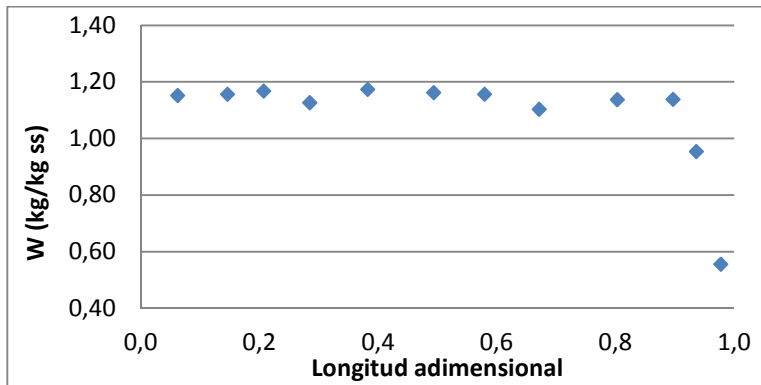


Figura 3.4.6 Perfil de humedad longitudinal. Queso Quintana de 41 días de maduración

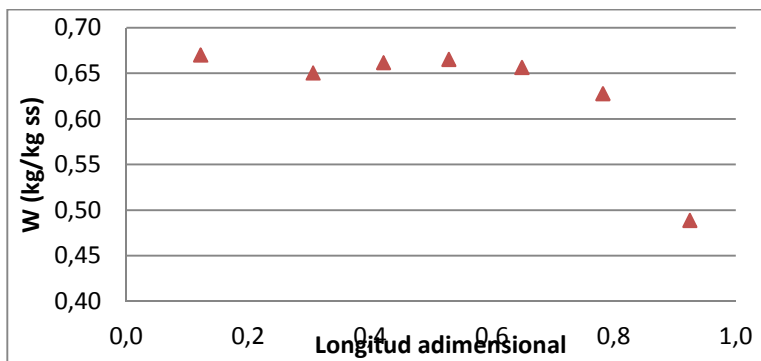


Figura 3. 4.7 Perfil de humedad transversal. Queso Coinga de 56 días de maduración

**Efecto del tamaño de la pieza en queso Mahón-Menorca.
Implicaciones sobre la calidad del producto.**

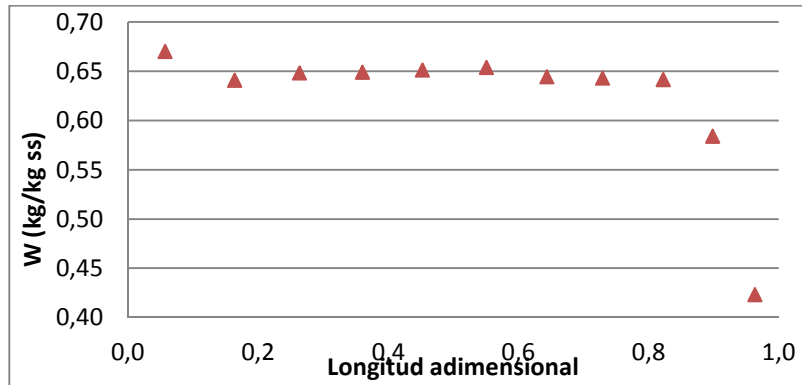


Figura 3.4.8 Perfil longitudinal pieza Coinga de 56 días de maduración

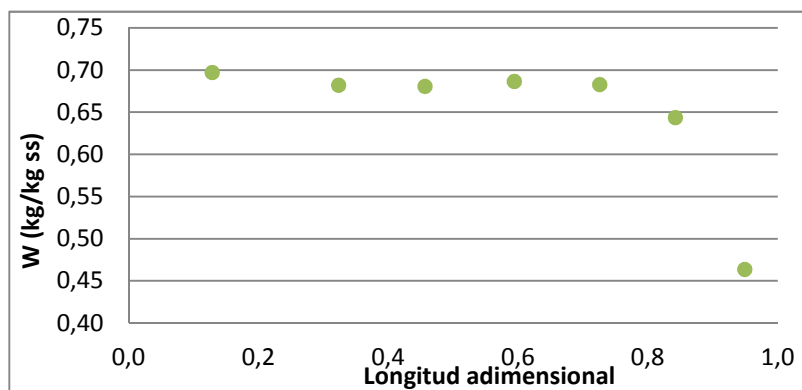


Figura 3.4.9 Perfil transversal pieza Dalrit de 56 días de maduración

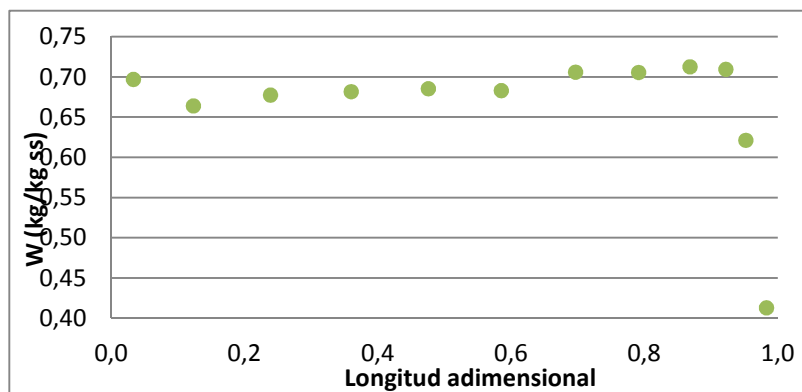


Figura 3.4.10 Perfil longitudinal pieza Dalrit de 56 días de maduración

En todas las figuras se observa un perfil prácticamente plano las posiciones más próximas a la corteza, puesto que el extremo se encuentra en contacto con el. Este hecho demuestra que las piezas son homogéneas y no presentan fenómenos de encroscamiento.

Estos perfiles tienen gran parecido con los perfiles determinados en queso Mahón-Menorca en otras experimentaciones (Simal, Sánchez, Bon, Femenia, & Rosselló, 2001) y en otros quesos como el Cheddar (Reinbold, Ernstom, & Hansen, 1992).

4. Conclusiones

- Se han obtenido las curvas de secado durante 60 días para piezas de queso Mahón-Menorca de tres elaboradores diferentes. En ellas se observa una disminución de la humedad de la pieza a medida que transcurren los días de maduración. En el caso de las piezas elaboradas por las firmas Coinga y Dalrit, las curvas de secado resultan ser muy similares pero, en cambio, para Quintana la curva de secado tiene un descenso más pronunciado. La causa de esas diferencias son las diferentes condiciones de elaboración y de la materia prima utilizada.
- Los resultados obtenidos de la dureza para las piezas se pueden relacionar con la humedad media. Dicha relación indica que a medida que se pierde humedad, es decir, que el proceso de maduración avanza, la dureza aumenta en mayor o menor grado. Para especificar mejor esta tendencia se ha establecido una regresión lineal para cada elaborador obteniéndose tendencias muy similares para las piezas de Coinga y Dalrit. Ambos elaboradores de queso MM con leche pasteurizada.
- Se ha planteado un modelo difusivo representativo de la pérdida de agua que sufren las piezas sin tener en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia. Dicho modelo ha sido resuelto por el método de separación de variables, asumiendo una geometría paralelepédica. Para corregir el error consecuencia de que las piezas no son perfectamente paralelepédicas, se ha medido la densidad de las piezas para obtener un volumen equivalente utilizando su masa. Por aplicación del modelo propuesto, se han simulado adecuadamente las curvas de secado experimentales y, además, se han identificado los coeficientes de difusión efectiva. Éstos tienen valores similares para los tres elaboradores y el mismo orden de magnitud que los coeficientes identificados en otras experiencias externas.
- Se ha llevado a cabo la simulación de piezas pequeñas con el mismo coeficiente de difusión efectivo que las grandes correspondientes. Se proponen cuatro pesos para las piezas: 1500 g, 1000 g, 750 g y 500 g. Utilizando la interpolación en las curvas de secado se obtiene el tiempo de maduración equivalente a determinada humedad de las piezas grandes, es decir, se puede predecir el tiempo necesario para la maduración deseada de las piezas pequeñas. La información obtenida permitirá prever la evolución de su maduración.
- Por último se han analizado los perfiles de humedad de las piezas mediante RMN de campo bajo. Dichos perfiles, al final de la maduración resultan ser prácticamente planos (exceptuando la zona en contacto con la corteza). Este hecho indica que el secado se produce a una velocidad adecuada garantizando así una calidad del producto.

5. Bibliografía

- Bourne, M. C. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. ACADEMIC PressINC.
- Brighenti, M., Govindasamy-Lucey, S., Lim, K., Nelson, K., & Lucey, J. A. (2008). Characterization of the Rheological, Textural, and Sensory Properties of Samples of Commercial US Cream Cheese with Different Fat Contents. *Journal of Dairy Science*, 91(12), 4501-4517.
- Bruce Litchfield, J., & Okos, M. R. (1992). Moisture diffusivity in pasta during drying. *Journal of Food Engineering*, 17(2), 117-142.
- Cameron, I. T., & Gani, R. (2011). *Product and Process Modelling: A Case Study Approach*: Elsevier Science & Technology.
- Cameron, I. T., Hangos, K., Perkins, J., & Stephanopoulos, G. (2001). *Process Modelling and Model Analysis*: Elsevier Science.
- Castell-Palou, A., Rosselló, C., Femenia, A., & Simal, S. (2012). Simultaneous Quantification of Fat and Water Content in Cheese by TD-NMR. *Food and Bioprocess Technology*, 1-10.
- Castell-Palou, A., Váquiro, H. A., Cárcel, J. A., Rosselló, C., Femenia, A., & Simal, S. (2012). Mathematical Modeling of Moisture Distribution and Kinetics in Cheese Drying. *Drying Technology*, 30(11-12), 1247-1255.
- Cenzano, I. (1992). *Los Quesos*: Madrid, Vicente, Antonio, Editor.
- Chen, X. D., & Putranto, A. (2013). *Modeling Drying Processes: A Reaction Engineering Approach*: Cambridge University Press.
- Dilanjan, S. C. K. F. B. d. Q. y. F. C. (1976). *Fundamentos de la elaboración del queso*. Zaragoza: Acribia.
- Farhat, I. A., Belton, P. S., Webb, G. G. A., & Chemistry, R. S. o. (2007). *Magnetic resonance in food science: from molecules to man : [proceedings of the 8th International Conference on the Applications of Magnetic Resonance in Food Science, 16-19 July 2006, University of Nottingham]*: Royal Society of Chemistry.
- Floury, J., Jeanson, S., Aly, S., & Lortal, S. (2010). Determination of the diffusion coefficients of small solutes in cheese: A review. *Dairy Science & Technology*, 90(5), 477-508.
- Fox, P. F., & Fox, P. F. (2000). *Fundamentals of Cheese Science*: Springer.
- Fox, P. F., McSweeney, P. L. H., Cogan, T. M., & Guinee, T. P. (2004). *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology: General Aspects*: Elsevier Science.
- González, R., Benedito, J., Cárcel, J. A., & Mulet, A. (2001). Cheese hardness assessment by experts and untrained judges. *Journal of Sensory Studies*, 16(3), 277-285.
- Gunasekaran, S., & Ak, M. (2010). *Cheese Rheology and Texture*: Taylor & Francis.
- Kapoor, R. (2003). *Effect of Ingredients and Processing Conditions on Process Cheese Functional Properties*: University of Minnesota.
- Law, B. A., & Tamime, A. Y. (2011). *Technology of Cheesemaking*: Wiley.
- Monakhova, Y. B., Godelmann, R., Andlauer, C., Kuballa, T., & Lachenmeier, D. W. (2013). Identification of Imitation Cheese and Imitation Ice Cream Based on Vegetable Fat Using NMR Spectroscopy and Chemometrics. *International Journal of Food Science*, 2013, 9.
- Moskowitz, H. R. (1987). *Food Texture: Instrumental and Sensory Measurement*: MARCEL DEKKER Incorporated.

- Payne, M. R., & Morison, K. R. (1999). A multi-component approach to salt and water diffusion in cheese. *International Dairy Journal*, 9(12), 887-894.
- Reinbold, R. S., Ernstrom, C. A., & Hansen, C. L. (1992). Temperature, pH, and Moisture Profiles During Cooling of 290-Kilogram Stirred-Curd Cheddar Cheese Blocks1. *Journal of dairy science*, 75(8), 2071-2082.
- Rossello, C., Femenia, A., Bon, J., & Simal, S. (2011). Moisture profiles in cheese drying determined by TD-NMR: Mathematical modeling of mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 7-7.
- Simal, S., Sánchez, E. S., Bon, J., Femenia, A., & Rosselló, C. (2001). Water and salt diffusion during cheese ripening: effect of the external and internal resistances to mass transfer. *Journal of Food Engineering*, 48(3), 269-275.
- Soccol, C. R., Pandey, A., & Larroche, C. (2013). *Fermentation Processes Engineering in the Food Industry*. Taylor & Francis.
- Tamime, A. Y. (2011). *Processed Cheese and Analogues*: Wiley.
- Welti-Chanes, J., & Velez-Ruiz, J. F. (2010). *Transport Phenomena in Food Processing*: Taylor & Francis.
- Zúñiga Hernández, L. A., Ciro Velásquez, H. J., & Osorio Saraz, J. A. (2007). Estudio de la dureza del queso edam por medio de análisis de perfil de textura y penetrometría por esfera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 60, 3797-3811.