

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**Departamento de Tecnología de Alimentos**



**EFFECTO DE LA CONTRACCIÓN EN LA CINÉTICA  
DE SECADO DE MÚSCULOS DE JAMÓN**

**TESIS DOCTORAL**

**Presentada por:**

**Gabriela Clemente Polo**

**Dirigida por:**

**Dr. D. Antonio Mulet Pons**

**Dr. D. José Bon Corbín**

**Valencia, 2003**





**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS  
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**D. ANTONIO MULET PONS, CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD DEL  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA Y D. JOSÉ BON  
CORBÍN, PROFESOR TITULAR DEL DEPARTAMENTO DE  
TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA DE VALENCIA**

**CERTIFICAN:** que la memoria titulada “Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón”, que para aspirar al grado de Doctora en Ciencia y Tecnología de los Alimentos presenta D. Gabriela Clemente Polo, realizada bajo nuestra dirección en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia, cumple las condiciones adecuadas para su aceptación como Tesis Doctoral, por lo que

**AUTORIZAN:** a la interesada a su presentación en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia.

Y para que conste a los efectos oportunos, presentamos la referida memoria, firmando el presente certificado en Valencia a 19 de diciembre de 2003.

Fdo. D. Antonio Mulet Pons

Fdo. D. José Bon Corbín



## ÍNDICE



	<b>Página</b>
1. RESUMEN .....	1
2. INTRODUCCIÓN .....	17
2.1. La operación de secado .....	20
2.1.1. Descripción de la operación de secado .....	20
2.1.2. Modelización de la operación de secado .....	24
2.1.3. El coeficiente de difusividad efectiva .....	27
2.1.3.1. Determinación de la difusividad efectiva .....	27
2.1.3.1.1. Cinéticas de sorción .....	28
2.1.3.1.2. Método de permeabilidad .....	29
2.1.3.1.3. Análisis de cinéticas de deshidratación .....	30
2.1.3.1.4. Curvas distancia-concentración .....	32
2.1.3.1.5. Resonancia magnética nuclear (RMN) .....	32
2.1.3.2. Valores de difusividad para algunos alimentos .....	33
2.1.3.3. Factores que afectan a la difusividad efectiva .....	35
2.1.3.3.1. Contenido en sal .....	35
2.1.3.3.2. Temperatura .....	35
2.1.3.3.3. Contenido en humedad .....	38
2.1.4. El coeficiente de transferencia de materia .....	38
2.1.5. El fenómeno de la contracción durante el secado .....	41
2.1.5.1. Modelización del secado considerando contracción ..	44
2.1.6. Métodos de resolución de los modelos de secado .....	46
2.2. Equilibrio aire – agua – alimento .....	47
2.2.1. El concepto de actividad de agua .....	47
2.2.2. Métodos de medida de la actividad de agua .....	49
2.2.3. Isotermas de sorción .....	50
2.2.3.1 Modelización de las isotermas de sorción .....	54
2.2.4. Calor isostérico de sorción .....	59
2.2.4.1. Determinación a partir de las isotermas de sorción ...	60
2.2.4.2. Determinación a partir de medidas calorimétricas ....	62
2.3. Aspectos estructurales de los tejidos animales .....	65
2.3.1. Composición química del músculo .....	67
2.3.2. Estructura muscular .....	68
2.3.3. El salado de la carne .....	71
2.4. Aspectos de calidad relacionados con el secado .....	72
2.5. Conclusiones .....	74
3. OBJETIVOS .....	77

	<b>Página</b>
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	79
4.1. Planificación experimental .....	79
4.2. Materia prima .....	80
4.3. Determinación de las isotermas de sorción .....	81
4.3.1. Preparación de la muestra .....	81
4.3.2. Determinación de la actividad de agua .....	83
4.3.3. Determinación de la humedad .....	85
4.3.4. Modelización de las isotermas de sorción .....	85
4.3.5. Isoterma de sorción de carne salada .....	87
4.3.6. Determinación del calor isostérico de sorción .....	88
4.4. Experiencias de secado .....	89
4.4.1. Técnicas experimentales .....	89
4.4.1.1. Medida de la humedad .....	89
4.4.1.2. Medida de la concentración de sal .....	89
4.4.2. Experiencias en secadero convectivo .....	91
4.4.2.1. Secadero convectivo .....	91
4.4.2.2. Preparación de la muestra .....	93
4.4.2.2.1. Cilindros infinitos .....	93
4.4.2.2.2. Cilindros finitos .....	94
4.4.2.3. Cinéticas de secado .....	94
4.4.2.4. Determinación de la contracción .....	95
4.4.2.4.1. Contracción de cilindros finitos .....	96
4.4.2.4.2. Contracción de cilindros infinitos .....	100
4.4.3. Secado en cámaras a baja temperatura .....	100
4.4.3.1. Cinéticas de cilindros .....	100
4.4.3.1.1. Obtención de cilindros .....	100
4.4.3.1.2. Determinación de la difusividad de sal .....	101
4.4.3.1.3. Determinación del tiempo de salado .....	104
4.4.3.1.4. Salado de las muestras .....	104
4.4.3.1.5. Cámaras de secado .....	105
4.4.3.1.6. Cinéticas de secado .....	108
4.4.3.1.7. Determinación de la contracción .....	109
4.4.3.2. Cinéticas de músculo entero .....	110
4.4.3.2.1. Preparación de las muestras .....	110
4.4.3.2.2. Cinéticas de deshidratación .....	111
4.5. Modelización de las cinéticas de secado .....	113
4.5.1. Modelización de geometría cilíndrica infinita .....	113
4.5.2. Modelización de geometría cilíndrica finita .....	115

	<b>Página</b>
4.5.3. Modelización del músculo entero .....	119
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>121</b>
5.1. Caracterización de la materia prima .....	121
5.2. Isotermas de sorción .....	121
5.2.1. Modelización de las isotermas de sorción .....	126
5.2.1.1. Modelo de Oswin .....	127
5.2.1.2. Modelo de Henderson .....	130
5.2.1.3. Modelo de Halsey modificado .....	132
5.2.1.4. Modelo de GAB .....	134
5.2.1.5. Modelo de BET .....	138
5.2.1.6. Comparación de los resultados obtenidos .....	141
5.2.2. Isotermas de carne salada .....	145
5.2.3. Calor isostérico de sorción .....	146
5.3. Contracción durante el secado .....	150
5.3.1. Secado en secadero convectivo .....	150
5.3.1.1. Contracción durante el secado de cilindros finitos ....	150
5.3.1.1.1. Comparación de métodos de medida .....	150
5.3.1.1.2. Ajuste de las funciones de contracción .....	153
5.3.1.2. Contracción durante el secado de cilindros infinitos ..	154
5.3.2. Secado de cilindros finitos en cámara de secado .....	157
5.3.3. Comparación de las funciones de contracción .....	159
5.3.4. Relación entre el agua perdida y la disminución de volumen .....	161
5.4. Secado en secadero convectivo .....	163
5.4.1. Secado de cilindros infinitos .....	163
5.4.1.1. Cinéticas de secado .....	163
5.4.1.2. Modelización de las cinéticas de secado .....	164
5.4.1.2.1. Modelo sin contracción y sin resistencia externa .....	165
5.4.1.2.2. Modelo con contracción y sin resistencia externa .....	166
5.4.1.2.3. Modelo sin contracción y con resistencia externa .....	169
5.4.2. Secado de cilindros finitos .....	174
5.4.2.1. Cinéticas de secado .....	175
5.4.2.2. Modelización de las cinéticas de secado .....	176
5.4.2.2.1. Modelo sin contracción y sin resistencia externa .....	176
5.4.2.2.2. Modelo con contracción y sin resistencia externa .....	178

	<b>Página</b>
5.4.2.2.3. Modelo sin contracción y con resistencia externa .....	180
5.4.2.2.4. Modelo con contracción y con resistencia externa .....	184
5.4.3. Comparación de resultados. Geometría finita e infinita .....	188
5.4.3.1. Identificación de la difusividad efectiva .....	188
5.4.3.2. Identificación del coeficiente de transferencia de materia .....	192
5.5. Secado de cilindros en cámara de secado .....	194
5.5.1. Determinación de la difusividad de sal .....	194
5.5.2. Cinéticas de secado .....	196
5.5.3. Modelización de las cinéticas de secado .....	198
5.5.3.1. Modelo sin contracción y sin resistencia externa .....	198
5.5.3.2. Modelo con contracción y sin resistencia externa .....	205
5.5.3.3. Modelo sin contracción y con resistencia externa .....	214
5.5.3.4. Modelo con contracción y con resistencia externa ...	217
5.5.3.5. Comparación de resultados .....	219
5.5.3.5.1. Bondad de los ajustes .....	219
5.5.3.5.2. Identificación de la difusividad efectiva .....	221
5.5.3.5.3. Identificación del coeficiente de transferencia de materia .....	223
5.6. Secado de músculos enteros en cámaras de secado .....	224
6. CONCLUSIONES .....	229
7. RECOMENDACIONES .....	235
8. NOMENCLATURA .....	237
9. BIBLIOGRAFÍA .....	245
10. ANEJOS .....	261
10.1. Correspondencia entre módulos adimensionales .....	261
10.2. Determinación de la difusividad de sal .....	263
10.3. Método de Separación de Variables. Aplicación a la ecuación de secado .....	265
10.4. Método de los Elementos Finitos. Aplicación al secado de carne ...	269
10.5. Método de las Diferencias Finitas. Aplicación al secado de carne ..	275

	<b>Página</b>
10.6. Cálculo k. Convección forzada .....	277
10.7. Cálculo k. Convección natural .....	281
10.8. Isotermas de sorción experimentales .....	283
10.9. Isotermas experimentales. Intervalos LSD .....	285
10.10. Modelización de isotermas. Modelo de Oswin .....	297
10.11. Modelización de isotermas. Modelo de Henderson .....	299
10.12. Modelización de isotermas. Halsey modificado .....	301
10.13. Modelización de isotermas. Modelo de GAB .....	303
10.14. Modelización de isotermas. Modelo de BET .....	305
10.15. Calor isostérico de sorción .....	307
10.16. Secado en secadero convectivo. Geometría cilíndrica infinita .....	309
10.17. Secado en secadero convectivo. Geometría cilíndrica finita .....	311
10.18. Secado en cámara de secado. Geometría cilíndrica finita .....	313
10.19. Convección forzada. Proporcionalidad entre k y v .....	323



## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>Página</b>
<b>Figura 2.1.</b>	Evolución de la producción de jamones (INE 2003).	17
<b>Figura 2.1.1.</b>	Curva de secado típica.	22
<b>Figura 2.1.2.</b>	Determinación de la difusividad a partir de la representación del $\ln(\Psi)$ frente al tiempo.	31
<b>Figura 2.1.3.</b>	Difusividad efectiva para varios alimentos a distintas temperaturas (Saravacos y Maroulis, 2001).	36
<b>Figura 2.2.1.</b>	Isotermas de adsorción y de desorción. Fenómeno de histéresis.	51
<b>Figura 2.2.2.</b>	Tipos de isotermas (Brunauer et al., 1940).	54
<b>Figura 2.3.1.</b>	Representación tridimensional del músculo esquelético (Renou et al., 2003).	66
<b>Figura 2.3.2.</b>	Músculos del jamón (Swatland, 1994).	68
<b>Figura 2.3.3.</b>	Corte transversal del jamón (Sayas, 1997).	69
<b>Figura 4.1.1.</b>	Diagrama de flujo de las experiencias realizadas.	79
<b>Figura 4.3.1.</b>	Carne finamente extendida sobre papel de aluminio.	81
<b>Figura 4.3.2.</b>	Muestra de carne al comienzo y al final del proceso de secado.	82
<b>Figura 4.3.3.</b>	Homogeneización de las muestras. Antes de picar y después.	82
<b>Figura 4.3.4.</b>	Equipos de medida de $a_w$ conectados a un ordenador.	84
<b>Figura 4.4.1.</b>	Recta de calibrado del analizador de cloruros Ciba Corning modelo 925.	91
<b>Figura 4.4.2.</b>	Secadero a escala de laboratorio.	93
<b>Figura 4.4.3.</b>	Cilindro "infinito" preparado para secar.	94
<b>Figura 4.4.4.</b>	Toma de medidas con el programa ADOBE PHOTOSHOP 5.5.	97

	<b>Página</b>
<b>Figura 4.4.5.</b> Esquema de la medida del volumen de la muestra por inmersión en aceite.	97
<b>Figura 4.4.6.</b> Representación de la densidad del aceite en función de su temperatura.	99
<b>Figura 4.4.7.</b> Esquema de la cámara de secado.	105
<b>Figura 4.4.8.</b> Disposición de las muestras en las cámaras de secado.	106
<b>Figura 4.4.9.</b> Fotografía del montaje de las cámaras de secado de carne salada.	107
<b>Figura 4.4.10.</b> Pesada de las muestras cilíndricas de <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	108
<b>Figura 4.4.11.</b> Fotos de la muestra BF_3_3_20 al final del secado.	109
<b>Figura 4.4.12.</b> Disposición de los músculos enteros en las cámaras de secado. Quemado de azufre.	111
<b>Figura 4.5.1.</b> Eje de coordenadas utilizado en la modelización de geometría cilíndrica infinita.	113
<b>Figura 4.5.2.</b> Ejes de coordenadas elegidos en la modelización de las cinéticas de deshidratación de cilindros finitos.	116
<b>Figura 4.5.3.</b> Eje de coordenadas utilizado en la modelización de los músculos enteros.	119
<b>Figura 5.2.1.</b> Isotherma experimental del músculo <i>Bíceps femoris</i> a las cuatro temperaturas estudiadas.	122
<b>Figura 5.2.2.</b> Isotherma experimental del músculo <i>Semimembranosus</i> a las cuatro temperaturas estudiadas.	122
<b>Figura 5.2.3.</b> Isotermas de desorción de los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	124
<b>Figura 5.2.4.</b> Comprobación de la isoterma propuesta por Comaposada et al. (2000a).	145
<b>Figura 5.2.5.</b> Representación gráfica del $\ln(a_w)$ frente a $1/T$ ( $K^{-1}$ ) para el cálculo de los calores isostéricos de desorción ( <i>Bíceps femoris</i> ).	147

	<b>Página</b>
<b>Figura 5.2.6.</b> Representación gráfica del $\ln(a_w)$ frente a $1/T$ ( $K^{-1}$ ) para el cálculo de los calores isostéricos de desorción ( <i>Semimembranosus</i> ).	147
<b>Figura 5.2.7.</b> Representación del calor isostérico de desorción (kJ/kg) frente a la humedad (kg agua/kg ss) para los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	148
<b>Figura 5.3.1.</b> Comparación entre los resultados obtenidos para el volumen por análisis de imagen e inmersión en aceite.	151
<b>Figura 5.3.2.</b> Comparación entre los resultados obtenidos para el volumen por medida directa con un calibre e inmersión en aceite.	151
<b>Figura 5.3.3.</b> Comparación entre los resultados obtenidos para el volumen por medida directa con un calibre y análisis de imagen.	152
<b>Figura 5.3.4.</b> Contracción del radio durante el secado de cilindros de geometría finita de carne de cerdo (BF y SM) en secadero convectivo a distintas velocidades de aire.	153
<b>Figura 5.3.5.</b> Contracción de volumen durante el secado de cilindros de geometría finita de carne de cerdo (BF y SM) en secadero convectivo a distintas velocidades de aire.	154
<b>Figura 5.3.6.</b> Variación del radio durante el secado de un cilindro de geometría infinita de <i>Bíceps femoris</i> de 2 cm de diámetro con velocidad del aire de 2 m/s.	155
<b>Figura 5.3.7.</b> Relación del contenido en humedad con la variación del radio durante el secado de un cilindro de geometría infinita de <i>Bíceps femoris</i> de 2 cm de diámetro con velocidad del aire de 2 m/s.	155
<b>Figura 5.3.8.</b> Relación entre el cociente $R/R_0$ y el contenido en humedad durante el secado de cilindros de geometría infinita en secadero convectivo por aire caliente.	157
<b>Figura 5.3.9.</b> Contracción del radio durante el secado de cilindros de carne de cerdo (BF y SM) salados en cámaras de secado.	158
<b>Figura 5.3.10.</b> Contracción del volumen durante el secado de cilindros de carne de cerdo (BF y SM) salados en cámaras de secado.	158

	<b>Página</b>
<b>Figura 5.3.11.</b> Representación del volumen de agua perdida frente al volumen perdido durante el secado para todas las cinéticas estudiadas.	161
<b>Figura 5.4.1.</b> Curvas de secado de cilindros infinitos de <i>Bíceps femoris</i> . Efecto de la velocidad del aire de secado.	164
<b>Figura 5.4.2.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) para la difusividad efectiva en función de la velocidad del aire de secado.	166
<b>Figura 5.4.3.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) para la difusividad efectiva en función de la velocidad del aire de secado, en la modelización realizada sin tener en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia.	168
<b>Figura 5.4.4.</b> Intervalos LSD (95% de nivel de confianza). Modelo sin contracción y con resistencia externa.	170
<b>Figura 5.4.5.</b> Intervalos LSD (95% de nivel de confianza). Comparación entre modelos que no incluyeron la contracción.	171
<b>Figura 5.4.6.</b> Representación del coeficiente de transferencia de materia obtenido con la correlación frente al identificado con el modelo propuesto.	173
<b>Figura 5.4.7.</b> Representación de $\ln(k)$ frente a $\ln(v)$ . Secado de cilindros infinitos.	174
<b>Figura 5.4.8.</b> Curvas de secado de cilindros finitos de <i>Bíceps femoris</i> . Efecto de la velocidad del aire de secado.	175
<b>Figura 5.4.9.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y sin resistencia externa a la transferencia de materia.	177
<b>Figura 5.4.10.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Comparación de modelos sin resistencia externa.	179
<b>Figura 5.4.11.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y con resistencia externa.	181
<b>Figura 5.4.12.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Comparación de modelos sin contracción.	182

	<b>Página</b>
<b>Figura 5.4.13.</b> Representación de los coeficientes de transferencia de materia calculados mediante la correlación semiempírica frente a los identificados mediante un método de optimización para los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> . Modelo sin contracción y con resistencia externa.	183
<b>Figura 5.4.14.</b> Representación de $\ln(k)$ frente a $\ln(v)$ . Secado de cilindros finitos en secadero convectivo. Modelo sin contracción y con resistencia externa.	184
<b>Figura 5.4.15.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Comparación de modelos con resistencia externa.	186
<b>Figura 5.4.16.</b> Representación de los coeficientes de transferencia de materia calculados mediante la correlación semiempírica frente a los identificados mediante un método de optimización para los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> . Modelo con contracción y con resistencia externa.	187
<b>Figura 5.4.17.</b> Representación de $\ln(k)$ frente a $\ln(v)$ . Secado de cilindros finitos en secadero convectivo. Modelo con contracción y con resistencia externa.	188
<b>Figura 5.4.18.</b> Representación de los coeficientes de transferencia de materia identificados considerando la contracción frente a los identificados sin considerarla para los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	192
<b>Figura 5.5.1.</b> Ganancia de sal para los distintos tiempos de salado. Comparación de los resultados experimentales y los calculados.	195
<b>Figura 5.5.2.</b> Curvas de secado de cilindros salados del músculo <i>Bíceps femoris</i> de 3 cm de diámetro y 2 cm de altura. Influencia de la temperatura.	197
<b>Figura 5.5.3.</b> Curvas de secado de cilindros salados del músculo <i>Semimembranosus</i> de 3 cm de diámetro y 2 cm de altura. Influencia de la temperatura.	197
<b>Figura 5.5.4.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) calculados para el músculo <i>Bíceps femoris</i> . Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	199
<b>Figura 5.5.5.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) calculados para el músculo <i>Semimembranosus</i> . Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	200

	<b>Página</b>
<b>Figura 5.5.6.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Solución analítica.	201
<b>Figura 5.5.7.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Solución numérica.	201
<b>Figura 5.5.8.</b> Representación de los valores de $\ln(D_e)$ frente a la inversa de la temperatura. Difusividades obtenidas utilizando la solución analítica. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	202
<b>Figura 5.5.9.</b> Representación de los valores de $\ln(D_e)$ frente a la inversa de la temperatura. Difusividades obtenidas utilizando la solución numérica. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	203
<b>Figura 5.5.10.</b> Resultados obtenidos utilizando una solución analítica y numérica del modelo sin contracción y sin resistencia externa. Cilindro de <i>Biceps femoris</i> de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura secado a temperatura de 15°C.	205
<b>Figura 5.5.11.</b> Resultados obtenidos utilizando el modelo con contracción y sin resistencia externa. Cilindro de <i>Biceps femoris</i> de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura, temperatura de secado 15°C.	207
<b>Figura 5.5.12.</b> Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo con contracción y sin resistencia externa.	208
<b>Figura 5.5.13.</b> Representación de los valores de $\ln(D_e)$ frente a la inversa de la temperatura. Modelo con contracción y sin resistencia externa.	209
<b>Figura 5.5.14.</b> Comparación entre los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo sin contracción y sin resistencia externa y con el modelo con contracción y sin resistencia externa. Músculo <i>Biceps femoris</i> .	210
<b>Figura 5.5.15.</b> Comparación entre los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo sin contracción y sin resistencia externa y con el modelo con contracción y sin resistencia externa. Músculo <i>Semimembranosus</i> .	210

	<b>Página</b>
<b>Figura 5.5.16.</b> Representación de la Ecuación de Arrhenius calculada con los valores identificados a partir de las experiencias determinadas en las cámaras de secado. Comparación con los resultados obtenidos a partir de las cinéticas determinadas en el secadero convectivo. Modelización sin considerar la contracción.	212
<b>Figura 5.5.17.</b> Modelización de la cinética de deshidratación de un cilindro de <i>Biceps femoris</i> de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura a 15°C. Modelo sin contracción y con resistencia externa.	215
<b>Figura 5.5.18.</b> Comparación de las k identificadas con las calculadas mediante la correlación semiempírica. Modelo sin contracción y con resistencia externa.	216
<b>Figura 5.5.19.</b> Modelización de la cinética de deshidratación de un cilindro de <i>Biceps femoris</i> de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura a 15°C. Modelo con contracción y con resistencia externa.	218
<b>Figura 5.5.20.</b> Comparación de las k identificadas con las calculadas mediante la correlación semiempírica. Modelo con contracción y con resistencia externa.	219
<b>Figura 5.5.21.</b> Cinética de secado a 15 °C de un cilindro de <i>Biceps femoris</i> de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura. Comparación entre los modelos utilizados.	220
<b>Figura 5.5.22.</b> Representación de los coeficientes de transferencia de materia identificados teniendo en cuenta la contracción frente a los identificados sin tenerla en cuenta.	223
<b>Figura 5.6.1.</b> Cinéticas experimental y calculada de <i>Biceps femoris</i> salado deshidratado a 5°C.	225
<b>Figura 5.6.2.</b> Cinéticas experimental y calculada de <i>Biceps femoris</i> salado deshidratado a 15°C.	226
<b>Figura 5.6.3.</b> Cinéticas experimental y calculada de <i>Semimembranosus</i> salado deshidratado a 5°C.	226
<b>Figura 5.6.4.</b> Cinéticas experimental y calculada de <i>Semimembranosus</i> salado deshidratado a 15°C.	227
<b>Figura 10.4.1</b> División del dominio en elementos y nodos. Numeración de nodos: local y global.	270

	<b>Página</b>
<b>Figura 10.4.2.</b> Herramienta de cálculo utilizada para resolver los modelos correspondientes a geometría cilíndrica infinita mediante el MEF.	273
<b>Figura 10.5.1.</b> Subdivisión del dominio en el Método de las Diferencias Finitas.	275
<b>Figura 10.6.1.</b> Correlación utilizada para el cálculo de $j_D$ .	279
<b>Figura 10.9.1.</b> Intervalos LSD para $W = 0.048$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	285
<b>Figura 10.9.2.</b> Intervalos LSD para $W = 0.065$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	285
<b>Figura 10.9.3.</b> Intervalos LSD para $W = 0.066$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	286
<b>Figura 10.9.4.</b> Intervalos LSD para $W = 0.067$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	286
<b>Figura 10.9.5.</b> Intervalos LSD para $W = 0.071$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	286
<b>Figura 10.9.6.</b> Intervalos LSD para $W = 0.079$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	287
<b>Figura 10.9.7.</b> Intervalos LSD para $W = 0.113$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	287
<b>Figura 10.9.8.</b> Intervalos LSD para $W = 0.115$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	287
<b>Figura 10.9.9.</b> Intervalos LSD para $W = 0.149$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	288
<b>Figura 10.9.10.</b> Intervalos LSD para $W = 0.163$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	288
<b>Figura 10.9.11.</b> Intervalos LSD para $W = 0.165$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	288
<b>Figura 10.9.12.</b> Intervalos LSD para $W = 0.178$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	289
<b>Figura 10.9.13.</b> Intervalos LSD para $W = 0.319$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris</i> .	289

	<b>Página</b>
<b>Figura 10.9.14.</b> Intervalos LSD para $W = 0.419$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris.</i>	289
<b>Figura 10.9.15.</b> Intervalos LSD para $W = 0.546$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris.</i>	290
<b>Figura 10.9.16.</b> Intervalos LSD para $W = 0.637$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris.</i>	290
<b>Figura 10.9.17.</b> Intervalos LSD para $W = 0.773$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris.</i>	290
<b>Figura 10.9.18.</b> Intervalos LSD para $W = 0.868$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris.</i>	291
<b>Figura 10.9.19.</b> Intervalos LSD para $W = 0.898$ kg agua/kg ss. <i>Bíceps femoris.</i>	291
<b>Figura 10.9.20.</b> Intervalos LSD para $W = 0.054$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	291
<b>Figura 10.9.21.</b> Intervalos LSD para $W = 0.057$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	292
<b>Figura 10.9.22.</b> Intervalos LSD para $W = 0.061$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	292
<b>Figura 10.9.23.</b> Intervalos LSD para $W = 0.064$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	292
<b>Figura 10.9.24.</b> Intervalos LSD para $W = 0.103$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	293
<b>Figura 10.9.25.</b> Intervalos LSD para $W = 0.122$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	293
<b>Figura 10.9.26.</b> Intervalos LSD para $W = 0.135$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	293
<b>Figura 10.9.27.</b> Intervalos LSD para $W = 0.226$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	294
<b>Figura 10.9.28.</b> Intervalos LSD para $W = 0.230$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	294
<b>Figura 10.9.29.</b> Intervalos LSD para $W = 0.237$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	294
<b>Figura 10.9.30.</b> Intervalos LSD para $W = 0.245$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus.</i>	295

	<b>Página</b>
<b>Figura 10.9.31.</b> Intervalos LSD para $W = 0.374$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus</i> .	295
<b>Figura 10.9.32.</b> Intervalos LSD para $W = 0.479$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus</i> .	295
<b>Figura 10.9.33.</b> Intervalos LSD para $W = 0.627$ kg agua/kg ss. <i>Semimembranosus</i> .	296
<b>Figura 10.10.1.</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin sin efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	297
<b>Figura 10.10.2</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin con efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	297
<b>Figura 10.10.3</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin sin efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	298
<b>Figura 10.10.4</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin con efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	298
<b>Figura 10.11.1.</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson sin efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	299
<b>Figura 10.11.2</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson con efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	299
<b>Figura 10.11.3</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson sin efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	300
<b>Figura 10.11.4</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson con efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	300
<b>Figura 10.12.1.</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado sin efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	301
<b>Figura 10.12.2</b> Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado con efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	301

		<b>Página</b>
<b>Figura 10.12.3</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado sin efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	302
<b>Figura 10.12.4</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado con efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	302
<b>Figura 10.13.1.</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB sin efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	303
<b>Figura 10.13.2</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB con efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	303
<b>Figura 10.13.3</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB sin efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	304
<b>Figura 10.13.4</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB con efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	304
<b>Figura 10.14.1.</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET sin efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	305
<b>Figura 10.14.2</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET con efecto de la temperatura. <i>Bíceps femoris</i> .	305
<b>Figura 10.14.3</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET sin efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	306
<b>Figura 10.14.4</b>	Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET con efecto de la temperatura. <i>Semimembranosus</i> .	306



## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>Página</b>
<b>Tabla 2.1.1.</b>	Valores de difusividad efectiva obtenidos por diversos autores para algunos productos animales.	34
<b>Tabla 2.1.2.</b>	Valores de energía de activación para distintos alimentos.	37
<b>Tabla 2.3.1.</b>	Composición de algunas piezas de cerdo (Belitz y Grosch, 1997).	67
<b>Tabla 2.3.2.</b>	Composición del músculo magro (Pearson y Young, 1989).	67
<b>Tabla 4.3.1.</b>	Características de las sales de calibración de los equipos Novasina.	84
<b>Tabla 4.3.2.</b>	Diseño de experimentos para la comprobación de las isotermas obtenidas por Comaposada et al. (2000a) para carne salada de cerdo.	88
<b>Tabla 4.4.1.</b>	Tiempo de atemperado en función del diámetro de la muestra.	95
<b>Tabla 4.4.2.</b>	Resultados de la determinación de la densidad del aceite.	98
<b>Tabla 5.1.1.</b>	Resultados de la caracterización de la materia prima.	121
<b>Tabla 5.2.1.</b>	Parámetros del modelo de Oswin. <i>Bíceps femoris</i> .	127
<b>Tabla 5.2.2.</b>	Parámetros del modelo de Oswin. <i>Semimembranosus</i> .	127
<b>Tabla 5.2.3.</b>	Parámetros del modelo de Oswin con efecto de la temperatura.	128
<b>Tabla 5.2.4.</b>	Parámetros del modelo de Oswin a las distintas temperaturas.	129
<b>Tabla 5.2.5.</b>	Parámetros del modelo de Henderson. <i>Bíceps femoris</i> .	130
<b>Tabla 5.2.6.</b>	Parámetros del modelo de Henderson. <i>Semimembranosus</i> .	130

		<b>Página</b>
<b>Tabla 5.2.7.</b>	Parámetros del modelo de Henderson con efecto de la temperatura.	131
<b>Tabla 5.2.8.</b>	Parámetros del modelo de Henderson a las distintas temperaturas.	132
<b>Tabla 5.2.9.</b>	Parámetros del modelo de Halsey modificado. <i>Bíceps femoris</i> .	132
<b>Tabla 5.2.10.</b>	Parámetros del modelo de Halsey modificado. <i>Semimembranosus</i> .	132
<b>Tabla 5.2.11.</b>	Parámetros del modelo de Halsey modificado con efecto de la temperatura.	133
<b>Tabla 5.2.12.</b>	Parámetros del modelo de Halsey modificado a las distintas temperaturas.	134
<b>Tabla 5.2.13.</b>	Parámetros del modelo de GAB. <i>Bíceps femoris</i> .	135
<b>Tabla 5.2.14.</b>	Parámetros del modelo de GAB. <i>Semimembranosus</i> .	135
<b>Tabla 5.2.15.</b>	Parámetros del modelo de GAB con efecto de la temperatura.	137
<b>Tabla 5.2.16.</b>	Parámetros del modelo de BET. <i>Bíceps femoris</i> .	138
<b>Tabla 5.2.17.</b>	Parámetros del modelo de BET. <i>Semimembranosus</i> .	139
<b>Tabla 5.2.18.</b>	Parámetros del modelo de BET con efecto de la temperatura.	140
<b>Tabla 5.2.19.</b>	Parámetros del modelo de BET a las distintas temperaturas.	140
<b>Tabla 5.2.20.</b>	Resultados obtenidos con los cinco modelos utilizados. Modelización sin considerar la influencia de la temperatura. Músculo <i>Bíceps femoris</i> .	142
<b>Tabla 5.2.21.</b>	Resultados obtenidos con los cinco modelos utilizados. Modelización sin considerar la influencia de la temperatura. Músculo <i>Semimembranosus</i> .	143
<b>Tabla 5.2.22.</b>	Porcentaje de varianza explicada obtenido con cada uno de los modelos propuestos teniendo en cuenta el efecto de la temperatura.	144

		<b>Página</b>
<b>Tabla 5.3.1.</b>	Ajuste de la función de contracción para cilindros de geometría infinita. Influencia de la velocidad de aire.	156
<b>Tabla 5.3.2.</b>	Relación entre la variación de las dimensiones y el contenido en humedad para las distintas muestras.	159
<b>Tabla 5.4.1.</b>	Valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las velocidades utilizadas. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	165
<b>Tabla 5.4.2.</b>	Valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las velocidades de secado utilizadas. Modelo con contracción y sin resistencia externa.	167
<b>Tabla 5.4.3.</b>	Valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las velocidades de secado utilizadas. Modelo sin contracción y con resistencia externa.	170
<b>Tabla 5.4.4.</b>	Difusividad efectiva para <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> con distintas velocidades de aire. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	176
<b>Tabla 5.4.5.</b>	Difusividad efectiva para el secado de los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> a distintas velocidades de aire. Modelo con contracción y sin resistencia externa.	178
<b>Tabla 5.4.6.</b>	Difusividad efectiva para el secado de los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> a distintas velocidades de aire. Modelo sin contracción y con resistencia externa.	181
<b>Tabla 5.4.7.</b>	Difusividad efectiva para el secado de los músculos <i>Bíceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> a distintas velocidades de aire. Modelo con contracción y con resistencia externa.	185
<b>Tabla 5.4.8.</b>	Resumen de los valores de difusividad efectiva identificados a partir de las cinéticas de secado determinadas en el secadero convectivo.	189
<b>Tabla 5.4.9.</b>	Difusividad efectiva de diversos productos cárnicos.	191
<b>Tabla 5.4.10.</b>	Resumen de los resultados obtenidos al ajustar $\ln(k)$ frente al $\ln(v)$ .	193
<b>Tabla 5.5.1.</b>	Ganancia de sal para los distintos tiempos de salado.	194

		<b>Página</b>
<b>Tabla 5.5.2.</b>	Tiempo de salado en función de las dimensiones de la muestra.	196
<b>Tabla 5.5.3.</b>	Difusividad efectiva para el secado de los músculos <i>Biceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> . Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	198
<b>Tabla 5.5.4.</b>	Valor de la Energía de activación (kJ/mol). Modelo sin contracción y sin resistencia externa.	203
<b>Tabla 5.5.5.</b>	Energía de activación obtenida por varios autores en diversos productos cárnicos.	204
<b>Tabla 5.5.6.</b>	Difusividad efectiva para el secado de los músculos <i>Biceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> a distintas temperaturas. Modelo con contracción y sin resistencia externa.	206
<b>Tabla 5.5.7.</b>	Valores de difusividad efectiva calculados para las experiencias determinadas en las cámaras de secado considerando resistencia externa.	214
<b>Tabla 5.5.8.</b>	Valores de difusividad efectiva a las distintas temperaturas de secado consideradas.	222
<b>Tabla 5.6.1.</b>	Valores de k calculados para un músculo entero.	224
<b>Tabla 5.6.2.</b>	Porcentaje de varianza explicada obtenido en función de la temperatura de secado y del músculo deshidratado.	225
<b>Tabla 10.1.1.</b>	Correspondencia entre los módulos adimensionales para transferencia de calor y de materia.	261
<b>Tabla 10.8.1.</b>	Isoterma experimental del músculo <i>Biceps femoris</i> a distintas temperaturas.	283
<b>Tabla 10.8.2.</b>	Isoterma experimental del músculo <i>Semimembranosus</i> a distintas temperaturas.	284
<b>Tabla 10.15.1.</b>	Calores isostéricos de desorción obtenidos a partir de la ecuación de Clausius-Clayperon. Músculo <i>Biceps femoris</i> .	307
<b>Tabla 10.15.2.</b>	Calores isostéricos de desorción obtenidos a partir de la ecuación de Clausius-Clayperon. Músculo <i>Semimembranosus</i> .	308
<b>Tabla 10.16.1.</b>	Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica infinita. <i>Biceps femoris</i> .	309

	<b>Página</b>
<b>Tabla 10.16.2.</b> Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica infinita. <i>Biceps femoris</i> .	309
<b>Tabla 10.16.3.</b> Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica infinita. <i>Biceps femoris</i> .	310
<b>Tabla 10.17.1.</b> Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	311
<b>Tabla 10.17.2.</b> Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	311
<b>Tabla 10.17.3.</b> Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	312
<b>Tabla 10.17.4.</b> Modelo con contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> y <i>Semimembranosus</i> .	312
<b>Tabla 10.18.1.</b> Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> . Cámara de secado. Solución analítica.	313
<b>Tabla 10.18.2.</b> Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> . Cámara de secado. Solución numérica.	314
<b>Tabla 10.18.3.</b> Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Semimembranosus</i> . Cámara de secado. Solución analítica.	315
<b>Tabla 10.18.4.</b> Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Semimembranosus</i> . Cámara de secado. Solución numérica.	316
<b>Tabla 10.18.5.</b> Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> . Cámara de secado.	317
<b>Tabla 10.18.6.</b> Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Semimembranosus</i> . Cámara de secado.	318
<b>Tabla 10.18.7.</b> Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> . Cámara de secado.	319

		<b>Página</b>
<b>Tabla 10.18.8.</b>	Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Semimembranosus</i> . Cámara de secado.	320
<b>Tabla 10.18.9.</b>	Modelo con contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Biceps femoris</i> . Cámara de secado.	321
<b>Tabla 10.18.10.</b>	Modelo con contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. <i>Semimembranosus</i> . Cámara de secado.	322

## **1. RESUMEN**



## **1. RESUMEN**

Dentro del sector agroalimentario, la industria cárnica es una de las más importantes en España, siendo el jamón curado uno de los productos más destacados dentro de ella. Durante su elaboración es la etapa de secado la parte más costosa. Por ello es muy interesante profundizar en el conocimiento de la transferencia de agua durante esta etapa con el fin de optimizar la tecnología de secado utilizada.

Los alimentos en general y los productos cárnicos en particular presentan un elevado contenido en agua. Durante su deshidratación el agua se va eliminando, lo que origina una pérdida de volumen. La modelización de las cinéticas de deshidratación de alimentos presenta una gran dificultad. Esta dificultad se incrementa al incluir en los modelos aspectos tales como la contracción o la resistencia externa a la transferencia de materia. Por ello la inclusión de dichos aspectos debe realizarse siempre y cuando se obtenga una mejora sustancial de los resultados obtenidos.

El objetivo del presente trabajo es determinar la influencia de la contracción y de la resistencia externa a la transferencia de materia en las cinéticas de deshidratación de músculos del jamón.

Para realizar el estudio se eligieron dos músculos representativos de la pierna del cerdo: el *Bíceps femoris* y el *Semimembranosus*. En primer lugar se procedió al estudio del equilibrio aire – agua – alimento. Para ello se determinaron experimentalmente las isotermas de sorción de la carne fresca a cuatro temperaturas: 25, 30, 35 y 40°C. Los resultados experimentales se modelizaron utilizando dos modelos empíricos (Oswin y Henderson), uno semiempírico (Halsey modificado) y dos teóricos (GAB y BET). La modelización se realizó analizando la influencia de la temperatura en los parámetros de los modelos. Aunque los ajustes obtenidos con todos los modelos fueron satisfactorios, el único que se ajustó en todo el rango de actividades de agua estudiado fue el modelo de GAB. Además, también se obtuvieron los mejores resultados en el ajuste. El error medio relativo fue menor al 6% a todas las temperaturas, excepto para 30°C que obtuvo un valor

## RESUMEN

---

de 8.42%, y una varianza explicada superior al 99%. Los resultados obtenidos para ambos músculos fueron muy similares. Además, se encontró concordancia entre éstos y los obtenidos por Comaposada (1999). Por ello no se determinaron las isotermas de carne salada sino que se utilizaron las obtenidas por este autor (Comaposada et al., 2000), aunque previamente se comprobó la validez de dichas isotermas para la carne salada empleada.

A partir de los valores experimentales de las isotermas de sorción a las cuatro temperaturas estudiadas se determinaron los calores isostéricos de sorción. Para valores de humedad superiores a 0.11 kg agua/kg ss, el calor isostérico de la carne se acercó al valor del calor latente de vaporización del agua pura (2259.29 kJ/kg). Para humedades inferiores a la señalada, se observó un aumento del calor isostérico al disminuir la humedad. Los resultados obtenidos para ambos músculos fueron similares.

Una vez estudiado el equilibrio aire – agua – alimento, se procedió a determinar las cinéticas de deshidratación de los músculos estudiados para distintas geometrías y condiciones de secado.

En primer lugar se determinaron cinéticas de carne fresca en un secadero convectivo, eligiendo un sistema con geometría cilíndrica. Los cilindros se obtuvieron de tres diámetros diferentes: 2, 3 y 4 cm. Para garantizar que el sistema se comportaba como un cilindro de longitud infinita, es decir que la transferencia de materia únicamente tenía lugar en sentido radial, se aislaron las bases durante el proceso de secado. Con el fin de considerar cilindros finitos no se aislaron las bases. En ese caso, los cilindros que se secaron tenían las mismas dimensiones: 2 cm de diámetro y 3 cm de altura. La experiencias de secado se realizaron en un secadero convectivo a escala de laboratorio. Se eligieron condiciones suaves de secado para evitar el encostramiento de la carne: temperatura de 25°C y velocidades de aire 0.6, 2 y 2.8 m/s

Dado que el secado de jamones se lleva a cabo en cámaras de secado con aire prácticamente estacionario, a humedad y temperatura controlada, se secaron cilindros salados (diámetro 2, 3 y 4 cm y altura 2 y 3 cm) de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembransous* en cámaras a cuatro temperaturas: 5, 10, 15 y 20°C. La humedad relativa de cada cámara se mantuvo en torno al 85%. La

velocidad máxima del aire fue siempre inferior a  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s. El máximo se obtenía al renovar el aire de la cámara para controlar la humedad relativa. En otro caso existía convección natural.

Se modelizó matemáticamente la influencia de la variación de humedad del producto en la contracción del mismo. En todos los casos se determinó la función de contracción a partir de medidas de radio, altura y volumen de las distintas muestras estudiadas. Se ajustaron los cocientes  $R/R_0$  y  $V/V_0$  con el contenido en humedad (kg agua/kg ss) a una recta. En todos los casos, independientemente de las condiciones de secado utilizadas, se obtuvieron valores muy similares para la pendiente y la ordenada en el origen, lo que lleva a pensar que la contracción es independiente de las condiciones de secado utilizadas, en las condiciones ensayadas. Además, al representar el volumen de agua perdida frente a la pérdida de volumen para todas las experiencias, independientemente de las condiciones de secado utilizadas, se obtuvo que los valores se distribuían alrededor de una recta de pendiente igual a la unidad. Ambos hechos indicarían que es la pérdida de agua la responsable de la contracción y no las condiciones de secado.

Las cinéticas obtenidas en el secadero convectivo se modelizaron con tres modelos en el caso de geometría cilíndrica infinita (sin contracción y sin resistencia externa, con contracción y sin resistencia externa, sin contracción y con resistencia externa) y con cuatro en el caso de geometría cilíndrica finita (sin contracción y sin resistencia externa, con contracción y sin resistencia externa, sin contracción y con resistencia externa, con contracción y con resistencia externa). Los valores de difusividad efectiva obtenidos para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* secados en secadero convectivo fueron similares tanto para geometría cilíndrica infinita como finita. Además, no se observaron diferencias significativas entre los valores identificados para los dos músculos estudiados. Se observó un aumento de la difusividad efectiva al aumentar la velocidad del aire de secado al modelizar sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia. Para velocidades superiores este aumento fue menor. Esto indicaría que para estas velocidades de aire (2 y 2.8 m/s) la resistencia externa a la transferencia de materia dejaría de predominar sobre la interna. La consideración

## RESUMEN

---

de la contracción no supuso una variación estadísticamente significativa de la difusividad efectiva identificada. Al modelizar considerando la resistencia externa a la transferencia de materia, se obtuvieron valores de difusividad efectiva parecidos para las tres velocidades del aire de secado. Estos valores además fueron estadísticamente similares a los identificados al no considerar la resistencia externa a partir de las cinéticas determinadas a 2 y 2.8 m/s. Este hecho, unido a que la difusividad efectiva es una propiedad de transporte y por lo tanto, independiente de la velocidad del aire de secado, indicaría que al no considerar la resistencia externa a la transferencia de materia en aquellas condiciones en que sí es importante respecto a la interna ( $v = 0.6$  m/s), el valor identificado de difusividad efectiva quedaría infraestimado. Los valores del coeficiente de transferencia de materia obtenidos concordaron con los calculados a partir de ecuaciones semiempíricas de la bibliografía.

La modelización de las cinéticas de deshidratación obtenidas en cámaras de secado se realizó utilizando cuatro modelos, según se incluyera o no tanto el efecto de la contracción como el de la resistencia externa. Al modelizar las cinéticas de deshidratación sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia se obtuvieron valores de difusividad efectiva menores (2 órdenes de magnitud inferiores) que en el caso de las cinéticas obtenidas en secadero convectivo. El efecto de la temperatura en el valor de difusividad efectiva se describió mediante la ecuación de Arrhenius, obteniéndose energías de activación comprendidas entre 31.48 y 26.37 kJ/mol, concordantes con otros obtenidos en la bibliografía. El hecho de obtener difusividades inferiores a las obtenidas a partir de las cinéticas determinadas en el secadero convectivo, que además no eran concordantes con los valores obtenidos por otros autores y dado que la deshidratación se llevó a cabo bajo condiciones en las que presumiblemente la resistencia externa era predominante sobre la interna, llevó a pensar que debido a un artificio matemático, los valores habían sido infraestimados por el modelo. Por ello, con los valores de difusividad efectiva obtenidos a partir de las experiencias realizadas en el secadero convectivo y de la energía de activación, fueron calculados mediante la ecuación de Arrhenius los valores de difusividad para cada una de las temperaturas de secado (5, 10, 15 y 20°C). Con estos valores de

difusividad se modelizaron las cinéticas de deshidratación considerando la resistencia externa a la transferencia de materia (considerando y no considerando la contracción). A partir de la modelización se identificaron los valores del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ). Al realizar los ajustes se observó que aunque al incluir la contracción en los modelos se produjo una mejora en los porcentajes de varianza explicada, fue la inclusión de la resistencia externa a la transferencia de materia la que supuso una mejora importante de los mismos. Los valores del coeficiente de transferencia de materia obtenidos tras la modelización concordaron con los calculados a partir de las propiedades físicas del aire de secado mediante ecuaciones para convección natural encontradas en la bibliografía. En todos los casos no se observaron diferencias significativas entre los valores obtenidos para ambos músculos estudiados. La consideración de la contracción, tampoco representó una mejora significativa en los resultados.

Por último, y con el fin de determinar que los valores de la difusividad efectiva eran extrapolables a geometrías más complejas, se determinó la cinética de deshidratación de músculos enteros. Para ello se secaron en cámara de secado músculos salados de *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* a dos temperaturas, 5 y 15°C, con lo que se obtuvieron cuatro cinéticas de comprobación. El coeficiente de transferencia de materia se estimó teniendo en cuenta que los músculos se comportaban como una superficie plana vertical. Como los músculos son relativamente planos, la modelización se realizó considerando una geometría de lámina infinita. Dado que se había observado que para estas condiciones de secado el efecto de la contracción no era importante pero sí lo era el de la resistencia externa, se utilizó un modelo para calcular la humedad media que no incluía la contracción, pero sí la resistencia externa. Los porcentajes de varianza explicada calculados para las cinéticas de comprobación fueron superiores al 99%, lo que indicaría que los valores de la difusividad efectiva obtenidos a partir de los modelos así como los coeficientes de transferencia de materia calculados mediante la ecuación de convección natural, serían adecuados para las distintas condiciones de secado estudiadas.



## **1. RESUM**

Dins del sector agroalimentari, la indústria càrnia és una de les més importants a Espanya, on el pernil curat és un dels productes més destacats dins d'ella. Durant la seua elaboració és l'etapa d'assecatge la part més costosa. Per això, és molt interessant aprofundir en el coneixement de la transferència d'aigua durant aquesta etapa a fi d'optimitzar la tecnologia d'assecatge utilitzada.

Els aliments en general i els productes carnis en particular presenten un elevat contingut en aigua. Durant la seua deshidratació l'aigua es va eliminant, la qual cosa origina una pèrdua de volum. La modelització de les cinètiques de deshidratació d'aliments presenta una gran dificultat. Aquesta dificultat s'incrementa en l'incloure en els models aspectes, com ara la contracció o la resistència externa a la transferència de matèria. Per això, la inclusió d'aquests aspectes ha de realitzar-se sempre que comporten una millora substancial dels resultats obtinguts.

L'objectiu del present treball és determinar la influència de la contracció i de la resistència a la transferència de matèria en les cinètiques de deshidratació de músculs del pernil.

Per a realitzar l'estudi es van elegir dos músculs representatius de la cama del porc: el *Bíceps femoris* i el *Semimembranosus*. En primer lloc es va procedir a l'estudi de l'equilibri aire – aigua – aliment. Per això, es van determinar experimentalment les isoterms de sorció de la carn fresca a quatre temperatures: 25, 30, 35 i 40°C. Els resultats experimentals es modelitzaren utilitzant dos models empírics (Oswin i Henderson), un de semiempíric (Halsey modificat) i dos de teòrics (GAB i BET). La modelització es va realitzar analitzant la influència de la temperatura en els paràmetres dels models. Encara que els ajustos obtinguts amb tots els models van ser satisfactoris, l'únic que es va ajustar en tot el rang d'activitats d'aigua estudiat va ser el model de GAB. A més, també es van obtenir els millors resultats en l'ajust. L'error mitjà relatiu va ser menor al 6% a totes les temperatures, excepte a 30°C que va obtenir un valor de 8.42%, i una varianza explicada superior al 99%. Els resultats obtinguts per a aquests dos músculs van

## RESUM

---

ser molt semblants. A més, es va trobar concordança entre aquests i els obtinguts per Comaposada (1999). Per això no es van determinar les isoterms de carn salada sinó que es van utilitzar les obtingudes per aquest autor (Comaposada et al., 2000), encara que es va comprovar prèviament la seua validesa per a la carn emprada.

A partir dels valors experimentals de les isoterms de sorció a les quatre temperatures estudiades es van determinar les calors isostèriques de sorció. Per a valors d'humitat superiors a 0.11 kg aigua/kg ss, la calor isostèrica de la carn es va acostar al valor de la calor latent de vaporització de l'aigua pura (2259.29 kJ/kg). Per a humitats inferiors a l'assenyalada, es va observar un augment de la calor isostèrica en disminuir la humitat. Els resultats obtinguts per als dos músculs van ser semblants.

Una vegada estudiat l'equilibri aïre – aigua – aliment, es va procedir a determinar les cinètiques de deshidratació dels músculs estudiats per a distintes geometries i condicions d'assecatge.

En primer lloc, es van determinar cinètiques de carn fresca en un assecador convectiu, elegint un sistema amb geometria cilíndrica. Els cilindres es van obtenir de tres diàmetres diferents: 2, 3 i 4 cm. Per a garantir que el sistema es comportava com un cilindre de longitud infinita, és a dir, que la transferència de matèria únicament tenia lloc en sentit radial, es van aïllar les bases abans del procés d'assecatge. A fi de considerar cilindres finits no es van aïllar les bases. En aquest cas, els cilindres que es van assecar tenien les mateixes dimensions: 2 cm de diàmetre i 3 cm d'alçària. Les experiències d'assecatge es van realitzar en un assecador convectiu a escala de laboratori. Es van elegir condicions suaus d'assecatge per a evitar l'encostrament de la carn: temperatura de 25°C i velocitats d'aire 0.6, 2 i 2.8 m/s.

Atés que l'assecatge de pernils es porta a terme en cambres d'assecatge d'humitat i temperatura controlada, es van assecar cilindres salats (diàmetre 2, 3 i 4 cm i alçària 2 i 3 cm) dels músculs *Biceps femoris* i *Semimembransous* en cambres a quatre temperatures: 5, 10, 15 i 20°C. La humitat relativa de cada cambra es va mantenir entorn del 85%. La velocitat de l'aire va ser sempre inferior a  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s. El màxim s'obtenia en renovar l'aire de la cambra per al control de la

humitat relativa. En un altre cas existia convecció natural.

Es modelitzà matemàticament la influència de la variació d'humitat del sistema en la seua contracció. En tots els casos es va determinar la funció de contracció a partir de mesures de radi, alçària i volum de les distintes mostres estudiades. Es van ajustar les relacions  $R/R_0$  i  $V/V_0$  amb el contingut en humitat (kg aigua/kg ss) a una recta. En tots els casos, independentment de les condicions d'assecatge utilitzades, es van obtenir valors molt semblants per al pendent i l'ordenada en l'origen, la qual cosa portà a pensar que la contracció és independent de les condicions d'assecatge utilitzades, en les condicions assajades. A més, en representar el volum d'aigua perduda enfront de la pèrdua de volum per a totes les experiències, independentment de les condicions d'assecatge utilitzades, es va obtenir que els valors es distribuïen al voltant d'una recta de pendent igual a la unitat. Aquests dos fets indicarien que és la pèrdua d'aigua la responsable de la contracció i no les condicions d'assecatge.

Les cinètiques obtingudes en l'asecador convectiu es modelitzaren amb tres models en el cas de geometria cilíndrica infinita (sense contracció i sense resistència externa, amb contracció i sense resistència externa, sense contracció i amb resistència externa) i amb quatre en el cas de geometria cilíndrica finita (sense contracció i sense resistència externa, amb contracció i sense resistència externa, sense contracció i amb resistència externa, amb contracció i amb resistència externa). Els valors de difusivitat efectiva obtinguts per als músculs *Bíceps femoris* i *Semimembranosus* assecats en aseccador convectiu van ser semblants, tant per a geometria cilíndrica infinita com finita. A més, no es van observar diferències significatives entre els valors identificats per als dos músculs estudiats. Es va observar un augment de la difusivitat efectiva en augmentar la velocitat de l'aire d'assecatge en modelitzar sense considerar la resistència externa a la transferència de matèria. Per a velocitats superiors, aquest augment va ser menor. Això indicaria que per a aquestes velocitats d'aire (2 i 2.8 m/s) la resistència externa a la transferència de matèria deixaria de predominar sobre la interna. La consideració de la contracció no va suposar una variació estadísticament significativa de la difusivitat efectiva identificada. En modelitzar considerant la resistència externa a la transferència de matèria, es van obtenir

## RESUM

---

valors de difusivitat efectiva semblants per a les tres velocitats de l'aire d'assecatge. Aquests valors a més van ser semblants als identificats al no considerar la resistència externa a partir de les cinètiques determinades a 2 i 2.8 m/s. Aquest fet, unit que la difusivitat efectiva és una propietat de transport i, per tant, independent de la velocitat de l'aire d'assecatge, indicaria que en no considerar la resistència externa a la transferència de matèria en aquelles condicions en què sí que és important respecte a la interna ( $v = 0.6$  m/s), el valor identificat de difusivitat efectiva quedaria infraestimat. Els valors del coeficient de transferència de matèria obtinguts van concordar amb els calculats a partir d'equacions semiempíriques de la bibliografia.

La modelització de les cinètiques de deshidratació obtingudes en cambres d'assecatge es va realitzar utilitzant quatre models, segons s'incloguera o no tant l'efecte de la contracció com el de la resistència externa. En modelitzar les cinètiques de deshidratació sense considerar la resistència externa a la transferència de matèria es van obtenir valors de difusivitat efectiva menors (2 ordres de magnitud inferiors) que en el cas de les cinètiques obtingudes en assecador convectiu. L'efecte de la temperatura en el valor de difusivitat efectiva es va descriure per mitjà de l'equació d'Arrhenius, obtenint-se energies d'activació compreses entre 31.48 i 26.37 kJ/mol, concordants amb altres obtinguts en la bibliografia. El fet d'obtenir difusivitats inferiors a les obtingudes a partir de les cinètiques determinades en l'assecador convectiu, que a més no eren concordants amb els valors obtinguts per altres autors i atés que la deshidratació es va portar a terme davall condicions en què presumiblement la resistència externa era predominant sobre la interna, va portar a pensar que a causa d'un artifici matemàtic, els valors havien sigut infraestimats pel model. Per això, amb els valors de difusivitat efectiva obtinguts a partir de les experiències realitzades en l'assecador convectiu i de l'energia d'activació, van ser calculats per mitjà de l'equació d'Arrhenius els valors de difusivitat per a cada una de les temperatures d'assecatge (5, 10, 15 i 20°C). Amb aquests valors de difusivitat es modelitzaren les cinètiques de deshidratació considerant la resistència externa a la transferència de matèria (considerant i no considerant la contracció). A partir de la modelització es van identificar els valors del coeficient de transferència de matèria ( $k$ ). En

realitzar els ajustos es va observar que encara que en incloure la contracció en els models es va produir una millora en els percentatges de variances explicada, va ser la inclusió de la resistència externa a la transferència de matèria la que va suposar una millora important d'aquests. Els valors del coeficient de transferència de matèria obtinguts després de la modelització van concordar amb els calculats a partir de les propietats físiques de l'aire d'assecatge per mitjà d'equacions per a convecció natural trobades en la bibliografia. En tots els casos no es van observar diferències significatives entre els valors obtinguts per a aquests dos músculs estudiats. La consideració de la contracció, tampoc no va representar una millora significativa en els resultats.

Finalment, i a fi de determinar que els valors de la difusivitat efectiva obtinguts eren extrapolables a geometries més complexes, es va determinar la cinètica de deshidratació de músculs sencers. Per això es van assecar en cambra d'assecatge músculs salats de *Bíceps femoris* i *Semimembranosus* a dos temperatures, 5 i 15°C, amb la qual cosa es van obtenir quatre cinètiques de comprovació. El coeficient de transferència de matèria es va estimar tenint en compte que els músculs es comportaven com una superfície plana vertical. Com els músculs són relativament plans, la modelització es va realitzar considerant una geometria de làmina infinita. Atés que s'havia observat que per a aquestes condicions d'assecatge l'efecte de la contracció no era important però sí ho era el de la resistència externa, es va utilitzar un model per a calcular la humitat mitjana que no incloïa la contracció, però sí la resistència externa. Els percentatges de variances explicada calculats per a les cinètiques de comprovació van ser superiors al 99%, la qual cosa indicaria que els valors de la difusivitat efectiva obtinguts a partir dels models, així com els coeficients de transferència de matèria calculats per mitjà de l'equació de convecció natural per a transferència de matèria, serien adequats per a les distintes condicions d'assecatge estudiades.



## **1. ABSTRACT**

The meat industry is one of the most important industries in the Spanish agro-food sector. Cured ham is one of the most distinguished products of this industry. During its manufacturing process drying is the most time and energy consuming stage. Thus, it is of great interest to continue to improve our knowledge of water transport during the drying stage in order to optimize the drying technology involved.

Foods in general, and particularly meat products, have a high water content. During dehydration, water is removed and consequently a volume loss is originated. Modelling of food drying is very difficult, especially if shrinkage or external resistance to mass transfer are considered. Thus the inclusion of these aspects in modelling is justified only when improvements are guaranteed.

The aim of this study is to determine the influence of shrinkage and external resistance in drying kinetics during the dehydration of cured ham muscles.

To this end, two characteristic muscles of the pig leg were chosen: *Biceps femoris* and *Semimembranosus*. First, the equilibrium air – water – food was determined. For that purpose sorption isotherms of raw meat were determined at four temperatures: 25, 30, 35 and 40°C. The experimental results were modelled using two empirical models (Oswin and Henderson), one semiempirical model (Halsey modified) and two theoretical models (GAB and BET). The influence of temperature on the parameters of the models was also studied. Although all the models were fitted satisfactory, only the GAB model adapted well for all the water activity range. This particular model provided the best results as well. The mean relative error was lower than 6% for all the temperatures except for 30°C (EMR = 8.42%), and the percentage of explained variance was higher than 99%. The results for both muscles were very similar, and they agreed with Comaposada's (1999) results. For this reason, the isotherm of Comaposada et al. (2000) was used although it was checked for the raw material employed in the present study.

From the experimental sorption isotherm values at the four considered temperatures, isosteric heat of sorption was determined. For moisture content

## ABSTRACT

---

higher than 0.11 kg water/kg dm, isosteric heat of meat is similar to latent heat of vaporization for pure water (2259.29 kJ/kg). For lower moisture content, an increase of the isosteric heat was observed when moisture content decreases. Similar results were obtained for the two muscles.

Once the equilibrium air – water – food was studied, drying kinetics of the two muscles for different geometries and drying conditions were analyzed.

First, drying experiments of raw meat in a convective dryer were carried out. A cylindrical geometry system was chosen. The cylinders were cut at three different diameters: 2, 3 and 4 cm. In order to assure a behaviour of a infinite height cylinder, that is, mass transfer taking place only in the radial direction, the bases of the cylinders were isolated. To consider finite cylinders, the bases were not isolated. For that case, the cylinders considered had the same dimensions: 2 cm in diameter and 3 cm in height. Drying experiments were performed in a laboratory convective dryer. Drying conditions were mild in order to avoid case hardening: temperature of 25°C and air velocity of 0.6, 2 and 2.8 m/s

Since drying of cured hams is done in drying chambers with controlled temperature and air relative humidity, salted cylinders (2, 3 and 4 cm in diameter and 2 and 3 cm in height) of muscles *Biceps femoris* and *Semimembransous* were dried in chambers at four temperatures: 5, 10, 15 and 20°C. The air relative humidity was maintained around 85%. Drying air velocity was always lower than  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s. The maximum value was obtained when air was renewed for humidity control. Otherwise natural convection took place.

The influence of moisture content in the shrinkage was modelled. For all the experiments, a shrinkage equation was determined from radius, height and volume measurements. The ratios  $R/R_0$  and  $V/V_0$  were fitted to water content (kg water/kg dm) to a straight line. For all the cases, regardless of drying conditions, very similar values for slope and ordinate at the origin were found. Thus, it could be assumed that shrinkage is independent of drying conditions under the experimental conditions. Volume of water losses was plotted against volume loss during drying, and it was observed that the values were distributed around a straight line of slope equal to one. These two facts indicate that water loss rather than drying conditions is responsible for the shrinkage rather than the drying conditions.

Drying kinetic data from a convective dryer were modelled considering three different models in the case of infinite cylindrical geometry (without shrinkage and without external resistance, with shrinkage and without external resistance, without shrinkage and with external resistance) and considering four models in the case of finite cylindrical geometry (without shrinkage and without external resistance, with shrinkage and without external resistance, without shrinkage and with external resistance, with shrinkage and with external resistance). The identified values of effective diffusivity for *Biceps femoris* and *Semimembranosus* were similar for both geometries; no significant differences were found between them. An increase of effective diffusivity was observed when air velocity increased. The increase was low for high velocities, indicating that for these velocities (2 and 2.8 m/s) external resistance does not predominate over internal. Considering shrinkage did not mean a significant difference in the identified values for effective diffusivity. When considering external resistance, the values for effective diffusivities were similar for the three air velocities studied. Additionally, the values were similar to the ones identified for 2 and 2.8 m/s when internal resistance was not considered. This, together with the fact that the effective diffusivity is a transport property (independent of air velocity), indicates that when external resistance is not considered under conditions which it is important ( $v = 0.6$  m/s), the identified value is underestimated. Mass transfer coefficient values were in agreement with the values calculated from semiempirical equations provided in the literature.

Modelling of drying kinetics from drying chambers was addressed considering four models: without shrinkage and without external resistance to mass transfer, with shrinkage and without external resistance, without shrinkage and with external resistance and with shrinkage and with external resistance to mass transfer. For all the models, the values of effective diffusivity were lower (100 times) than the ones obtained for the kinetics from the convective dryer. The effect of temperature on effective diffusivity was described by means of Arrhenius's equation. The activation energy values obtained were between 31.48 and 26.37 kJ/mol, in agreement with those cited in the literature. Considering the low effective diffusivity estimated (which do not agree with values in literature) and taking into

## ABSTRACT

---

account that dehydration was developed under conditions in which external resistance is probably significant, it can seem that the value obtained is the result of a mathematical artefact that caused the model to underestimate diffusivity. For that reason, with the effective diffusivity values identified from kinetics in the convective dryer, from the activation energy values and by means of Arrhenius equation, diffusivities for each drying temperature (5, 10, 15 and 20°C) were calculated. With these values, modelling was done considering external resistance to mass transfer (considering and not considering shrinkage). The external mass transfer coefficient ( $k$ ) was identified. When fitting experimental results with the models, it was observed that when including shrinkage, an increase of explained variance was observed, although the inclusion of the external resistance to mass transfer brings a much greater improvement in the explained variance. The mass transfer coefficient identified with the models agreed with the values obtained from the natural convection correlations cited in the literature. Considering shrinkage did not imply a significant improvement of the results.

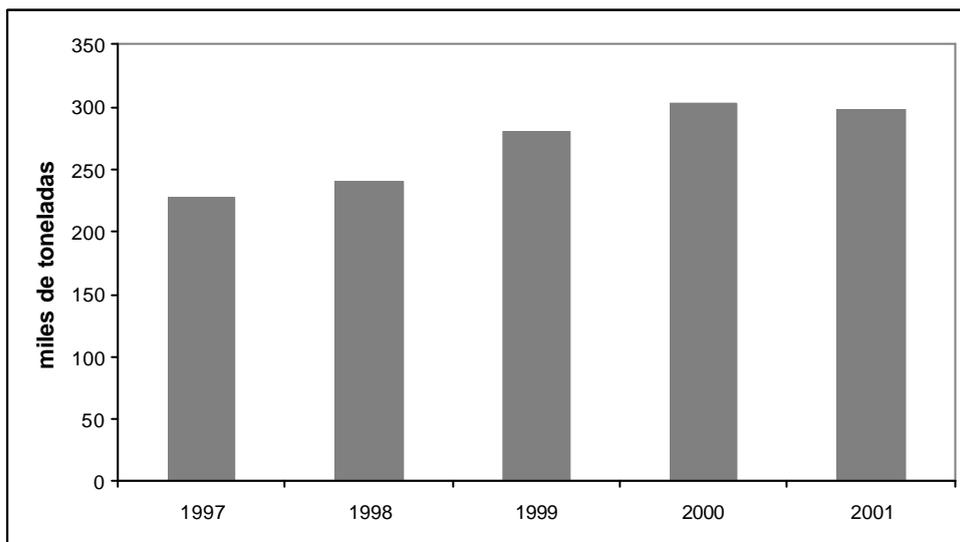
Finally, with the purpose of determining if effective diffusivity values were extrapolable to larger and more complex geometries, drying kinetics for the whole salted muscle was determined. To this end, salted muscles of *Biceps femoris* and *Semimembranosus* were dried in a drying chamber at two temperatures: 5 and 15°C. Thus, four kinetics were obtained for study. The mass transfer coefficient was obtained from the equation for natural convection, considering that the muscles behaved like a vertical flat surface. Because these muscles are relatively flat, modelling was done considering an infinite slab geometry. Due to the fact that it has been observed for these drying conditions, that shrinkage was not very relevant but external resistance to mass transfer was significant, the modelling of the whole muscle was done considering external resistance to mass transfer and not shrinkage. The percentages of explained variance obtained for the check kinetics were higher than 99%. Thus experimental evidence was obtained that the values identified for effective diffusivity and the mass transfer coefficients calculated for natural convection were adequate for the drying conditions considered.

## **2. INTRODUCCIÓN**



## 2. INTRODUCCIÓN

Dentro del sector agroalimentario la industria cárnica es una de las más importantes en España. La carne puede ser comercializada como producto fresco, como producto cocido o como producto crudo – curado. El INE (Instituto Nacional de Estadística) selecciona los jamones curados como uno de los productos más importantes dentro de la Encuesta Industrial de Productos que realiza anualmente. En el año 2001 se produjeron un total de 184 993 toneladas de jamones y paletas sin deshuesar en salazón o ahumados y 111.699 toneladas de jamones y paletas deshuesados (cocidos o curados). La producción de jamones (con y sin hueso, cocidos y curados) ha ido incrementándose en los últimos años, tal y como se muestra en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Evolución de la producción de jamones (INE, 2003).

Los jamones curados tienen un contenido en humedad entre el 28 y el 60% y un contenido en sal entre el 3 y el 9% (Arnau et al., 1995). El elevado contenido en sal permite la conservación del producto sin necesidad de refrigeración. El proceso de elaboración a nivel industrial está basado en el

## INTRODUCCIÓN

---

proceso artesanal cuyas condiciones de elaboración dependen de las condiciones climáticas del momento. Con el proceso industrial de elaboración del jamón curado se pretende imitar el proceso artesanal, con el fin de conseguir un producto con una estabilidad adecuada y con las características organolépticas demandadas por el consumidor.

El proceso de elaboración del jamón curado consta de varias etapas, siendo la etapa de secado la más importante, ya que no sólo es la de mayor duración y por lo tanto la que va a presentar un mayor consumo energético, sino también de ella depende la homogeneidad de la pieza. Por lo tanto, de ella va a depender en gran medida el que pueda ser ofrecido al consumidor un producto con las características organolépticas adecuadas y que además sea competitivo frente a otros productos.

Durante el secado de productos agroalimentarios en general y de carne en particular, el agua difunde desde el interior del producto hasta su superficie, pasando después al aire que lo rodea. Por lo tanto, el agua debe vencer dos resistencias: la resistencia del producto a que difunda en su interior hasta alcanzar su superficie y la resistencia del aire que rodea al producto a que el agua abandone la superficie del mismo. Es decir, el proceso de transferencia de materia que tiene lugar durante el secado de carne está controlado por dos resistencias: la resistencia interna y externa a la transferencia de materia. La resistencia global es la suma de ambas (Mulet et al., 1987). Entre las propiedades de la carne que determinan su resistencia interna a la transferencia de materia, la difusividad efectiva es la que generalmente suele ser considerada. Esta propiedad es inversamente proporcional a la resistencia interna a la transferencia de materia, de manera que valores elevados de difusividad efectiva se corresponden con resistencias internas pequeñas y viceversa. La actividad de agua del alimento también es muy importante ya que representa la humedad relativa del aire en equilibrio con el mismo. Su variación con la humedad se representa en las isothermas de sorción.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la variación de volumen que experimentan los productos agroalimentarios durante su deshidratación. Esta variación de volumen se debe a cambios en la estructura de la matriz sólida

debidos a la pérdida de agua que tiene lugar durante el proceso de secado. Todos estos procesos necesitan un análisis en profundidad, para lo cual resulta conveniente su modelización.

Los modelos matemáticos se utilizan en el diseño y optimización de los procesos industriales, permitiendo una mejor comprensión de los mismos y por lo tanto una mayor eficacia de los procesos productivos. Para la modelización de la operación de secado generalmente se utilizan modelos difusivos. Los modelos difusivos se formulan fácilmente y proporcionan resultados razonablemente buenos. Su principal desventaja es que al formularlos es necesario realizar una serie de simplificaciones. Por ello en el modelo aparece la difusividad efectiva, que incluye el efecto de hipótesis conocidas así como de fenómenos desconocidos que no son considerados (Mulet, 1994).

Al modelizar la operación de secado, aspectos como la resistencia externa a la transferencia de materia o la contracción, pueden o no ser considerados. Cuanto más compleja sea la formulación de un modelo mayor dificultad presentará su resolución. Por ello no siempre es justificable el uso de modelos complicados, ya que a veces modelos sencillos explican razonablemente bien la realidad. En cambio, en otras ocasiones es necesario utilizar modelos con pocas simplificaciones con el fin de poder explicar los fenómenos que están teniendo lugar durante el proceso de secado. Generalmente, las condiciones a las cuales se lleve a cabo la deshidratación, principalmente temperatura y velocidad del aire de secado, van a determinar la necesidad o no de admitir determinadas hipótesis en los modelos para que éstos sean capaces de explicar los fenómenos físicos que se estén produciendo. Estas condiciones van a influir en la resistencia a la transferencia de materia (tanto interna como externa) así como en las características finales del producto deshidratado.

### **2.1. La operación de secado**

El término de secado generalmente hace referencia a la eliminación de agua de una sustancia. Aunque algunos autores establecen diferencias entre deshidratación y secado, generalmente ambos términos se usan indistintamente. El proceso de secado es el más común de los procesos de conservación de alimentos y también el que más energía consume. El secado por aire es un proceso muy antiguo de conservación de alimentos durante el cual, los sólidos que se deben secar se ponen en contacto con una corriente continua de aire caliente que evapora el agua. Es un proceso muy complejo donde se dan simultáneamente transferencia de materia y energía en un medio higroscópico y que además se contrae (Ratti, 2001).

#### **2.1.1. Descripción de la operación de secado**

Como secado de alimentos se entiende la operación de separación del agua de la matriz sólida, mediante su evaporación en el caso de aire caliente. Los dos principales objetivos de la deshidratación de alimentos son por un lado aumentar la vida útil y por otro disminuir la masa de los productos con el fin de reducir los costes de transporte, almacenamiento y embalaje.

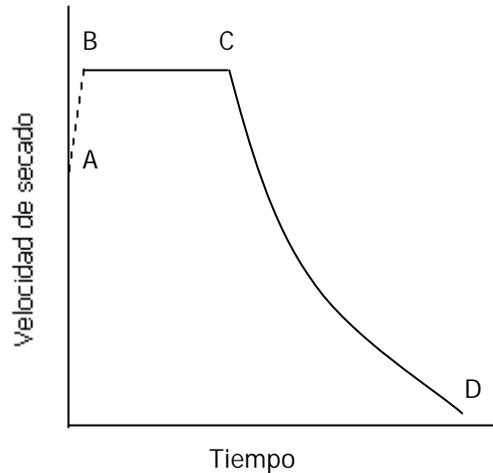
La presencia de agua en los alimentos es condición indispensable para la existencia y reproducción de microorganismos. Algunos de ellos son beneficiosos, pero en cambio otros son perjudiciales ya que causan deterioro, por lo que hay que eliminarlos o inhibir su crecimiento. Los tres procesos que pueden utilizarse para este fin son:

- **Procesos térmicos:** pasteurización, esterilización, congelación, refrigeración.
- **Procesos químicos:** uso de aditivos para conservación, como por ejemplo azúcar o sal.
- **Deshidratación:** el contenido en humedad se disminuye evitándose la proliferación microbiana.

El secado es una operación compleja que comprende transferencia de materia y energía. Durante ella el material que se seca sufre una serie de transformaciones físicas y químicas. Dichas transformaciones afectan tanto a la calidad del producto como a los mecanismos de transferencia de materia y energía. El transporte de agua en el interior del sólido puede tener lugar principalmente por alguno de los siguientes mecanismos (Mujumdar y Devahastin, 2000):

- Difusión de líquido, si el sólido húmedo está a una temperatura por debajo del punto de ebullición del líquido.
- Difusión de vapor, si el líquido vaporiza en el interior del material.
- Difusión Knudsen, si el secado tiene lugar a muy bajas presiones y temperaturas, como en el caso de la liofilización.
- Difusión superficial (posible aunque no comprobada).
- Diferencias de presión hidrostática, cuando la velocidad de vaporización interna supera la velocidad del transporte de vapor desde el sólido a sus alrededores.
- Combinación de los mecanismos anteriores.

Al desecar experimentalmente un sólido se obtienen datos que relacionan el contenido en humedad del mismo con el tiempo de secado. Al representar las curvas de velocidad de secado, se observa que el secado no es un proceso suave y continuo. En la Figura 2.1.1. se representa una curva típica de velocidad de secado frente al tiempo. En ella se distinguen 3 regiones: AB, periodo de calentamiento; BC, periodo de velocidad de secado constante; CD, periodo de velocidad de secado decreciente (Perry et al., 1992).



**Figura 2.1.1.** Curva de secado típica.

A continuación se comentarán brevemente estos tres periodos.

- **Periodo de calentamiento**

Durante este periodo, también denominado de inducción o de velocidad de secado creciente, el producto se calienta, aumentando la temperatura de la interfase y adaptándose el material a las condiciones de operación.

- **Periodo de velocidad de secado constante**

Durante este periodo, el movimiento de humedad dentro del sólido es lo bastante rápido como para mantener saturada la superficie por lo que la velocidad de secado está controlada por la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación. El secado tiene lugar por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire estancado, hasta el medio que lo rodea. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la velocidad de transmisión de calor y la temperatura de la superficie saturada permanece constante. El mecanismo de pérdida de humedad equivale a la evaporación de agua y es esencialmente independiente de la naturaleza de los sólidos. La resistencia a la transferencia de calor o materia está localizada solamente en la

fase fluida de manera que el flujo de materia o calor no varía con el tiempo, siempre que las condiciones del aire de secado permanezcan constantes.

La ecuación de transferencia de materia para este periodo es (Chirife, 1979):

$$-\frac{dW}{dt}m_s = (A'k_Y)(\varphi_0 - \varphi_a) \quad \text{Ec. 2.1.1.}$$

donde  $W$  es el contenido en humedad medio (kg agua/kg ss),  $t$  es el tiempo (s),  $m_s$  es el contenido en materia seca (kg ss),  $A'$  es el área de evaporación ( $m^2$ ),  $k_Y$  es el coeficiente de transferencia de materia ( $kg/m^2s$ ),  $\varphi_0$  es la humedad relativa en la película de evaporación y  $\varphi_a$  es la humedad relativa ambiente

La magnitud de la velocidad constante depende de tres variables externas:

- El coeficiente de transmisión de calor o transferencia de materia.
- El área expuesta de secado.
- La diferencia de temperatura o humedad entre la corriente de aire y la superficie mojada del sólido.

El periodo de velocidad de secado constante se prolonga hasta que el contenido en humedad del sólido desciende a un valor denominado humedad crítica. La humedad crítica es característica de cada alimento y además depende de otros factores que controlan la velocidad del movimiento de humedad interno/externo.

En la mayoría de los alimentos, los valores obtenidos para el contenido de humedad crítica suelen estar muy cerca de los valores del contenido de humedad inicial, de manera que el periodo de velocidad de secado constante en alimentos es muy pequeño, debido a que en éstos la velocidad de transferencia interna de calor y materia determina la velocidad a la cual el agua está disponible en la superficie de evaporación (Mujumdar y Devahastin, 2000).

- **Periodo de velocidad de secado decreciente**

El periodo de velocidad decreciente comienza cuando es alcanzado el contenido crítico en humedad, al concluir el periodo de velocidad constante. Generalmente, este periodo se divide en dos etapas. En la primera etapa, de desecación de superficie no saturada, no toda la superficie de evaporación se puede mantener saturada por el movimiento de humedad dentro del sólido. La velocidad de secado disminuye en la porción no saturada y por lo tanto la velocidad en la superficie total disminuye. Conforme avanza el proceso se llega a un punto en el que toda la superficie de evaporación es insaturada. El punto de evaporación se desplaza dentro del sólido y el proceso de desecado entra en la segunda etapa de velocidad decreciente. Ahora, la velocidad de secado está regida por la velocidad del movimiento interno de la humedad y la influencia de las variables externas va en disminución (Perry, 1992).

### **2.1.2. Modelización de la operación de secado**

Dado que en la mayoría de alimentos el periodo de velocidad de secado constante es muy pequeño, siendo la humedad crítica prácticamente igual a la humedad inicial, a la hora de modelizar el secado se considera únicamente el periodo de velocidad decreciente.

Para la descripción del periodo de velocidad decreciente comúnmente se han empleado dos tipos de modelo: el modelo difusivo y el modelo frente-recesión. El primero de ellos está basado en el transporte difusional de agua y el segundo más ligado al transporte capilar (Mulet, 1994). El modelo difusivo fue formulado por Lewis (1921) y posteriormente desarrollado por Sherwood (1929). El transporte por capilaridad fue formulado matemáticamente por Luikov (1966). Además, existe un tercer modelo basado en ecuaciones de conservación (Whitaker, 1977), que da lugar a complejas formulaciones matemáticas, lo que representa una dificultad añadida a la formulación del modelo (Mulet, 1994). Además de estos modelos mecanísticos se encuentran en la bibliografía otros modelos empíricos (Peleg, 1993; Tsami y Katsioti, 2000). Aunque los modelos empíricos no pretenden describir como tiene lugar el proceso y sólo interpretan de

forma empírica los datos, son útiles en cuestiones de diseño cuando los problemas son excesivamente complicados (Mulet, 1994).

Dentro de los modelos mecánicos, es el modelo difusivo el que ha sido empleado en mayor medida. La principal ventaja de este modelo es que es fácil de formular y además proporciona resultados razonablemente buenos. Por contra, la facilidad de la formulación conlleva el tener que realizar una serie de simplificaciones. Por ello, en la formulación aparece el coeficiente de difusividad efectiva, que incluye el efecto de hipótesis conocidas así como fenómenos desconocidos que no se consideran en el modelo (Mulet, 1994).

Al emplear un modelo difusivo para describir los mecanismos de transporte, las ecuaciones empleadas se deducen a partir de la ley de Fick. Las que se encuentran ampliamente en la bibliografía corresponden a geometrías regulares: geometría plana con transporte en una única dirección (Ecuación 2.1.2.), geometría cilíndrica (Ecuación 2.1.3.), geometría esférica (Ecuación 2.1.4.) y geometría paralelepípedica con transporte multidireccional (Ecuación 2.1.5.),

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad \text{Ec. 2.1.2.}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} D_e \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial y} \right) \quad \text{Ec. 2.1.3.}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial r} \right) + \frac{2}{r} D_e \frac{\partial W}{\partial r} \quad \text{Ec. 2.1.4.}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_e \frac{\partial W}{\partial z} \right) \quad \text{Ec. 2.1.5.}$$

donde  $W$  es el contenido en humedad (kg agua/kg ss),  $r$  es la dimensión radial (m),  $x$  es la distancia sobre el eje  $x$  (m),  $y$  es la distancia sobre el eje  $y$  (m),  $z$  es la distancia sobre el eje  $z$  (m),  $D_e$  es la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ) y  $t$  es el tiempo (s). Cabe destacar que en las ecuaciones anteriormente descritas, el valor de la humedad ( $W$ ) es un valor puntual, es decir, en un determinado punto del sólido. Así en la Ecuación 2.1.2. sería  $W(x,t)$ , en la Ecuación 2.1.3.  $W(r,y,t)$ , en la

## INTRODUCCIÓN

---

Ecuación 2.1.4.  $W(r,t)$  y en la Ecuación 2.1.5.  $W(x,y,z,t)$ . Para identificar los parámetros de los modelos utilizados para describir la operación de secado, son necesarios valores experimentales, que generalmente son series humedad – tiempo. Dada la dificultad de determinar perfiles de humedad en un sólido que está sufriendo un proceso de secado, la humedad determinada experimentalmente suele ser una humedad media, por lo que a partir de los valores de humedad local obtenidos mediante las Ecuaciones 2.1.2., 2.1.3., 2.1.4. y 2.1.5. se calcula mediante integración la humedad media del sólido que está siendo modelizado.

Para la resolución analítica de estas ecuaciones diferenciales hay que hacer una serie de simplificaciones (Simal et al., 1998a):

- El contenido inicial de humedad es uniforme en todo el sólido
- El coeficiente de difusividad efectiva es constante y uniforme en todo el sólido (sólido isotrópico).

Además si no se considera ni la resistencia externa a la transferencia de materia ni la contracción, deberán tenerse en cuenta estas dos condiciones adicionales.

- La superficie del sólido está en equilibrio con la humedad del aire en el momento considerado, es decir, se considera despreciable la resistencia externa a la transferencia de materia. Por lo tanto, será la resistencia interna la que controle el proceso de secado.
- La forma y las dimensiones del sólido permanecen constantes durante el periodo de tiempo considerado.

El resto de condiciones de contorno utilizadas en el modelo, tendrán en cuenta aspectos relacionados con el equilibrio termodinámico y con la simetría del sólido.

En el presente apartado se ha descrito la forma más simple de modelizar el proceso de secado utilizando un modelo difusivo. En apartados posteriores se examinará como se aborda en la bibliografía el no realizar algunas de las

simplificaciones propuestas, en concreto, considerar que la resistencia externa a la transferencia de materia no es despreciable frente a la interna y/o considerar que el sólido sufre una variación de sus dimensiones a lo largo del proceso de secado.

### **2.1.3. El coeficiente de difusividad efectiva**

Conocer el coeficiente de difusión del agua o difusividad efectiva es importante para analizar o modelizar un sistema (Ruiz-Cabrera et al., 2004). Uno de los pioneros en la determinación de la difusividad del agua en productos cárnicos fue Radford (1975). Este autor evaluó el efecto de la temperatura en la difusividad del agua en muestras de magro de oveja por absorción con agua tritiada. La difusión es un fenómeno muy complejo debido tanto a la multitud de compuestos químicos que forman los alimentos como a su complicada estructura. Por ello son necesarios datos fiables de propiedades de transferencia de materia en alimentos que permitan diseñar y controlar los procesos industriales en los que tenga lugar dicho fenómeno (Mittal, 1999).

Normalmente, se asume que el coeficiente de difusividad efectiva es el mismo en todas las direcciones, ya que al modelizarse la operación de secado se suele considerar que el producto es isótropo. No obstante, en la bibliografía existen trabajos en los que se ha estudiado el efecto de la anisotropía de la carne en los valores de difusividad efectiva. De todas formas estos trabajos son escasos y contradictorios. Así, mientras que algunos autores han encontrado coeficientes de difusividad mayores en dirección paralela a las fibras de la carne que en dirección perpendicular (Gou et al., 1996; Gisbert et al, 2000; Gisbert, 2001) otros no han encontrado diferencias (Gou et al., 2002; Ruiz-Cabrera et al., 2004).

#### **2.1.3.1. Determinación de la difusividad efectiva**

La determinación de la difusividad en productos sólidos o semisólidos es esencial para cuantificar analizar y controlar las operaciones de transferencia de materia que tienen lugar en la industria agroalimentaria, como por ejemplo secado, absorción, extracción, separación con membranas etc. Es especialmente importante la difusividad de agua en alimentos ya que el agua, tanto en forma

## **INTRODUCCIÓN**

---

líquida como en forma de vapor está involucrada en multitud de operaciones de procesado de alimentos, así como en las reacciones que pueden sufrir los alimentos durante su envasado y almacenamiento (Saravacos y Maroulis, 2001). No existe un método standard para determinarla experimentalmente, aunque generalmente suele utilizarse uno de los siguientes métodos: cinéticas de sorción, medidas de permeabilidad o análisis de cinéticas de deshidratación (Mittal, 1999). Otros métodos que pueden ser utilizados son las curvas distancia-concentración (Marinos-Kouris y Maroulis, 1995) o la resonancia magnética nuclear (Ruiz-Cabrera, 2004). Como norma general, el método de medida debe estar relacionado con el proceso para el que se determina el valor de difusividad. Por ejemplo, los métodos basados en las cinéticas de deshidratación deben utilizarse cuando el valor de la difusividad se precise en aplicaciones de secado y las cinéticas de sorción se utilizarán en el caso de aplicaciones relacionadas con la adsorción de humedad durante el almacenamiento de alimentos (Saravacos y Maroulis, 2001).

A continuación se examinarán brevemente algunos de los métodos utilizados en la determinación de la difusividad de agua en alimentos.

### **2.1.3.1.1. Cinéticas de sorción**

Este método fue desarrollado y es ampliamente aplicado en polímeros. La velocidad de sorción (adsorción o desorción) se determina a partir de un balance de sorción en una muestra que se coloca en condiciones controladas de presión y temperatura (Saravacos y Maroulis, 2001).

El método se basa en la cantidad de sustancia que difunde sorbida por la muestra, cuando esta última se coloca en condiciones en las que la sustancia que difunde está disponible en una concentración controlada. Además, se deben procurar condiciones tales que la muestra alcance inmediatamente en su superficie el equilibrio con el ambiente que la rodea y que no exista resistencia externa a la transferencia de materia. A lo largo del experimento debe ir registrándose la variación de peso experimentada por la muestra.

### 2.1.3.1.2. Método de permeabilidad

Este método, al igual que el método de las cinéticas de sorción ha sido ampliamente utilizado en polímeros, que pueden ser preparados en forma de lámina delgada de microestructura homogénea para realizar la determinación. Su aplicación es difícil en alimentos ya que éstos presentan una estructura heterogénea (Saravacos y Maroulis, 2001).

Consiste en colocar el material en forma de película y permitir a la humedad que difunda a través de él, manteniendo un gradiente de concentración entre sus dos superficies y consiguiendo condiciones de estado estacionario. Para ello, una película de material se coloca entre dos recintos cuya concentración de humedad es conocida. Después de un tiempo, las superficies del material llegan al equilibrio con la concentración de humedad, de manera que se establece un gradiente de concentración constante entre ellas, lo que implica estado estacionario (Boudhrioua, et al., 2003). Este estado se expresa mediante la Ecuación 2.1.6.,

$$j = D_e \frac{(C_{RA} - C_{RB})}{Y} \quad \text{Ec. 2.1.6.}$$

donde  $j$  es la densidad de flujo constante de la sustancia que difunde ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ),  $D_e$  es la difusividad efectiva ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), que en esta ecuación no depende de la concentración,  $C_{RA}$  y  $C_{RB}$  es la concentración en las superficies A y B de la película de material ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $Y$  es el espesor de la película de material (m).

Tal y como se observa en la Ecuación 2.1.6., la difusividad puede ser estimada midiendo el flujo de humedad y conociendo las concentraciones en las superficies y el espesor de la película de material. El flujo de humedad se puede determinar pesando las celdas de difusión en diferentes intervalos de tiempo. Las concentraciones en la superficie pueden determinarse utilizando la isoterma de sorción del material en estudio.

## INTRODUCCIÓN

---

### 2.1.3.1.3. Análisis de cinéticas de deshidratación

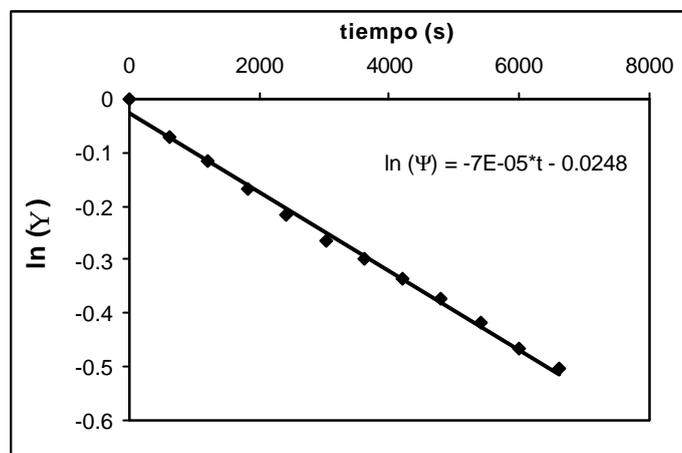
Las muestras se colocan en un secadero y la difusividad se determina a partir de los datos de secado. Los análisis de las cinéticas de secado se basan en la ley de Fick de la difusión. La diferencia entre los distintos métodos que pueden ser utilizados estriba en el método elegido para la resolución del modelo propuesto basado en la ley de Fick (Marinos-Kouris y Maroulis, 1995). La difusividad a partir de las cinéticas de secado puede ser calculada mediante tres métodos: a partir de las pendientes de las curvas de secado, reduciendo la diferencia entre los valores experimentales y los calculados mediante un método de optimización o mediante el método del régimen regular (Mittal, 1999).

- **Determinación de la difusividad a partir de la pendiente de la curva de secado.**

La difusividad se calcula a partir de la representación del logaritmo neperiano de la humedad media adimensional frente al tiempo. Esta representación se ajusta a una línea recta y la difusividad se calcula a partir de la pendiente de la misma, tal y como se muestra en la Ecuación 2.1.7., donde  $W$  es la humedad media (kg agua/kg ss),  $W_0$  es la humedad media inicial (kg agua/kg ss),  $W_e$  es la humedad media de equilibrio (kg agua/kg ss),  $D_e$  es la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ),  $t$  es el tiempo (s) y  $\lambda$  es la dimensión característica (m). La dimensión característica sería el radio en el caso de un cilindro infinito y de una esfera y el semiespesor en el caso de una lámina infinita con plano central de simetría.

$$\ln(\psi) = \ln\left(\frac{W - W_e}{W_0 - W_e}\right) = \frac{-\pi^2 D_e}{4\lambda^2} t \quad \text{Ec. 2.1.7.}$$

En la Figura 2.1.2. se muestra a modo de ejemplo la representación que se describe en la Ecuación 2.1.7., para una serie de datos experimentales.



**Figura 2.1.2.** Determinación de la difusividad a partir de la representación del  $\ln(\Psi)$  frente al tiempo.

La determinación de la difusividad a partir de la pendiente de la curva de secado es un método válido para geometrías regulares siempre y cuando se realicen una serie de simplificaciones: la resistencia externa a la transferencia de materia es despreciable respecto a la interna, las condiciones del aire de secado permanecen constantes al igual que la difusividad, el volumen permanece invariable durante el periodo de secado. Se encuentran en la bibliografía autores que han utilizado esta metodología para determinar la difusividad efectiva en distintos productos agroalimentarios: yogur (Kim y Bhowmik, 1995), jamón curado (Gou et al, 1996), crackers (Kim y Okos, 1999), pimiento (Ade-Omowaye et al. 2002).

- **Determinación de la difusividad reduciendo la diferencia entre los valores experimentales y calculados**

En este caso, para la determinación de la difusividad efectiva se formula un modelo, generalmente basado en la ley de Fick. A partir de una serie de datos de secado experimentales, se identifica aquel valor de difusividad efectiva que proporciona la mayor concordancia entre éstos y los calculados utilizando el modelo propuesto. Los modelos propuestos pueden ser más o menos complejos, lo que determinará el método que podrá ser utilizado para la resolución

## **INTRODUCCIÓN**

---

de los mismos. Este método de determinación de la difusividad ha sido ampliamente utilizado ya que permite tener en cuenta en la modelización de las cinéticas de secado aspectos tales como la resistencia externa o la contracción. Por ejemplo, de esta forma ha sido determinada la difusividad efectiva en judías verdes (Rosselló et al., 1997), en pescado (Park, 1998), en carne de cerdo salada (Gou et al., 2002), en patata (Frías et al., 2003) o en tomate (Telis et al., 2004).

- **Método del régimen regular**

Este método se basa en la medida experimental de la cinética de régimen regular, que es aquella independiente del perfil inicial de humedad. Mediante este método, la difusividad dependiente de la concentración de agua puede ser estimada. Este método es bastante complicado y necesita sucesivas interpolaciones y diferenciaciones de los datos experimentales de secado (Comaposada, 1999). En la bibliografía se encuentran estudios en los que se ha utilizado esta metodología para la determinación de la difusividad efectiva (Kim y Bhowmik, 1995; Inazu y Iwasaki, 2000; Yamamoto, 2001; Adhikari et al., 2002)

### **2.1.3.1.4. Curvas distancia-concentración**

Este método consiste en determinar a un tiempo  $t$  el perfil de concentración de una sustancia en el interior de la muestra en estudio, en función de la distancia, durante un proceso difusivo unidimensional que tiene lugar en régimen transitorio. Este método puede ser aplicado tanto a humedad como a solutos (Boudhrioua et al., 2003). El análisis de los datos obtenidos se realiza utilizando la ley de Fick.

### **2.1.3.1.5. Resonancia magnética nuclear (RMN)**

Las imágenes obtenidas por resonancia magnética nuclear permiten la determinación de los perfiles de humedad de un producto de forma no destructiva (Ruiz-Cabrera et al., 2004). Los primeros en aplicar esta técnica fueron Gummerson et al. (1979), los cuales estudiaron la evolución de los perfiles de humedad en el interior de materiales de construcción. Más tarde esta técnica fue

aplicada para determinar la evolución del contenido en humedad durante distintos procesos (secado, congelación, rehidratación y cocción) en distintos productos agroalimentarios: manzanas (Verstreken et al., 1998), maíz (Song y Litchfield, 1990), en patata (Rutledge et al., 1994), pasta (Hills et al., 1997) o carne de cerdo (Ruiz-Cabrera et al., 2004).

### **2.1.3.2. Valores de difusividad para algunos alimentos**

Los valores de difusividad en alimentos no sólo son escasos sino que frecuentemente no son concordantes, debido a una serie de factores (Saravacos y Maroulis, 2001):

- diferencia entre métodos de determinación empleados
- diferencia entre los métodos de análisis de los resultados experimentales
- variación en la composición de los distintos alimentos
- variación en la estructura de los alimentos

Saravacos y Maroulis (2001) realizaron una exhaustiva recopilación de valores de difusividad para distintos alimentos. Observaron que el valor menor corresponde a alimentos en fase vítrea y es del orden de  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ . Los valores más altos, del orden de  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  corresponden a la difusión de vapor de agua a presión atmosférica. Se pueden obtener valores superiores de difusividad de vapor de agua utilizando vacío.

A modo de ejemplo, en la Tabla 2.1.1. se muestran los valores de difusividad efectiva obtenidos en la bibliografía para algunos productos cárnicos. Además, se refleja el rango de temperatura para el que fueron obtenidos dichos valores.

## INTRODUCCIÓN

**Tabla 2.1.1.** Valores de difusividad efectiva obtenidos por diversos autores para algunos productos animales. ^ (dirección perpendicular a las fibras). // (dirección paralela a las fibras).

PRODUCTO	T (°C)	$D_e$ (m <sup>2</sup> /s)	Cita
Músculo de pescado	30	$8.10 \cdot 10^{-11} - 3.40 \cdot 10^{-10}$	Jason, 1958
Ternera	30	$1.00 \cdot 10^{-11}$	Saravacos y Stinchfield, 1965
Pez espada	40 - 55	$2.50 \cdot 10^{-10} - 8.90 \cdot 10^{-10}$	Del Valle y Nickerson, 1968
Pavo	22	$8.00 \cdot 10^{-15}$	Margaritas y King, 1971
Pepperoni	12	$4.70 \cdot 10^{-11} - 5.70 \cdot 10^{-11}$	Palumbo et al., 1977
Ternera liofilizada	25	$3.10 \cdot 10^{-11}$	Lomauro et al., 1985
Ternera picada	30 - 120	$5.00 \cdot 10^{-11} - 53.00 \cdot 10^{-11}$	Motarjemi, 1988
Sobrasada	10 - 16	$2.90 \cdot 10^{-11} - 5.40 \cdot 10^{-11}$	Mulet et al., 1992
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	10 - 30	$0.80 \cdot 10^{-11} - 2.60 \cdot 10^{-11}$	Palmia et al., 1993
Cerdo salado ( <i>Gluteus medius</i> )	13	$6.45 \cdot 10^{-11}$ (^) $9.28 \cdot 10^{-11}$ (//)	Gou et al., 1996
Salami	10 - 20	$0.03 \cdot 10^{-11} - 0.37 \cdot 10^{-11}$	Diaferia et al., 1998
Piel de calamar	30	$8.23 \cdot 10^{-11} - 1.00 \cdot 10^{-10}$	Teixeira y Tobinaga, 1998
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	6	$2.47 \cdot 10^{-11}$ (^) $8.34 \cdot 10^{-11}$ (//)	Gisbert, 2001
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	9	$2.61 \cdot 10^{-11}$ (^) $8.92 \cdot 10^{-11}$ (//)	Gisbert, 2001
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	12	$2.68 \cdot 10^{-11}$ (^) $10.00 \cdot 10^{-11}$ (//)	Gisbert, 2001
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	16	$2.86 \cdot 10^{-11}$ (^) $12.60 \cdot 10^{-11}$ (//)	Gisbert, 2001
Cerdo salado ( <i>Biceps femoris</i> )	5	$2.10 \cdot 10^{-11}$	Gou et al., 2002
Cerdo salado ( <i>Gluteus medius</i> )	5	$2.55 \cdot 10^{-11}$	Gou et al., 2002
Cerdo salado ( <i>Semimembranosus</i> )	5	$2.03 \cdot 10^{-11}$	Gou et al., 2002

### **2.1.3.3. Factores que afectan a la difusividad efectiva**

Dado que la difusividad efectiva es una propiedad de transporte influenciada por la temperatura, frecuentemente se considera constante durante el procesado a una misma temperatura, aunque también existen otros factores que pueden influir en mayor o menor medida en ella, tales como el contenido en sal o la humedad de las muestras.

#### **2.1.3.3.1. Contenido en sal**

El contenido en sal puede afectar a la transferencia de agua debido a dos mecanismos diferentes. Por un lado tiene un efecto sobre las proteínas y por lo tanto sobre su capacidad de retención de agua. Por otro, al aumentar la cantidad de sólidos disueltos se afecta a la actividad de agua.

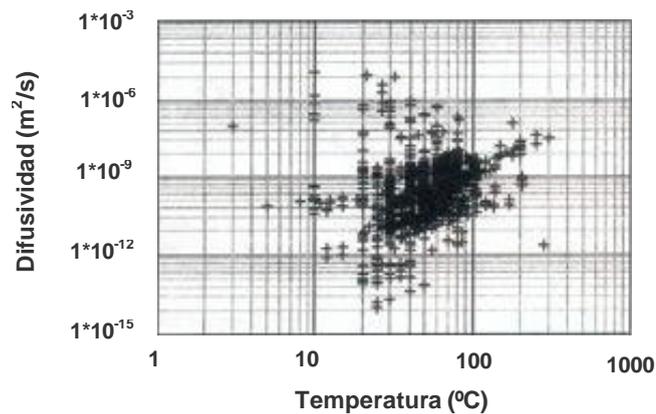
Aunque la carne tiene un contenido bajo en sal, hay que tener en cuenta que los productos crudo – curados son sometidos a un proceso de salado, tras el cual son secados y curados. Existen algunos estudios en la bibliografía sobre la influencia del contenido en sal en la difusividad del agua. Así, Palmia et al. (1993) observaron que la difusividad efectiva disminuía al aumentar el contenido en sal de lomo de cerdo, observándose mayores efectos a elevadas temperaturas y bajo contenido en humedad. Comaposada (1999) encontró una relación exponencial entre el contenido en sal y la difusividad efectiva, de manera que al aumentar el contenido en sal, se observó una disminución de los valores de difusividad efectiva. Gou et al. (2003) también obtuvieron una disminución del valor de difusividad conforme aumentaba el contenido en sal en muestras de carne de cerdo saladas procedentes del músculo *Gluteus medius*.

#### **2.1.3.3.2. Temperatura**

La influencia de la temperatura en la difusividad efectiva tiene su origen en la mayor movilidad (energía cinética) de las moléculas de agua que se origina al aumentar la temperatura. Así, un aumento de la temperatura provoca una mayor movilidad de las moléculas de agua, con lo cual la difusividad efectiva aumenta o lo que es lo mismo, disminuye la resistencia interna a la transferencia de materia.

## INTRODUCCIÓN

Saravacos y Maroulis (2001) recopilaron valores de difusividad efectiva para distintos alimentos en función de la temperatura. En la Figura 21.3. se muestran los valores obtenidos por estos autores para los distintos alimentos estudiados.



**Figura 2.1.3.** Difusividad efectiva para varios alimentos a distintas temperaturas (Saravacos y Maroulis, 2001).

Saravacos y Maroulis (2001) observaron que la mayoría de los valores de difusividad que encontraron en la bibliografía estaban comprendidos entre  $1 \cdot 10^{-11}$  y  $1 \cdot 10^{-8}$ . Además, tal y como puede comprobarse en la Figura 2.1.3., observaron una tendencia de aumento general en los valores de difusividad efectiva al aumentar la temperatura. El efecto de la temperatura en la difusividad efectiva de los alimentos ha sido ampliamente descrito en la bibliografía mediante la ecuación de Arrhenius (Ecuación 2.1.8.),

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{\mathfrak{R}T}\right) \quad \text{Ec. 2.1.8.}$$

donde  $D_0$  es un factor preexponencial ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $E_a$  es la energía de activación ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ),  $\mathfrak{R}$  es la constante de los gases perfectos ( $8.31441 \text{ kJ}/\text{kmol K}$ ) y  $T$  es la temperatura (K).

La energía de activación se puede determinar a partir de la representación gráfica del  $\ln(D_e)$  frente a  $(1/T)$ . Es la mínima energía necesaria que debe poseer el agua para poder ser eliminada durante el proceso de secado. Representa una barrera energética que debe ser sobrepasada para que el proceso tenga lugar. Así, cuanto mayor sea el valor de energía de activación en un alimento, mayor será la dificultad del mismo para deshidratarse. A modo de ejemplo, en la Tabla 2.1.2. se muestran los valores de energía de activación obtenidos por diferentes autores en algunos alimentos.

**Tabla 2.1.2.** Valores de energía de activación para distintos alimentos. // (dirección paralela a las fibras). ^ (dirección perpendicular a las fibras).

PRODUCTO	ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (kJ/mol)	CITA
Bacalao	29.7 – 36.8	Jason, 1958
Pez espada	14.2 - 15	Del Valle et al., 1968
Maíz	46	Bimbenet et al., 1986
Cerdo fresco ( <i>Longissimus dorsi</i> )	22 - 28	Palmia et al., 1993
Plátano	22	Kechaou y Maalej, 1994
Pasta	22.6	Waananen y Okos, 1996
Cerdo fresco ( <i>Gluteus medius</i> )	35.11	Comaposada, 1999
Cerdo salado ( <i>Gluteus medius</i> )	53.47 (0.09 kg NaCl/kg ss)	Comaposada, 1999
Cerdo salado ( <i>Gluteus medius</i> )	58.65 (0.23 kg NaCl/kg ss)	Comaposada, 1999
Cerdo salado ( <i>Gluteus medius</i> )	51.78 (0.30 kg NaCl/kg ss)	Comaposada, 1999
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	27.84 (//)	Gisbert, 2001
Cerdo salado ( <i>Longissimus dorsi</i> )	9.59 (^)	Gisbert, 2001
Patata	22.9	Frías et al., 2003

## **INTRODUCCIÓN**

---

### **2.1.3.3.3. Contenido en humedad**

Puesto que la difusividad efectiva es una propiedad de transporte, el contenido en humedad no debería influir en la misma. Sin embargo, dado que cambia la microestructura del alimento durante la deshidratación, en algunos casos esto da lugar a que se observen cambios en la difusividad efectiva. La dependencia de la difusividad efectiva del contenido en humedad se puede tener en cuenta bien considerando la energía de activación o el factor preexponencial  $D_0$  como una función empírica dependiente de la temperatura y/o de la humedad. También pueden utilizarse otras ecuaciones empíricas no basadas en la ecuación de Arrhenius.

### **2.1.4. El coeficiente de transferencia de materia**

La evolución del contenido en agua de un alimento durante el proceso de secado, así como su distribución en el interior del mismo (perfil de humedad) depende de la evaporación del agua en la interfase aire/producto. La velocidad de evaporación, ligada al coeficiente de transferencia de materia, está influida tanto por las características del aire que rodea el producto que se está secando, como por la difusividad efectiva del agua en el alimento (Ruiz-Cabrera et al., 2004).

El coeficiente de transferencia de materia es esencial a la hora de diseñar y controlar procesos como el secado o el almacenamiento de alimentos. Una característica importante del coeficiente de transferencia de materia es que es influido por las condiciones de procesado (Krokida et al., 2001).

El coeficiente de transferencia de materia en la superficie de un alimento se define mediante la Ecuación 2.1.9.,

$$j = k(C - C_e) = k\Delta C \quad \text{Ec. 2.1.9.}$$

donde  $j$  es la densidad de flujo de materia ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ),  $k$  es el coeficiente de transferencia de materia ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $C$  es el contenido en humedad del aire ( $\text{kg agua}/\text{m}^3$ ) y  $C_e$  es la humedad de equilibrio del aire en la superficie del sólido ( $\text{kg agua}/\text{m}^3$ ).

Tal y como muestra la Ecuación 2.1.9., el coeficiente de transferencia de materia se define de forma análoga al coeficiente de transferencia de calor. En este último, se considera como fuerza impulsora la diferencia de temperatura. En cambio, la fuerza impulsora en el caso de transferencia de materia puede expresarse como una diferencia de concentración ( $\Delta C$ ), como una diferencia de fracción másica ( $\Delta Y$ ) o como una diferencia de presión ( $\Delta P$ ). Así, las unidades en las cuales vendrá expresado el coeficiente de transferencia de materia serán respectivamente:  $k$  (m/s),  $k_Y$  (kg/m<sup>2</sup>s) y  $k_P$  (kg/m<sup>2</sup>sPa). Por lo tanto, los tres coeficientes de transferencia de materia se pueden definir según la Ecuación 2.1.10. (Saravacos, 1997):

$$j = k\Delta C = k_Y\Delta Y = k_P\Delta P \qquad \text{Ec. 2.1.10.}$$

Generalmente, al modelizar el secado la Ecuación 2.1.9. se incorpora al modelo en forma de condición de contorno. Esta condición de contorno se tiene en cuenta cuando la resistencia externa a la transferencia de materia (la inversa del coeficiente de transferencia de materia) no es despreciable frente a la interna (la inversa de la difusividad efectiva multiplicada por la dimensión característica). En otros casos, se considera que la superficie del material alcanza inmediatamente el equilibrio. Suponiendo una lámina de espesor  $2L$ , esta condición viene descrita en la Ecuación 2.1.11.

$$W(L,t) = W_e \qquad \text{Ec. 2.1.11.}$$

La condición de contorno más utilizada en productos agroalimentarios es la descrita en la Ecuación 2.1.11., en la que se supone que la superficie del material está en equilibrio con el aire que lo rodea. Generalmente esta condición se supone debido a la dificultad que entraña la determinación del coeficiente de transferencia de materia para productos biológicos (Queiroz y Nebra, 2001).

En la bibliografía se encuentran trabajos sobre secado de productos agroalimentarios en los cuales no parece tener importancia la resistencia externa a

## INTRODUCCIÓN

---

la transferencia de materia y por lo tanto no es considerada (Mulet et al., 1992; Simal et al., 1994; Gou et al., 1996; Roselló et al., 1997; Simal et al., 2000; Park et al., 2002) y otros en los que ésta sí que se debe tener en cuenta (Miketinak et al., 1992; Markowski, 1997; Comaposada, 1999; Iguaz et al., 2003; Tiwari et al., 2004).

El coeficiente de transferencia de materia puede determinarse por medida directa o indirecta de la velocidad de transferencia de materia durante un experimento cuyas condiciones estén controladas. Por ejemplo en un equipo de secado en el cual la temperatura, la humedad y la velocidad del aire se controlen y se mantengan constantes se puede determinar la pérdida de humedad del producto a lo largo del proceso de secado. Los resultados experimentales se correlacionarían con la Ecuación 2.1.9., con lo que se obtendría el valor de  $k$  (Saravacos y Maroulis, 2001), siempre y cuando pudiese considerarse despreciable la resistencia interna a la transferencia de materia frente a la externa. En la bibliografía, a partir de consideraciones ligadas a las analogías de transporte, se han establecido relaciones entre los valores obtenidos para el coeficiente de transferencia de materia en función de las propiedades físicas del aire, así como de la geometría del material. Los coeficientes de estas correlaciones son frecuentemente corregidos a partir de datos experimentales. Entre las consideraciones a tener en cuenta está el movimiento del aire, es decir, si tiene lugar por convección natural o por convección forzada.

El coeficiente de transferencia de materia ,que depende de consideraciones geométricas, de las propiedades del aire y de su circulación, en realidad es un factor que engloba a los diferentes fenómenos de transporte que tienen lugar. Por ello, es función de las dimensiones y temperatura del material, así como de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire que lo rodea (Marinos-Kouris y Maroulis, 1995).

En determinadas circunstancias, las analogías entre fenómenos de transporte permiten predecir que para circunstancias análogas, los perfiles de humedad y de temperatura en su expresión adimensional así como los coeficientes de transferencia de materia y energía en forma adimensional, vienen determinados por funciones análogas. Para convertir las correlaciones para

transferencia de calor en ecuaciones para transferencia de materia se transforman los módulos adimensionales usados en transferencia de calor en los módulos adimensionales equivalentes para transferencia de materia (Treybal, 1968). Dado el interés que presentan estas analogías, se muestran en el Anejo 10.1.

#### **2.1.5. El fenómeno de la contracción durante el secado**

Durante el secado de alimentos se producen en éstos diversos cambios físicos, químicos y nutricionales. Uno de los cambios físicos importantes es la variación de volumen que experimentan los alimentos durante su deshidratación por aire caliente.

La contracción sufrida por los alimentos deshidratados puede tener efectos negativos en la calidad de los mismos. En algunos casos, las variaciones de forma, pérdida de volumen o aumento de la dureza inducen una sensación negativa en el consumidor. En cambio, en otros productos deshidratados como las pasas o los dátiles, el aspecto deformado y contraído del producto es apreciado por el consumidor (Mayor y Sereno, 2004).

La pérdida de agua y las variaciones de temperatura que experimentan los alimentos durante su deshidratación provocan estrés en las estructuras celulares lo que les provoca deformaciones y reducción de sus dimensiones (Mayor y Sereno, 2004). Por ello, la base teórica de la contracción puede incluir leyes mecánicas, teniendo en cuenta los esfuerzos que sufre el material y las deformaciones durante la deshidratación. Esta aproximación fue usada por algunos investigadores (Shishido et al., 1986; Towner, 1987) en el secado de polímeros, arcilla y suelo. Para modelizar la contracción de alimentos desde este punto de vista, se necesitarían conocimientos sobre la estructura y sobre las propiedades elásticas y mecánicas de cada fase, así como sobre su variación con el contenido en humedad y la temperatura (Ratti, 1994). Dada la complejidad de los alimentos, este tipo de aproximación no resulta generalmente factible.

La contracción de alimentos no es perfectamente homogénea. Al principio del secado, las partículas mantienen su geometría original aunque la contracción es importante, con lo que sus dimensiones pueden obtenerse por medida directa.

## **INTRODUCCIÓN**

---

Conforme avanza el secado, la contracción va siendo acompañada por deformaciones en las partículas por lo que un método de evaluación directo del volumen requiere un número de medidas grande para obtener resultados representativos. Por ello, sería necesario utilizar otros métodos de medida como el análisis de imagen o la determinación de las fuerzas de empuje que se originan durante la inmersión de un sólido en un fluido debido al volumen del segundo desplazado por el primero.

La contracción durante el secado convectivo puede estar influida por diferentes factores: la cantidad de agua eliminada durante el proceso, la movilidad de la matriz sólida, la velocidad de secado o las condiciones a las cuales se lleva a cabo el proceso (Mayor y Sereno, 2004).

- **Cantidad de agua eliminada**

Puede obtenerse una relación lineal simple entre la contracción y el contenido en agua, para condiciones de secado constantes, lo que implicaría un aumento de la contracción conforme el agua es eliminada. La relación lineal entre la contracción y el contenido en humedad ha sido corroborada por diferentes autores en distintos productos agroalimentarios: patatas (Roselló et al., 1992), uva (Sanjuán et al., 1996), judías verdes (Roselló et al., 1997), plátano (Jonson et al., 1998), zanahorias (Hatamipour y Mowla, 2002), champiñones (Abhijit y Gupta, 2003), maíz y guisantes (Hatamipour y Mowla, 2003) entre otros.

- **Movilidad de la matriz sólida**

La movilidad de la matriz sólida está directamente relacionada con su estado físico. Una elevada movilidad se corresponde con un comportamiento viscoelástico típico del estado gomoso, mientras que una baja movilidad corresponde a un comportamiento elástico típico del estado vítreo. Para contenidos de humedad elevados, cuando el alimento está en estado gomoso, la contracción compensa por completo la pérdida de humedad. Cuando el contenido en humedad es bajo, la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) aumenta provocando que el material pase de estado gomoso a estado vítreo, por lo que la contracción disminuye. Este comportamiento explicaría las desviaciones observadas por

algunos autores entre la contracción y el volumen de agua perdido (Mayor y Sereno, 2004).

- **Velocidad de secado**

En la deshidratación de alimentos, la transferencia de materia tiene lugar debido conjuntamente a un control tanto interno como externo, mientras que el transporte de energía se controla externamente. La contracción puede cambiar con la variación en las resistencias a la transferencia de materia. Así, para bajas velocidades de secado prevalece la resistencia externa, los perfiles de humedad en la muestra son bastante planos y los esfuerzos internos son mínimos con lo que el sólido encoge de modo relativamente uniforme. Para velocidades elevadas, la resistencia interna controla la velocidad de transferencia de materia, sobre todo para contenidos en agua bajos. La superficie se seca más que el centro y el cuerpo sufre una contracción desigual. Por otro lado hay que considerar que si la velocidad del aire y la temperatura son muy elevadas, en la superficie del alimento habrá un contenido en humedad muy bajo, lo que hará que se forme una costra que limite la contracción. En esta costra, pueden tener lugar transiciones de fase y puede formarse una matriz vítrea que impida al sólido contraerse durante el resto del proceso de secado (Mayor y Sereno, 2004).

- **Condiciones de procesado**

Algunos autores han estudiado la influencia de las condiciones de secado, temperatura, velocidad y humedad relativa, en la contracción. Los resultados obtenidos por los diferentes autores son contradictorios entre sí. Por ejemplo, algunos han observado un aumento de la contracción al aumentar la temperatura (McMinn y Magee, 1997b; Del Valle et al., 1998) en otros esta influencia no queda bien definida (Ratti, 1994). Por ello, parece que lo que determina la contracción, es el efecto combinado de condiciones de procesado, que puede provocar la formación de una costra superficial en el producto durante las primeras etapas del secado, lo que determinará cuánto y cómo va a contraerse el alimento durante el proceso.

### 2.1.5.1. Modelización del secado considerando contracción

Aunque al secar se produce contracción, muchos de los modelos que se proponen en la bibliografía para predecir la distribución de temperatura y humedad durante el secado no la tienen en cuenta. Además, suelen despreciarse también los cambios en las características físicas y propiedades térmicas. Estas simplificaciones se realizan generalmente para obtener modelos más sencillos y fáciles de resolver. Además, cuando la contracción es considerada normalmente se supone que ésta es perfectamente homogénea, es decir, se considera una contracción media del producto (Ruiz-Cabrera et al., 2004), aunque en la bibliografía se encuentran trabajos en los que se pone de manifiesto que esta hipótesis no es cierta, incluso en alimentos de estructura homogénea. Por ejemplo, durante el secado de cubos, paralelepípedos y cilindros de patata Mulet et al. (2000) observaron que la contracción variaba según la forma de las partículas y según la dirección, constatando que la dirección mayor encogía menos que la menor. No obstante y dada la complejidad del fenómeno resulta necesario realizar una serie de simplificaciones, con el fin de poderlo incluir en los modelos de deshidratación.

Generalmente, a la hora de modelizar la deshidratación de alimentos teniendo en cuenta el fenómeno de la contracción, se considera que ésta es homogénea en todas las direcciones. Por lo tanto se suelen utilizar condiciones de contorno variables y relaciones empíricas entre la variación de volumen y el contenido en humedad a la hora de resolver el modelo (Mulet, 1994; Ratti y Mujumdar, 1995; Simal et al., 1998b; Queiroz y Nebra, 2001; Viollaz y Rovedo, 2002; Pakowski et al., 2003).

Otra forma de incluir la contracción en los modelos de secado es utilizar modelos teóricos para describirla, los cuales representan una mayor complejidad. Para la formulación de estos modelos se utilizan balances de materia y además se tienen en cuenta propiedades físicas tales como la densidad y la porosidad. En algunos casos se tiene además en cuenta la diferente variación de volumen que sufren las diferentes fases del sistema (Mayor y Sereno, 2004). En la bibliografía se encuentran estudios en los cuales la contracción ha sido modelizada utilizando

modelos teóricos (Rahman et al., 1996, Kowalski, 1996). La utilización de los modelos teóricos es menos frecuente que la de los modelos empíricos.

Mayor y Sereno (2004) han realizado una revisión sobre la modelización de la contracción durante el secado convectivo de alimentos. A partir de una serie de datos experimentales obtenidos para diferentes productos agroalimentarios deshidratados por aire: manzana (Moreira et al., 2000), zanahoria (Krokida y Maroulis, 1997), patata (Lozano et al, 1983) y calamar (Rahman et al., 1996), han comprobado la validez de algunos modelos para la contracción propuestos en la bibliografía. Estos autores han concluido que excepto en algunos casos, los valores calculados utilizando modelos empíricos y teóricos presentan una desviación similar respecto a los datos experimentales.

Las variaciones de volumen experimentadas por los alimentos afectan a las propiedades físicas del mismo así como a sus propiedades de transporte (Hatamipour y Mowla, 2002). Por ello al utilizar un modelo para determinar la difusividad efectiva de un alimento, pueden obtenerse valores diferentes si se tiene en cuenta o no la contracción que se produce durante el proceso de transferencia de materia. Por ello, y con el fin de analizar la influencia de las variaciones estructurales y de volumen que ocurren durante la deshidratación, es interesante considerar diferentes tipos de modelos y examinar el efecto que las diferentes hipótesis producen en el valor del coeficiente de difusión identificado, ya que la importancia de la contracción varía según el producto agroalimentario estudiado.

Podría pensarse que cuanto mayor es la complejidad de un modelo, mayor es también la exactitud que se consigue en los resultados y más precisa es la descripción que se obtiene de los fenómenos que están teniendo lugar. Pero esto no es así necesariamente, ya que un mayor grado de complejidad del modelo puede provocar una serie de artefactos matemáticos al ser resuelto, así como generar incertidumbres ligadas a los nuevos parámetros que se introducen, por lo que la realidad experimental puede quedar enmascarada en la complejidad del modelo. Por lo tanto el uso de modelos matemáticos complejos, incluyendo aspectos tales como la contracción, sólo estaría justificado en el caso de conseguir una descripción más precisa de la realidad.

### **2.1.6. Métodos de resolución de los modelos de secado**

Una vez planteado el modelo matemático que describa la realidad experimental, se procederá a su resolución. Tal y como se ha visto hasta ahora, al modelizar la operación de secado se pueden o no realizar una serie de simplificaciones. El tener o no en cuenta ciertos aspectos tales como la contracción y/o la resistencia externa a la transferencia de materia, condiciona qué métodos pueden ser utilizados para resolver los modelos y cuales no. Los métodos que pueden ser utilizados son analíticos o numéricos, en función de las características de los modelos a resolver. En Tecnología de Alimentos, el método analítico más utilizado es el método de separación de variables (Bouraoi et al., 1994; Azzouz et al., 2002; Reyes et al., 2002; Frías et al., 2003). Dentro de los métodos numéricos que se usan para la resolución de modelos que no permiten la obtención de una solución analítica, se encuentran el método de las diferencias finitas (Simal et al., 1998b; Teixeira y Tobinaga, 1998; Simal et al., 2000; Viollaz y Rovedo, 2002) y el método de los elementos finitos (Miketinak et al., 1992; Bowser y Wilhelm, 1995; Irudayaraj y Wu, 1997; Yang et al., 2001; Wang y Sun, 2002).

## **2.2. Equilibrio aire – agua – alimento**

En cualquier proceso de transferencia de materia es fundamental el conocimiento de la relación de equilibrio aire – agua – alimento ya que ésta fijará los límites del cambio posible. Durante el proceso de secado se transfiere energía desde el aire hasta el alimento (suministrando el calor latente de vaporización) y el vapor de agua es transferido en dirección opuesta, desde el alimento al aire. El uso de la actividad del agua en relación con la predicción de la estabilidad de los alimentos tiene gran interés para la industria alimentaria, por lo que a continuación se expondrán algunos conceptos de elevada utilidad práctica en relación con el equilibrio aire – agua – alimento: actividad de agua, isotermas de sorción y calor isostérico de sorción.

### **2.2.1. El concepto de actividad de agua**

El agua es el componente que domina los sistemas alimentarios, influyendo significativamente en las variables del proceso, las características del producto y los factores de estabilidad. Todos los alimentos contienen agua y es bien conocido que aquellos más susceptibles de degradación (tanto física como química) son los que contienen altos niveles de agua. El agua controla la mayoría de los fenómenos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren en los alimentos ya que constituye el medio de reacción y es el componente principal en la mayoría de ellos. Pero el contenido en agua en un alimento no permite conocer la forma en que se producirán estas reacciones en el mismo. Lo verdaderamente importante es el grado de disponibilidad que tiene el agua en el alimento. Por ejemplo, la cantidad de agua que hay en un producto congelado antes y después de la congelación es la misma, sin embargo, al congelar el producto, el agua disponible para las reacciones de deterioro se reduce drásticamente, por lo que se aumenta considerablemente la vida útil del producto.

La actividad de agua ( $a_w$ ) en un alimento se define como la relación entre la presión de vapor de agua en equilibrio con dicho alimento y la presión de vapor de agua pura a la misma temperatura. El agua tiene una presión de vapor baja a temperatura ambiente por lo que puede considerarse que su comportamiento es

## INTRODUCCIÓN

---

ideal en la fase de vapor. Por ello cuando un producto se encuentra en equilibrio con su entorno a una temperatura determinada, la actividad de agua,  $a_w$ , del producto es igual a la humedad relativa de equilibrio, HRE (Ecuación 2.2.1.).

$$a_w = \frac{p_f}{p_o} = \frac{\text{HRE}}{100} \quad \text{Ec. 2.2.1.}$$

donde  $p_f$  es la presión de vapor ejercida por el alimento (Pa) y  $p_o$  es la presión de vapor saturado de agua a la misma temperatura (Pa).

A pesar de existir diversidad de criterios basados en el agua como indicador de la estabilidad de los alimentos (incluyendo el contenido de agua, la concentración de solutos y la presión osmótica) está ampliamente aceptado que la actividad de agua es la forma más útil y efectiva de medir el contenido de agua disponible en los alimentos, sobre todo en lo referente al crecimiento microbiológico y la actividad enzimática (Chirife e Iglesias, 1992; McLaughlin y Magee, 1998; Comaposada et al., 2000b; Rahman et al., 2002). Además es importante a la hora de modelizar la operación de secado, ya que proporciona la fuerza impulsora para que tenga lugar la transferencia de materia durante dicha operación (Comaposada et al., 2000a).

Para temperaturas menores de 50°C y presiones de una atmósfera, el error que se produce al emplear la humedad relativa de equilibrio en lugar de actividad de agua es menor que el 0.20 %. Por ello, se considera que al hablar de actividad de agua estamos hablando de la humedad relativa de equilibrio (Jowitt et al., 1983). Por lo tanto, puede considerarse que la actividad de agua en los productos cárnicos equivale a la humedad relativa del aire en equilibrio con el producto. El conocimiento del estado de equilibrio termodinámico entre la humedad relativa del aire circundante y la humedad de la materia sólida es un requisito básico para modelar los procesos de secado, así como para cualquier situación de transferencia de materia. Además, los productos cárnicos curados se salan y secan, estabilizándose mediante el descenso de la actividad de agua (Comaposada et al., 2000b).

### **2.2.2. Métodos de medida de la actividad de agua**

La actividad de agua puede determinarse de acuerdo con tres principios básicos: gravimétrico, higrométrico o manométrico (Marinos-Kouris y Maroulis, 1995, McMinn y Magee, 1999).

- **Métodos gravimétricos**

Las muestras se colocan en condiciones de humedad y temperatura ambiente controladas hasta que la humedad de la muestra alcanza un valor de equilibrio. Para ello el peso de la muestra se determina periódicamente hasta pesada constante. La humedad del sólido es la de equilibrio con el aire a una determinada humedad relativa y temperatura. Los métodos gravimétricos se dividen a su vez en estáticos y dinámicos (McMinn y Magee, 1999; Lopes-Filho et al., 2002). En los primeros las muestras permanecen en un recipiente hermético cuya humedad relativa y temperatura están controladas, hasta que se alcanza el equilibrio. Una forma de controlar la humedad relativa sería colocando en el recipiente soluciones saturadas de diferentes sales. En los métodos dinámicos la muestra se coloca en una corriente forzada de aire que permanece a temperatura y humedad relativa constante, hasta que se alcanza el equilibrio. El peso de la muestra puede ser registrado de forma continua (métodos continuos) o discontinua (métodos discontinuos).

- **Métodos higrométricos y manométricos**

La muestra se coloca en un ambiente cerrado hasta que alcanza el equilibrio con el aire que la rodea. Entonces se determina la humedad relativa del aire en equilibrio con la muestra. Esta medida puede realizarse utilizando un higrómetro (que mediría la humedad del aire) o un manómetro (que mediría la presión de vapor). Estos métodos son los que más se han difundido por su rapidez y seguridad. Presentan la ventaja de que se puede realizar la determinación de la actividad de agua en poco tiempo y que su fiabilidad y reproducibilidad son muy altas. El principal inconveniente es que el coste de los equipos necesarios suele ser elevado.

## **INTRODUCCIÓN**

---

Además de los métodos anteriormente explicados, la medida también podría realizarse de manera indirecta, utilizando la variación de alguna propiedad fácilmente medible en alguna sustancia. Así, se puede considerar la variación del índice de refracción en algún polialcohol (Steele, 1987). Para ello se introduciría un polialcohol en el interior de un recipiente hermético en presencia de la muestra. Transcurrido un tiempo, el alimento, el polialcohol y el aire se encuentran en equilibrio. Entonces se extrae el polialcohol y se determina su contenido en humedad mediante la medida de su índice de refracción y las tablas que relacionan el índice de refracción con el contenido en humedad del polialcohol y la humedad del aire en equilibrio (Steele, 1987).

### **2.2.3. Isotermas de sorción**

Las características de sorción de los materiales alimentarios son esenciales para diseñar, modelizar y optimizar muchos procesos tales como el secado, la aireación y el almacenamiento de alimentos (Bala, 1997; Comaposada et al., 2000b; Trujillo et al, 2003).

Durante el secado de productos alimentarios se consumen enormes cantidades de energía y cualquier ahorro puede tener una gran importancia económica. Por ello, hay que establecer un balance entre el tiempo de secado y la estabilidad: poco tiempo implica alta humedad y por tanto baja estabilidad. Mucho tiempo supone baja humedad y alta estabilidad, pero mucho gasto energético. Además, las características de calidad sensorial dependen en gran medida del contenido en agua. El conocimiento de las isotermas 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). Esta información además se usa para calcular los cambios de humedad que puedan ocurrir durante el almacenamiento y la predicción de la vida útil, que consecuentemente condicionan los criterios de calidad de un producto alimentario (Adam et al., 2000; Hossain y Bala, 2000a; Rahman et al., 2002).

En las isotermas de sorción se refleja de manera global el efecto de todos los procesos mediante los cuales las moléculas de agua están combinadas reversiblemente con el alimento sólido. Estos procesos comprenden entre otros, la adsorción física, la condensación capilar o la formación de soluciones salinas. Los alimentos son sustancias que se encuentran en la naturaleza de forma compleja, principalmente son sistemas con muchos componentes y estructuras internas complicadas (Lewicki, 1998).

La isoterma de sorción del agua relaciona, a una temperatura constante, el contenido en humedad de equilibrio (kg agua/ kg materia seca) con la actividad del agua en el producto, en un intervalo dado de humedad o actividad (Lewicki, 1998; Comaposada et al., 2000b; Lopes-Filho et al., 2002).

Las isotermas de sorción pueden ser de adsorción o de desorción tal y como se muestra en la Figura 2.2.1.

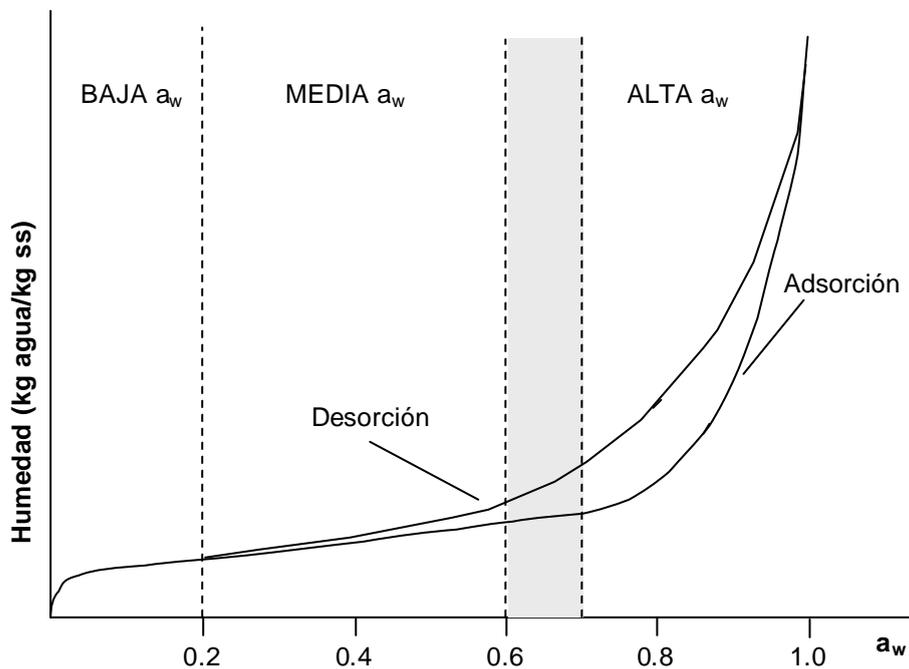


Figura 2.2.1. Isotermas de adsorción y de desorción. Fenómeno de histéresis.

## INTRODUCCIÓN

---

Si el producto alimentario se hidrata, se tendrá una isoterma de adsorción y la curva característica irá de valores bajos de actividad de agua y humedad a valores más altos; si por el contrario, el producto se va secando, irá perdiendo humedad y la movilidad del agua también irá disminuyendo. Entonces se obtendrá una isoterma de desorción con humedad y actividades de agua decrecientes

El fenómeno de histéresis se observa en la mayoría de los productos higroscópicos (Okos et al., 1992). Los principales factores que afectan a la histéresis son la composición del producto, el tiempo de almacenamiento, la temperatura de secado y el número de sucesivas adsorciones y desorciones (Tsami et al., 1990). En la bibliografía se encuentran trabajos en los que el fenómeno de histéresis se ha observado en diferentes productos agroalimentarios, por ejemplo, mora (Mascan y Göğüs, 1998), café tostado (Cepeda et al., 1999), plátano (Johnson y Brennan, 2000), chile (Hossain y Bala, 2000a y 2000b), pimienta (Kaymak-Ertekin y Sultanoglu, 2001).

El fenómeno de la histéresis ha sido también estudiado para la carne y productos cárnicos. Los resultados de estos estudios son contradictorios. Por ejemplo, Wolf et al. (1972) encontraron un efecto de histéresis en carne liofilizada, mostrando que la histéresis disminuye cuando se aumenta la temperatura. Lioutas et al. (1984), encontraron, para muestras que no contenían sal, isotermas de adsorción y desorción similares. Sin embargo, la adición de sal en las mezclas cárnicas conducía a acentuar la histéresis, que se incrementa al aumentar el contenido de ésta. Mujica et al. (1989) no encontraron ningún efecto de histéresis sobre las longanizas de cerdo y el jamón curado respectivamente. Otros autores encontraron el fenómeno de histéresis en productos cárnicos como el kilishi, un producto cárnico tradicional de Nigeria (Sopade et al., 1995). Payne y Wilson (1994) observaron el fenómeno de histéresis en extractos purificados de bacalao de la Antártida pero el fenómeno no fue observado en extractos de bacalao negro.

Según la forma de las isotermas de sorción, pueden distinguirse tres regiones en relación con el modo en que el agua se encuentra ligada a los alimentos (Motarjemi, 1988). Dichas regiones pueden observarse en la Figura 2.2.1.

- **Región de actividad de agua baja**

Corresponde a una actividad de agua hasta 0.2, aproximadamente. La mayor parte del agua está absorbida en forma de una o dos capas (región de la monocapa). En esta región el agua prácticamente no se congela incluso a bajas temperaturas (-40°C). El agua interacciona con la matriz alterando las propiedades de la monocapa. Su presión de vapor y movilidad se reducen casi por completo. Además, de esta forma se limita casi totalmente la disponibilidad del agua para reacciones químicas, con lo que se evita el crecimiento microbiano, aunque no la oxidación de lípidos.

- **Región de actividad de agua media**

Corresponde a una actividad de agua entre 0.2 hasta 0.6 – 0.7, aproximadamente. En esta región se adhieren nuevas moléculas de agua a la monocapa. La retención es intermedia a la retención del agua de monocapa y la del agua libre. La disponibilidad del agua es suficiente como para que las reacciones químicas y bioquímicas que precisan de ésta puedan desarrollarse.

- **Región de actividad de agua alta**

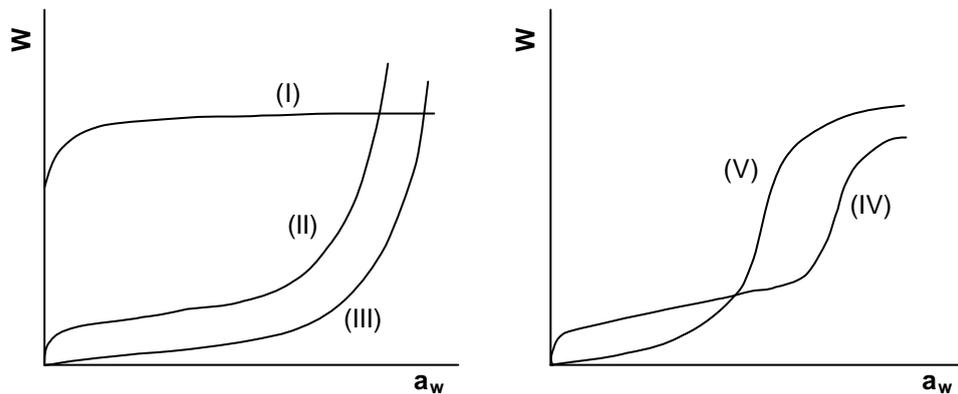
Corresponde aproximadamente a una actividad de agua superior a 0.7. El contenido en humedad es mayor y el agua está prácticamente libre. En esta región la pendiente de la isoterma es muy elevada, por lo que a pequeñas variaciones de actividad de agua corresponden variaciones considerables del contenido en humedad.

Brunauer et al. (1940) establecieron una clasificación de las isotermas, que se muestra en la Figura 2.2.2., de acuerdo con la cual, las curvas se clasifican en cinco tipos generales de isotermas (McMinn y Magee, 1997a). La isoterma tipo I corresponde normalmente a fenómenos de quimisorción que ocurren en una sola capa, en los puntos activos de la superficie. Este no es el caso habitual en las isotermas de adsorción de los alimentos. Los tipos II y III son los más frecuentes en alimentos no porosos, sobre todo el primero. Los tipos IV y V corresponden a isotermas de productos porosos, en los que la meseta de las curvas está asociada

## INTRODUCCIÓN

---

a la saturación capilar. Los alimentos muestran esencialmente dos tipos de isoterma de sorción, la típica forma sigmoidea de la mayoría de los alimentos (tipo II), y la que menos frecuentemente se puede ver es la que crece gradualmente (tipo III) (Lewicki, 1998).



**Figura 2.2.2.** Tipos de isothermas (Brunauer et al., 1940).

### 2.2.3.1 Modelización de las isothermas de sorción

Para describir las isothermas de sorción de los alimentos existen multitud de expresiones matemáticas de carácter teórico, semiempírico y empírico que modelizan las curvas de sorción. Sin embargo, ninguno de los modelos puede aplicarse para todo el rango de actividad de agua y para los distintos tipos de alimentos. Esto se debe principalmente a que la humedad de sorción de las isothermas de los alimentos representa las propiedades higroscópicas integradas de numerosos constituyentes, y la depresión de la actividad de agua se debe a la combinación de factores, cada uno de los cuales puede predominar en un determinado rango de actividad de agua. La temperatura es un parámetro que con frecuencia no es considerado de manera explícita en los modelos de las isothermas al considerarse estas a temperatura constante, sin embargo puede resultar de interés conocer el efecto de la temperatura en la isoterma de sorción, puesto que de esta manera se podría calcular el calor isostérico de sorción.

Las características de sorción de la carne pueden variar debido a la influencia de distintos factores. Uno de los factores incluido en la determinación de la forma de la curva es la temperatura. El efecto de la temperatura sobre la isoterma ha sido ampliamente estudiado y en general, para un valor de humedad dado, un incremento en la temperatura aumenta la actividad de agua (Diamante y Munro, 1990; Wang y Brennan, 1991; Okos et al. 1992; Kiranoudis et al., 1993; Comaposada et al., 2000a; Comaposada et al., 2000b; Delgado y Sun, 2002a). Otro de los factores que influye en las isotermas de sorción es el contenido en solutos. Comaposada et al (2000a y 2000b) observaron un salto de humedad en las isotermas de carne salada para una actividad de agua de alrededor de 0.75, valor que corresponde a disoluciones saturadas de cloruro sódico. A partir de ese valor de actividad de agua encontraron que para un valor determinado de  $a_w$  un aumento en el contenido en sal se correspondía con un aumento en el contenido de humedad para una misma actividad de agua.

Los modelos, representativos de las isotermas de sorción, relacionan la humedad del alimento con la humedad relativa de equilibrio del ambiente que rodea al mismo (Belghit et al., 1999). Entre los modelos matemáticos más utilizados están el modelo de GAB (Kiranoudis et al., 1993; Sánchez et al., 1997; Adam et al., 2000), el modelo de BET (Lewicki, 1998; Adam et al., 2000), el modelo de Halsey (García et al., 2000; Comaposada et al., 2000a), el modelo de Oswin (Hossain y Bala, 2000a; Clemente et al., 2001) y el modelo de Henderson (Hossain y Bala, 2000a; Kouhila et al., 2001).

A continuación se expondrán algunas de las ecuaciones propuestas en la bibliografía para la modelización de las isotermas de sorción.

El modelo de GAB (Guggenheim, Anderson y De Boer) es el modelo más utilizado para describir la sorción de los alimentos (Adam et al., 2000). Este modelo se representa en la Ecuación 2.2.2. Este modelo ha sido recomendado por el Grupo Europeo COST 90 sobre propiedades físicas de alimentos como una ecuación fundamental para caracterizar la sorción del agua en los alimentos (Timmermann et al., 2001).

## INTRODUCCIÓN

---

$$W_{i\text{calc}} = \frac{W_G C_G K_G a_w}{(1 - K_G a_w)(1 + (C_G - 1)K_G a_w)} \quad \text{Ec. 2.2.2.}$$

donde  $W_G$  es la humedad en la monocapa (kg agua/kg ss),  $C_G$  y  $K_G$  son las constantes características en el modelo de GAB. Además las constantes del modelo tienen un significado físico (Kiranoudis et al.,1993),

$$C_G = C_0 \exp\left(\frac{H_m - H_n}{\mathfrak{R} T}\right) \quad \text{Ec. 2.2.3.}$$

$$K_G = K_0 \exp\left(\frac{H_1 - H_n}{\mathfrak{R} T}\right) \quad \text{Ec. 2.2.4.}$$

donde  $H_m$  y  $H_n$  son los calores de sorción de la monocapa y multicapa de agua respectivamente (kJ/mol),  $H_1$  es el calor de condensación del vapor de agua a una temperatura dada (kJ/mol),  $\mathfrak{R}$  es la constante de los gases perfectos (kJ/kmol K) y  $T$  es la temperatura (K).

Motarjemi (1988) incluyó la influencia de la temperatura ( $T$ ) en el modelo de GAB:

$$W_G = A_G T + B_G \quad \text{Ec. 2.2.5.}$$

$$C_G = \exp\left(\frac{C_G'}{T} + D_G\right) \quad \text{Ec. 2.2.6.}$$

$$K_G = \exp(E_G T + F_G) \quad \text{Ec. 2.2.7.}$$

El modelo de BET (Brunauer, Emmet y Teller) es un modelo de sorción en multicapa que viene descrito en la Ecuación 2.2.8.:

$$W_{i\text{calc}} = \frac{W_B C_B a_w}{(1 - a_w)(1 + (C_B - 1)a_w)} \quad \text{Ec. 2.2.8.}$$

donde  $W_B$  es la humedad en la monocapa (kg agua/kg ss),  $C_B$  es la constante característica en el modelo de BET. La constante  $C_B$  se relaciona con el calor isostérico de sorción, tal y como se muestra en la Ecuación 2.2.9.

$$C_B = k_B \exp\left(\frac{Q^{st}}{R T}\right) \quad \text{Ec. 2.2.9.}$$

donde  $k_B$  es una constante que normalmente se asume que vale 1 y  $Q^{st}$  es el calor isostérico de sorción (kJ/kg).

El modelo de BET se ajusta bien para actividades de agua que no superen el valor de 0.5, y en la mayoría de los casos a actividades no superiores a 0.35 (Lewicki, 1998).

Según Motarjemi (1988), la influencia de la temperatura (T) en los parámetros del modelo de BET viene descrita en las Ecuaciones 2.2.10. y 2.2.11.

$$W_B = A_B \exp\left(\frac{B_B}{R T}\right) \quad \text{Ec. 2.2.10.}$$

$$C_B = C_{B'} \exp\left(\frac{D_B}{R T}\right) \quad \text{Ec. 2.2.11.}$$

La Ecuación 2.2.12. describe el modelo de Halsey modificado. El modelo semiempírico de Halsey modificado proporciona una expresión para la condensación en multicapas a una distancia relativamente alejada de la superficie (Adam et al., 2000).

$$W_{i\text{calc}} = (K_{H1} \ln(a_w))^{-1/K_{H2}} \quad \text{Ec. 2.2.12.}$$

siendo  $K_{H1}$  (kg agua/kg ss)<sup>K<sub>H2</sub></sup> y  $K_{H2}$  las constantes características en el modelo de Halsey modificado.

Según Motarjemi (1988), la influencia de la temperatura (T) en el modelo de Halsey modificado viene descrita en las Ecuaciones 2.2.13. y 2.2.14.

## INTRODUCCIÓN

---

$$K_{H1} = \frac{-1}{\exp\left(\frac{A_{H\text{mod}} T}{B_{H\text{mod}}}\right)} \quad \text{Ec. 2.2.13.}$$

$$K_{H2} = C_{H\text{mod}} \quad \text{Ec. 2.2.14.}$$

El modelo de Oswin es un modelo puramente empírico que viene descrito en la Ecuación 2.2.15.

$$W_{\text{icalc}} = K_{O2} \left( \frac{a_w}{(1-a_w)} \right)^{K_{O1}} \quad \text{Ec. 2.2.15.}$$

siendo  $K_{O1}$  y  $K_{O2}$  (kg agua/kg ss) las constantes características en el modelo de Oswin.

Bassal y Vasseur, (1992) incluyeron la influencia de la temperatura en el modelo de Oswin tal y como muestran las Ecuaciones 2.2.16. y 2.2.17.

$$K_{O1} = A_O T + B_O \quad \text{Ec. 2.2.16.}$$

$$K_{O2} = C_O T + D_O \quad \text{Ec. 2.2.17.}$$

El modelo empírico de Henderson, viene expresado en la Ecuación 2.2.18.,

$$W_{\text{icalc}} = \left( \frac{-1}{B_2 \ln(1-a_w)} \right)^{1/B_1} \quad \text{Ec. 2.2.18.}$$

donde  $B_1$  y  $B_2$  (kg ss/kg agua)<sup>B1</sup> son las constantes características en el modelo de Henderson.

Kouhila et al. (2001) incluyeron la influencia de la temperatura (T) en el modelo de Henderson tal y como se muestra en las Ecuaciones 2.2.19. y 2.2.20.

$$B_1 = A_H \quad \text{Ec. 2.2.19.}$$

$$B_2 = B_H(1.8T + 492) \quad \text{Ec. 2.2.20.}$$

A la hora de modelizar las isotermas de sorción, frecuentemente es necesario utilizar varios modelos, puesto que no todos describen igualmente bien diferentes partes de la curva. Además, cada uno de ellos proporciona información sobre diferentes aspectos del proceso de sorción. Por otro lado, la forma matemática de los modelos puede simplificar y/o imposibilitar cálculos posteriores en los que intervenga la isoterma de sorción. Por ello resulta interesante disponer del ajuste de varios modelos en cada caso particular.

#### **2.2.4. Calor isostérico de sorción**

La energía necesaria para desorber agua de un alimento es una medida de la fuerza con que esta es retenida. De este modo, el conocimiento de la energía ligada a la desorción de los distintos constituyentes de un alimento puede ser importante. En las operaciones de secado el agua se extrae, generalmente mediante calentamiento, para estabilizar el alimento debido al descenso de su actividad de agua. Por ello, como ya se indicó, las isotermas de equilibrio son importantes para el diseño de secaderos. Éstas ayudan a establecer los contenidos finales de humedad y calcular las necesidades energéticas (Mulet et al., 1999b). El cálculo de la energía que se consume durante el secado exige entre otros un conocimiento de la entalpía de sorción del agua para todo el rango de humedades.

El calor isostérico de sorción del agua se define como la energía que se necesita para desorber el agua de una matriz por unidad de masa liberada. Por ello, el calor isostérico de sorción es una medida de la energía o la vinculación intermolecular entre las moléculas de agua y las superficies adsorbentes. El contenido en humedad, para el que el calor de adsorción es casi igual al calor latente de vaporización del agua pura, es a menudo considerado como un indicador del contenido de agua libre (Wang y Brennan, 1991; Kiranoudis et al., 1993; McLaughlin y Magee, 1998; Mulet et al., 1999b; Mulet et al., 2002). Debe

## INTRODUCCIÓN

---

tenerse en consideración que, para bajos niveles de humedad en los alimentos, la energía necesaria para extraer el agua que contienen puede ser muy elevada.

De manera teórica, la predicción del calor de sorción no es posible debido a la complejidad, tanto física como química, de la estructura de los alimentos (McLaughlin y Magee, 1998). Para ello, habitualmente, se dispone de dos métodos que permiten aproximarse al calor isostérico de desorción. El primero se basa en la aplicación de la ecuación de Clausius-Clapeyron a diferentes temperaturas, mientras que el segundo método resulta de aplicar las técnicas calorimétricas y la ecuación de Riedel. Se observa una buena concordancia entre los resultados obtenidos por ambos métodos (Sánchez et al., 1997; Mulet et al., 1999b).

La aplicación de las técnicas calorimétricas y la ecuación de Riedel se basan en los análisis de termo-gravimetría y calorimetría diferencial de barrido (Mulet et al., 1999b). La calorimetría requiere una cuidadosa experimentación, ya que estas técnicas utilizan muestras pequeñas por lo que los errores experimentales pueden ser importantes. Por esta razón, es necesario realizar un número suficiente de repeticiones. Tal vez a causa de esto y puede que también debido al elevado coste del equipo necesario para llevarlas a cabo, las medidas calorimétricas del calor de sorción son menos comunes que las calculadas a partir de las isotermas de desorción aplicando la ecuación de Clausius-Clapeyron.

### 2.2.4.1. Determinación a partir de las isotermas de sorción

El método más habitual de determinación de los calores isostéricos de sorción es mediante el uso de la ecuación de Clausius-Clapeyron a diferentes temperaturas. El calor isostérico de sorción puede definirse como una propiedad molar parcial, derivada de la dependencia que tienen las isotermas respecto la temperatura según se describe en la Ecuación 2.2.21. (Mulet et al., 1999b):

$$\left( \frac{d(\ln P)}{dT} \right)_W = \frac{Q^{st}}{RT^2} \quad \text{Ec. 2.2.21.}$$

donde  $Q^{st}$  es el calor isostérico de sorción (kJ/kg),  $P$  es la presión parcial de vapor de agua en el equilibrio (Pa),  $W$  es el contenido de humedad (kg agua /kg ss),  $\mathfrak{R}$  es la constante de los gases perfectos (kJ/kmol K) y  $T$  es la temperatura absoluta (K).

La ecuación de Clausius-Clapeyron para el agua pura se define,

$$\left( \frac{d(\ln P_s)}{dT} \right)_W = \frac{L_r}{\mathfrak{R}T^2} \quad \text{Ec. 2.2.22.}$$

donde  $L_r$  (kJ/kg) es el calor latente de vaporización del agua pura a la temperatura de trabajo y  $P_s$  es la presión de saturación (Pa) a la temperatura  $T$ . Restando las Ecuaciones 2.2.21. y 2.2.22. se obtiene la Ecuación 2.2.23.

$$\left( \frac{d \left( \ln \left( \frac{P}{P_s} \right) \right)}{dT} \right)_W = \left( \frac{d(\ln a_w)}{dT} \right)_W = \frac{Q_n^{st}}{\mathfrak{R}T^2} \quad \text{Ec. 2.2.23.}$$

donde  $Q_n^{st}$  es el calor isostérico neto de sorción (kJ/kg).

Representando gráficamente las isotermas de sorción como  $\ln(a_w)$  frente a  $1/T$ , para ciertos valores de humedad fijados, el calor isostérico neto ( $Q_n^{st}$ ) puede obtenerse de la pendiente de las rectas representadas, que equivale a  $Q_n^{st}/\mathfrak{R}$ .

El calor isostérico neto ( $Q_n^{st}$ ) representa la diferencia entre el calor isostérico ( $Q^{st}$ ) y el calor latente de vaporización del agua pura ( $L_r$ (kJ/kg)). Es decir:

$$Q^{st} = Q_n^{st} + L_r \quad \text{Ec. 2.2.24.}$$

El calor isostérico neto puede también calcularse integrando la Ecuación 2.2.23., aplicando las medidas de las isotermas de sorción a dos temperaturas diferentes (Wang y Brennan, 1991):

$$Q_n^{st} = \mathfrak{R} \left[ \frac{T_1 T_2}{(T_2 - T_1)} \ln \left( \frac{a_{w2}}{a_{w1}} \right) \right] \quad \text{Ec. 2.2.25.}$$

El cálculo del calor isostérico neto mediante la Ecuación 2.2.25., con isotermas únicamente a dos temperaturas distintas, puede conducir a errores considerables puesto que las imprecisiones en la determinación experimental de las isotermas no se verían estadísticamente compensadas (Chirife e Iglesias, 1992).

En la bibliografía se encuentran trabajos en los cuales se determina el calor isostérico de distintos productos agroalimentarios a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron: pescado (Nozacki et al., 1993), patata (Sánchez et al, 1997), coliflor (Mulet et al., 1999b) carne de cerdo (Comaposada, 1999), carne de ternera y cerdo (Delgado y Sun, 2002a), carne de caimán (Lopes-Filho et al., 2002), carne de atún (Rahman et al., 2002), morchela (Mulet et al., 2002); coles de Bruselas (Irzyniec y Klimczak, 2003) etc.

#### 2.2.4.2. Determinación a partir de medidas calorimétricas

Mediante un equipo de calorimetría puede determinarse la variación entálpica producida por la evaporación del agua en un determinado producto y relacionarla con la pérdida de peso correspondiente a dicha evaporación. Para ello se considera que el endotermo característico se debe a la evaporación del agua y que la pérdida de peso también se debe a dicha evaporación. Para poder emplear los datos obtenidos de las medidas directas por calorimetría debe deducirse una ecuación que describa la influencia de la humedad de la muestra sobre  $Q^{st}$ .

La ecuación de Riedel puede describir adecuadamente la influencia de la temperatura sobre la actividad de agua (Mulet et al., 1999b).

$$\ln \left[ \frac{a_w(T_2)}{a_w(T_1)} \right]_W = A \exp(-bW) \left[ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right] \quad \text{Ec. 2.2.26.}$$

donde A y b son constantes características.

Combinando las Ecuaciones 2.2.23., 2.2.25. y 2.2.26. se obtiene una relación que indica la variación del calor isostérico con la humedad (Ecuación 2.2.27.),

$$Q^{st} = \beta \exp(-bW) + L_r \quad \text{Ec. 2.2.27.}$$

donde  $\beta = \Re \delta$  siendo  $\Re$  la constante de los gases perfectos y  $\delta$  una constante propia del producto.

La Ecuación 2.2.27. puede ser empleada en el ajuste de los datos experimentales tras las transformaciones apropiadas.

Se define la entalpía media acumulada ( $E_{ci}$ ) asociada a una humedad como la entalpía consumida por el producto para pasar (mediante calentamiento) de ese contenido en humedad hasta humedad cero, dividida por la pérdida de peso sufrida durante el calentamiento. Su expresión matemática viene definida por la Ecuación 2.2.28.

$$E_{ci} = \frac{\int_0^{W_i} Q^{st}(W) dW}{\int_0^{W_i} dW} \quad \text{Ec. 2.2.28.}$$

Así, el interés se centra en obtener la función  $Q^{st}(W)$  a partir de la determinación experimental de una serie de valores  $E_{ci}$  a diferentes  $W_i$ .

Sustituyendo la Ecuación 2.2.27. en la definición de entalpía media acumulada (Ecuación 2.2.28.) e integrando se obtiene:

$$E_{ci} = \frac{\beta}{b} \left( \frac{1 - e^{-bW_i}}{W_i} \right) + L_r \quad \text{Ec. 2.2.29.}$$

## **INTRODUCCIÓN**

---

Mediante ajuste de la Ecuación 2.2.29. a los datos experimentales obtenidos por calorimetría, se calculan los parámetros  $\beta$  y  $b$ , que al ser sustituidos en la Ecuación 2.2.27. proporcionan los valores del calor isostérico de sorción en función de la humedad del producto.

Este método de determinación del calor isostérico ha sido utilizado por algunos autores en productos agroalimentarios como patata (Boki et al., 1990; Sánchez et al., 1997) o coliflor (Mulet et al., 1999b).

### **2.3. Aspectos estructurales de los tejidos animales**

Los músculos son estructuras complejas que están formadas por varios elementos que interaccionan entre sí para formar una jerarquía estructural (Aguilera y Stanley, 1999). Según las características de sus células se pueden considerar dos grandes variedades de células musculares (Paniagua et al., 1998):

- **Músculo estriado**

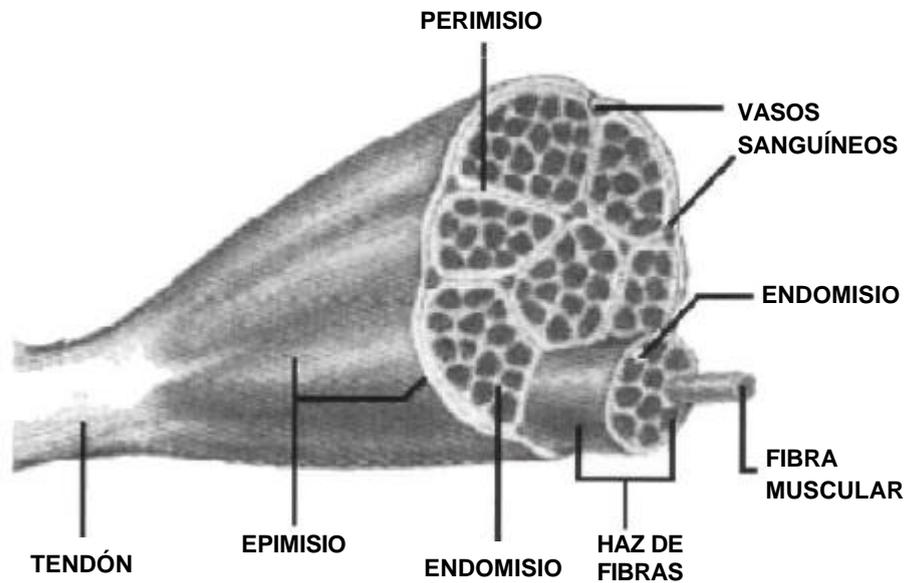
Bajo la denominación de músculo estriado se incluye un grupo heterogéneo de tejidos musculares que guardan una semejanza básica con el músculo esquelético de los vertebrados aunque difieren con éste y entre sí en diversos aspectos.

- **Músculo sin estriación típica**

Son células que carecen de estriación transversal y son de contracción lenta e involuntaria.

En los vertebrados, el músculo más abundante es el músculo estriado esquelético. Se inserta en los huesos para permitir el movimiento de las diversas partes del cuerpo y también en tejidos conjuntivos densos. En los mamíferos, los músculos esqueléticos están formados por agua (65 – 80%), proteína (16 – 22%), carbohidratos (1 – 2%), grasa (1 – 13%) y otras sustancias solubles (1%) (Renou et al., 2003).

La unidad fundamental del músculo esquelético es una célula muy especializada llamada célula muscular o fibra muscular. Las células del músculo o fibras tienen forma de hilo, son largas (1 – 40 mm), delgadas (10 – 100  $\mu\text{m}$ ) y aproximadamente cilíndricas (Forrest et al., 1979). En la Figura 2.3.1. se muestra la organización histológica del músculo esquelético.



**Figura 2.3.1.** Representación tridimensional del músculo esquelético (Renou et al., 2003).

Tal y como puede observarse, cada músculo esquelético está rodeado y protegido por una vaina de tejido conjuntivo denso que se denomina epimisio. Del epimisio parten tabiques hacia el interior del músculo, dividiendo el músculo en haces de fibras y grupos de haces. Todas estas ramificaciones constituyen el perimisio. Grupos pequeños de fibras musculares, envueltas cada una de ellas en su perimisio, van formando cada vez grupos mayores envueltos por una cubierta conjuntiva que también se denomina perimisio. Además, cada fibra muscular está recubierta por una delgada red de fibras reticulares que la separa de las células vecinas y que se denomina endomisio.

La presencia de las envolturas de tejido conjuntivo proporciona una adecuada cohesión a las fibras y grupos de ellas, integrando sus movimientos. Además, permite un cierto grado de independencia en la contracción de unos grupos de fibras respecto a otros. Por otro lado, constituyen el soporte de vasos sanguíneos y de los nervios necesarios para el mantenimiento del músculo y su actividad.

### 2.3.1. Composición química del músculo

La carne de cerdo es una excelente fuente de proteínas. Su calidad nutricional es elevada ya que su contenido graso no lo es. La composición del músculo magro, es decir, una vez liberado de la grasa que normalmente le acompaña, es relativamente constante en términos generales de proteína, grasa, minerales y contenido en agua. En la Tabla 2.3.1. se presenta la composición de algunas partes del cerdo y en la Tabla 2.3.2. la composición del músculo magro de cerdo.

**Tabla 2.3.1.** Composición de algunas piezas de cerdo (Belitz y Grosch, 1997).

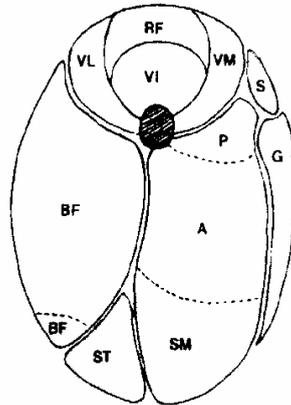
PIEZA	AGUA (%bh)	PROTEÍNAS (%bh)	GRASA (%bh)	CENIZAS (%bh)
Paleta	74.9	19.5	4.7	11
Lomo	75.3	21.1	2.4	1.2
Jamón	75.0	20.2	3.6	1.1
Panceta	40.0	11.2	48.2	0.6

**Tabla 2.3.2.** Composición del músculo magro (Pearson y Young, 1989).

COMPONENTE	RANGO (%)
Agua	70 a 78
Proteínas	15 a 22
Lípidos	1 a 13
Carbohidratos	1 a 2
Minerales	1 a 2
Extractos de nitrógeno no proteico	1.5 a 1.8
Vitaminas	< 1

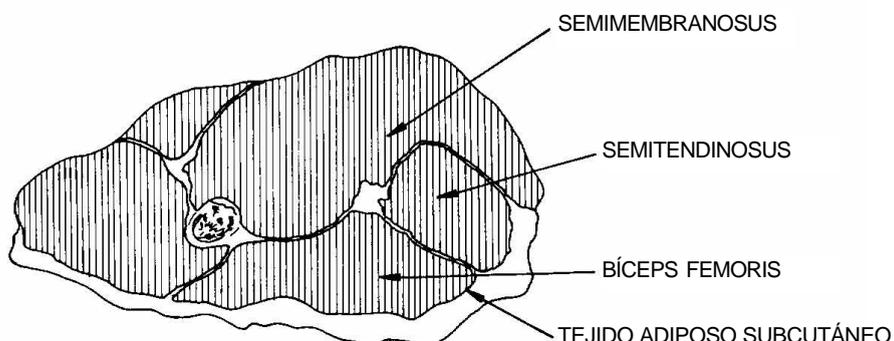
### 2.3.2. Estructura muscular

En la pierna del cerdo pueden distinguirse tres partes fundamentales: la parte ósea, la parte muscular y la piel. En la parte muscular se distinguen una serie de músculos bien definidos. En la cara anterior, *Vastus medialis* (VM), *Rectus femoris* (RF), *Vastus Intermedius* (VI), *Vastus lateralis* (VL). En la cara lateral externa *Bíceps femoris* (BF). En la cara lateral interna, *Sartorius* (S), *Gracilis* (G), *Pectineus* (P) y *Adductor* (A). Y en la cara posterior *Semitendinosus* (ST) y *Semimembranosus* (SM). Esta disposición puede observarse en la Figura 2.3.2. (Swatland, 1994).



**Figura 2.3.2.** Músculos del jamón (Swatland, 1994).

De todos estos músculos, los más importantes en peso del jamón son el *Semimembranosus*, el *Semitendinosus* y el *Bíceps femoris*. En la Figura 2.3.3. se muestra un corte transversal del jamón con estos músculos.



**Figura 2.3.3.** Corte transversal del jamón (Sayas, 1997).

Dado que el agua es el principal componente de la carne, la interacción entre las moléculas de ésta y el resto de macromoléculas que forma el músculo esquelético, determinará la capacidad de retención de agua de la carne (Renou et al., 2003). La capacidad de retención de agua es una de las propiedades funcionales de mayor interés para la industrialización de la carne. Puede definirse como el porcentaje de agua que queda retenida cuando la carne es sometida a fuerzas externas tales como las de corte, trituración, calentamiento o presión. Es la responsable de las pérdidas de peso en carne fresca, cocinada y procesada.

En cuanto a la capacidad de retención de agua de la carne, las carnes de tipo PSE (Pale, Soft and Exudative: pálida, blanda y exudativa) y DFD (Dark, Firm and Dry: oscura, firme y seca) son los casos extremos. En la bibliografía se describe además otro tipo de carne exudativa, cuyo color es normal, la carne tipo RSE (Red, Soft and Exudative: roja, blanda y exudativa). La carne de cerdo que se considera que tiene unas características de calidad ideal es la denominada RFN (Reddish pink, Firm and Non-exudative: rosácea-rojiza, firme y no exudativa) (Moya et al., 2001).

Los músculos se convierten en carne debido a que sufren una serie de procesos tanto bioquímicos como estructurales. Tras la muerte del animal se produce un descenso del pH hasta valores entre 5.4 y 5.8. Además, se somete al músculo a un enfriamiento hasta una temperatura de 7°C o inferior. Tanto el

## INTRODUCCIÓN

---

descenso del pH como de la temperatura influyen en la calidad final de la carne. Así, un rápido descenso del pH de la carne unido a un enfriamiento lento origina carnes PSE. Estas carnes poseen muy poca firmeza, sufren grandes pérdidas de peso al permanecer colgadas y pérdidas de exudado al ser descongeladas y favorecen la penetración de NaCl al interior del músculo (Gil et al., 1999).

En cerdos susceptibles al estrés, durante el proceso de sacrificio son liberadas ciertas hormonas, que inducen una elevada velocidad glicolítica del músculo. Los valores finales de pH se alcanzan entre 45 y 60 minutos después del sacrificio, mientras que la temperatura del músculo oscila entre 35 y 42°C. La aparición de carnes PSE está relacionada con ciertos cerdos que presentan un genotipo susceptible al estrés cuando son expuestos antes del sacrificio a fatiga o excitación por el transporte, cambios de temperatura etc. (Gisbert, 2001).

La aparición de carnes DFD se debe a la degradación o pérdida de glucógeno muscular antes del sacrificio por agotamiento físico del animal (Flores, 1987). El glucógeno intracelular almacenado es agotado antes del sacrificio y como consecuencia se reduce la formación de ácido láctico (Honikel, 1992). Estas carnes quedan con un pH elevado que facilita la proliferación microbiana. Contrariamente a lo que ocurre en la carne PSE, la carne DFD posee a los 45 minutos post-mortem un pH elevado, superior a 6, que favorece la proliferación microbiana. Por ello, la carne DFD no es adecuada para la fabricación de productos crudo-curados, especialmente en piezas grandes, en las que la sal se difunde más lentamente (Gisbert, 2001).

Es importante destacar que la calidad de la carne de cerdo es muy importante tanto para su consumo en fresco como para su posterior industrialización (Moya et al., 2001). Por lo tanto es fundamental conocer aquellas causas que alteran la calidad con el fin de poder actuar sobre ellas para mejorar su calidad. En resumen, se puede decir que la formación de carne PSE está directamente relacionada con las características genéticas de algunos cerdos susceptibles al estrés (Barton-Gade, 1988; O'Neill et al., 2003), mientras que la DFD suele ser debida a un inadecuado tratamiento de los animales antes del sacrificio (O'Neill et al, 2003).

### **2.3.3. El salado de la carne**

La obtención de productos crudo-curados se basa fundamentalmente en la adición de sal acompañada de un proceso de deshidratación. La sal actúa como conservante y además induce una serie de fenómenos físico-químicos y bioquímicos que contribuyen al desarrollo de las características organolépticas del producto final. La disolución de la sal en la superficie de la carne es un factor muy importante a la hora de regular su penetración hacia el interior de la misma. Por ello, durante el proceso de producción del jamón curado, la velocidad de penetración de la sal se ve favorecida en las carnes tipo PSE y reducida en las del tipo DFD (Gil et al., 1999).

A concentraciones elevadas, del orden de un 10%, la sal inhibe el crecimiento bacteriano debido principalmente a que disminuye la actividad de agua. A las concentraciones en las que se encuentra en productos como el jamón o el lomo (4 – 5%), el efecto inhibitor disminuye. Pero este efecto puede ser importante al inicio del proceso ya que puede encontrarse en concentraciones locales importantes. Por otro lado, la sal influye en el desarrollo del sabor y del aroma de este tipo de productos, ya que aumenta la solubilidad de las proteínas y la capacidad de retención de agua (Hernández et al., 1999).

Por lo tanto, la etapa de salado permite una estabilización de la carne por disminución de la actividad de agua en la superficie. Una vez que la sal ha penetrado a nivel superficial, difunde poco a poco al interior del producto. El salado se realiza a temperatura baja debido a que la carne tiene un elevado contenido en agua y la concentración salina en el interior de las piezas es baja. La temperatura baja evita la proliferación microbiana (Cárcel, 2003), importante durante el aumento de la concentración de sal en el músculo.

### **2.4. Aspectos de calidad relacionados con el secado**

Durante la transformación de la carne fresca en carne curada dos tipos de fenómenos tienen lugar: fenómenos que contribuyen a la estabilidad, como pérdida de agua o penetración de sal y fenómenos responsables de las características sensoriales de los productos, como reacciones químicas y bioquímicas, responsables de las características sensoriales de los productos. Ambos tipos de fenómenos están relacionados entre sí y son igualmente importantes en la elaboración de productos con la calidad adecuada (Mulet et al., 2004).

Las principales características sensoriales que definen el jamón curado son el aspecto, la textura y el flavor.

La textura es una característica sensorial que se detecta por los sentidos del tacto, la vista y el oído y que se manifiesta principalmente cuando el alimento sufre una deformación (Arnau, 2000). La textura depende tanto de la materia prima utilizada como del proceso de elaboración. Dentro de las características de la materia prima cabe destacar el contenido en grasa intramuscular (Virgili et al., 1998) y el pH (Guerrero et al., 1999). Con respecto al proceso de elaboración son importantes el contenido en sal (Arnau et al., 1998), la temperatura (Arnau et al., 1997) y la intensidad de secado (Arnau, 2000).

Las principales reacciones bioquímicas tienen lugar inmediatamente después del sacrificio del animal y son de tipo enzimático. Los enzimas responsables son principalmente endógenos, siendo los más importantes los responsables de la degradación de proteínas, grasas y fosfolípidos (Mulet et al., 2004). A lo largo del proceso de secado continúan los procesos de proteólisis por una lado y la pérdida de agua por otro, que acentúa los fenómenos de insolubilización proteica (Arnau, 2000).

Los enzimas necesitan un medio adecuado para actuar. Las condiciones que hay que tener en cuenta entre otras son el pH, el contenido en humedad y la temperatura. La actividad enzimática se ve favorecida por valores de pH bajos y actividad de agua elevada (Parolari et al., 1994; Virgili et al., 1995; Arnau et al., 1998). Por lo tanto, las condiciones a las que se lleve a cabo el proceso de secado

tendrán gran importancia en las características del producto final ya que influirán directamente en la actividad de los enzimas que contribuyen al desarrollo de las características organolépticas deseadas.

La temperatura a la que se lleva a cabo el proceso de elaboración también es muy importante ya que cuanto mayor es la temperatura, mayor es la actividad enzimática. Por ejemplo, durante la fabricación de jamón curado por el método tradicional, los cerdos son sacrificados a finales de otoño o a principios de invierno. Los jamones permanecen en el secadero hasta el siguiente otoño. Por lo tanto están sometidos a temperaturas de alrededor de 25 °C en el verano como mínimo durante un mes. Estas condiciones ambientales favorecen reacciones bioquímicas responsables del desarrollo de características sensoriales. Por ello en los procesos industriales se utilizan temperaturas superiores a 25 °C en alguna de las etapas de fabricación (Mulet et al., 2004).

Con respecto a los defectos texturales que hay que evitar en el jamón curado destacan la textura blanda y el encostrado. La textura blanda se produce, entre otras causas, por dificultades durante el proceso de secado. Si existe un exceso de grasa intramuscular e intermuscular o si el recubrimiento con manteca se efectúa muy pronto o con un espesor excesivo se dificulta la salida de agua (Arnau, 2000). En esos casos, el jamón alcanza valores de humedad superiores a los característicos, que originan una textura blanda del mismo. En cuanto al encostrado se produce por el uso de materia prima muy magra en la que el secado se produce muy rápidamente. En general, cuando la superficie del jamón se seca de forma rápida, la migración de agua desde el interior no es suficiente para compensar la deshidratación superficial y se produce una costra exterior, la cual dificulta la retracción del jamón. Esto puede provocar la formación de cavidades dentro del jamón (Arnau, 2000). Un pH elevado también favorece este defecto, ya que por un lado beneficia la formación de precipitados en superficie, los cuales contribuyen a la formación de una costra exterior reseca y por otro lado dificulta la migración de agua de dentro a fuera a causa del aumento de la capacidad de retención de agua que provoca (Comaposada, 1999).

### **2.5. Conclusiones**

A partir de la revisión bibliográfica realizada se pueden extraer algunas conclusiones:

- Dentro del proceso de elaboración del jamón curado, la etapa de secado es la más importante ya que no sólo es la de mayor duración y por lo tanto la que presenta un consumo energético más elevado, sino también por su gran influencia en la calidad del producto final. Por ello, una optimización del proceso pasa por una optimización de la etapa de secado.
- Para poder estudiar en profundidad el secado de alimentos es necesaria su modelización. El modelo más ampliamente utilizado para ello es el modelo difusivo, basado en la ley de Fick.
- Durante el secado por aire de alimentos, el agua pasa desde el interior del producto hasta el aire que lo rodea. Para ello debe vencer dos resistencias: la que presenta el producto a que el agua difunda desde su interior hasta su superficie y la resistencia a que el agua que está en la superficie del producto pase al aire que lo rodea. La resistencia global a la transferencia de materia será la suma de ambas, por lo que si una de ellas es muy inferior a la otra, puede considerarse despreciable. Para evitar el encostramiento es necesario controlar la importancia relativa de las resistencias involucradas.
- La actividad de agua de un alimento es un indicador tanto de su estabilidad como de su capacidad de deshidratación respecto al aire de secado. Por lo tanto, la isoterma de sorción es fundamental a la hora de modelizar el proceso de secado.
- En la bibliografía se encuentran algunos estudios sobre isotermas de sorción de carne y productos cárnicos. Estos estudios son escasos, por lo que se considera importante profundizar y evaluar los mismos.
- La difusividad efectiva es una propiedad de los alimentos independiente de las condiciones de operación a las cuales se lleve a cabo el proceso de deshidratación. Esta propiedad es inversamente

proporcional a la resistencia interna a la transferencia de materia. Dado que es importante el control de las resistencias, identificar el valor de la difusividad efectiva resulta necesario.

- Existen varios métodos para determinar la difusividad efectiva. En vista a emplearla en la optimización del proceso de secado, resulta conveniente identificarla a partir de cinéticas experimentales de deshidratación.
- En la bibliografía existen estudios en los que se ha determinado la difusividad efectiva de carne y otros productos cárnicos. Estos estudios no son abundantes por lo que se considera interesante profundizar más en ellos.
- Las propiedades físicas del aire y su velocidad así como la geometría del producto van a influir en la resistencia externa a la transferencia de materia.
- Durante el secado de alimentos, éstos experimentan una variación de volumen debido a la pérdida de agua que sufren. En muchas ocasiones este fenómeno no se tiene en cuenta debido a que complica la formulación y por lo tanto la resolución de los modelos de secado.
- Al modelizar la operación de secado deben realizarse una serie de simplificaciones. Por ello aspectos tales como la contracción o la importancia relativa de la resistencia externa a la transferencia de materia frente a la interna, pueden o no ser considerados.
- Según las características del modelo, condiciones iniciales y de contorno, el método matemático elegido para su resolución será diferente.
- En general, debe buscarse un compromiso entre la simplicidad del modelo y la exactitud con que describe los fenómenos que se están produciendo. Por ello es recomendable considerar diferentes modelos para describir una misma operación. De esta manera se pueden comparar los resultados obtenidos y decidir sobre la conveniencia o no de realizar simplificaciones en el estudio de la operación.



### **3. OBJETIVOS**



### **3. OBJETIVOS**

A partir de la bibliografía consultada se ha observado que la modelización de las cinéticas de secado presenta una elevada complejidad. Los alimentos durante su deshidratación sufren un proceso de contracción, es decir, su volumen disminuye al disminuir su contenido en humedad. La inclusión de la contracción en la modelización del secado dificulta la resolución de los modelos, por lo que es un aspecto que con frecuencia no se considera.

El secado de productos cárnicos suele llevarse a cabo en cámaras de secado donde la velocidad del aire es muy baja y la temperatura y humedad relativa están controladas. En estas cámaras puede considerarse prácticamente que el movimiento del aire tiene lugar en condiciones cercanas a la convección natural. Por lo tanto, otro factor a tener en cuenta en la modelización del secado de estos productos es la resistencia externa a la transferencia de materia. La inclusión de la misma en los modelos de secado representa una dificultad añadida para su formulación y resolución.

El objetivo principal del presente trabajo es determinar la influencia de la contracción y de la resistencia externa a la transferencia de materia durante la deshidratación de productos cárnicos. En concreto, el trabajo se centrará en los músculos del jamón de mayor importancia, *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

Este objetivo principal se aborda a partir de los siguientes objetivos particulares:

- Estudiar el equilibrio aire – agua – alimento. Para ello se obtendrán las isotermas de sorción de los músculos seleccionados. Una vez determinadas se ajustarán a modelos que puedan describirlas y se determinará la influencia de la temperatura sobre ellas. Además, se determinarán los calores isostéricos de sorción.
- Determinar las cinéticas de deshidratación para distintas geometrías y condiciones de secado.
- Determinar la función de contracción de las muestras durante el secado para las distintas condiciones utilizadas.

## OBJETIVOS

---

- Modelizar las cinéticas de deshidratación considerando y sin considerar la contracción y la resistencia externa a la transferencia de materia durante el proceso de secado. Al modelizar se identificará tanto la difusividad efectiva ( $D_e$ ) como el coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ).
- Determinar la influencia de las condiciones de secado (velocidad del aire y temperatura) en los valores identificados de la difusividad efectiva y/o del coeficiente de transferencia de materia.
- Determinar la influencia de la contracción y de la resistencia externa a la transferencia de materia en los valores identificados de  $D_e$  y  $k$ .

## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**



## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. Planificación experimental

A continuación se muestra el diagrama de flujo de las experiencias que se planificaron (Figura 4.1.1.) con el fin de facilitar la comprensión de la explicación de las mismas.

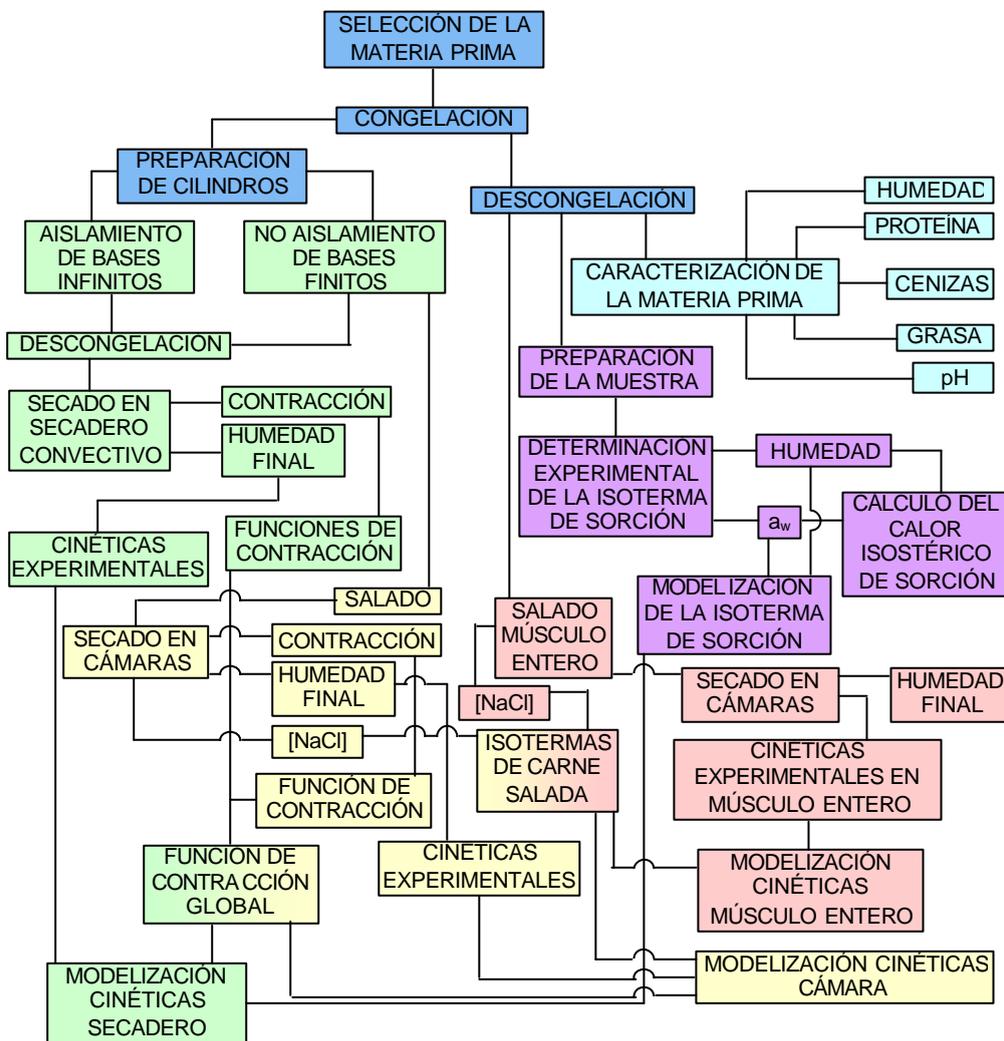


Figura 4.1.1. Diagrama de flujo de las experiencias realizadas.

#### **4.2. Materia prima**

Como materia prima se emplearon dos músculos representativos del jamón de cerdo: *Biceps femoris*, de la zona lateral del jamón, y *Semimembranosus*, de la zona exterior del mismo. Los jamones empleados se obtuvieron de un matadero local. En primer lugar se caracterizó la materia prima, determinándose su contenido en humedad, cenizas, grasa y proteína. Estas determinaciones se realizaron mediante los métodos oficiales de la AOAC nº 940.46 (1997) (contenido en humedad), nº 920.153 (1997) (contenido en cenizas), nº 991.36 (1997) (contenido en grasa) y nº 928.08 (1997) (contenido en proteína). Además se determinó el pH de la materia prima mediante un pH-metro portátil modelo 507 de la marca CRISON.

### **4.3. Determinación de las isotermas de sorción**

Para determinar las isotermas de sorción se obtuvieron pares de valores formados por la actividad de agua del músculo y el contenido de humedad correspondiente a dicha actividad de agua. Una vez obtenidos los puntos experimentales se procedió a la modelización de las isotermas de sorción.

#### **4.3.1. Preparación de la muestra**

Los músculos objeto del estudio fueron separados del jamón y posteriormente troceados. Cada uno de los trozos se envolvió en film plástico y se mantuvo congelado a una temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Las muestras se congelaron con el fin de realizar el máximo número de experiencias con la misma pieza de carne.

Con objeto de evitar la influencia de la congelación y conservación de la materia prima en los resultados posteriores, se buscó la máxima uniformidad en la preparación de las muestras. Para ello, la descongelación se realizó siempre a una temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$  para que ésta fuera lenta y uniforme. La carne se mantuvo a esta temperatura hasta la preparación de la muestra propiamente dicha.

A la carne descongelada y conservada a  $12^{\circ}\text{C}$  se le eliminó la grasa superficial. Después se trituroó en una picadora Molinex modelo D56. La carne triturada se extendió finamente sobre papel de aluminio con el fin de conseguir un secado lo más uniforme posible (Figura 4.3.1.). La carne fue extendida sobre porciones de papel de 6 x 8 cm aproximadamente, realizándose 12 muestras en cada preparación.



**Figura 4.3.1.** Carne finamente extendida sobre papel de aluminio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

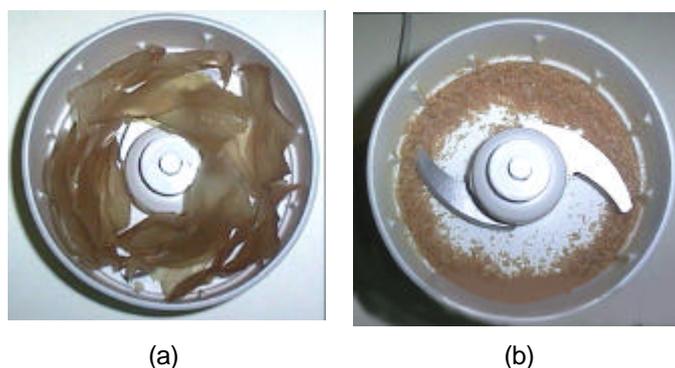
---

Las doce muestras de cada preparación fueron introducidas dentro de recipientes herméticos de cristal que contenían gel de sílice (3-6 mm). El tiempo de permanencia en la atmósfera de sílica gel de las muestras de carne fue diferente para cada preparación, con el fin de obtener un amplio rango de humedades. En la Figura 4.3.2. se muestra el proceso de secado descrito anteriormente, (a) al comienzo y (b) al final.



**Figura 4.3.2.** Muestra de carne al comienzo (a) y al final (b) del proceso de secado.

Con objeto de obtener valores bajos de actividad de agua y humedad, algunas preparaciones se sometieron a un proceso de secado más largo. Para que éste fuera uniforme, tras aproximadamente 9 horas, se homogeneizaron las 12 muestras (Figura 4.3.3.) de la preparación, nuevamente se dispusieron las muestras sobre papel de aluminio y se volvieron a colocar en recipientes herméticos en presencia de sílica gel.



**Figura 4.3.3.** Homogeneización de las muestras. Antes de picar (a) y después (b).

Finalizado el período de secado correspondiente, las 12 muestras de cada preparación, se extrajeron de los recipientes herméticos y se homogeneizaron para obtener una sola muestra, a la cual, posteriormente, se le determinó por triplicado su actividad de agua y su contenido en humedad.

La carne seca se introdujo en unas células de medida de actividad de agua. Éstas se sellaron y se colocaron dentro de un desecador con silica gel con el fin de evitar cualquier pérdida o ganancia de humedad. Las muestras se conservaron en una cámara de refrigeración a 4°C entre 0 y 36 horas, hasta el momento de la determinación de la actividad de agua y de la humedad.

#### **4.3.2. Determinación de la actividad de agua**

La medida de la actividad de agua se realizó a 4 temperaturas (25, 30, 35 y 40°C) con un total de tres repeticiones por cada muestra, tomándose como valor de actividad de agua la media de las tres repeticiones. Para realizar las medidas se usaron tres higrómetros eléctricos (Novasina, dos modelo TH200 y uno modelo AW SPRINT TH500). Estos higrómetros miden la humedad relativa del aire a partir de la variación de la conductividad de un sensor de cloruro de litio.

En primer lugar se procedió a la calibración de los equipos de medida. Para ello se utilizaron las sales patrón que se presentan en la Tabla 4.3.1. Estas sales fueron proporcionadas con el equipo de medida y sus características vienen indicadas en el manual de empleo del equipo Novasina (modelo AW SPRINT TH500). El calibrado se realizó a una temperatura de 25°C.

**Tabla 4.3.1.** Características de las sales de calibración de los equipos Novasina.

SAL	COLOR DE CONTROL	VALORES DE HUMEDAD (%)			
		15°C	20°C	25°C	30°C
LiCl	Blanco	11.3	11.3	11.3	11.3
MgCl <sub>4</sub>	Azul	33.3	33.1	32.8	32.4
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>4</sub>	Verde	55.9	54.4	52.9	51.4
NaCl	Violeta	75.6	75.5	75.3	75.1
BaCl <sub>2</sub>	Blanco	90.9	90.5	90.1	89.9
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>9</sub>	Naranja		98.2	98.0	98.0

Cada uno de los equipos utilizados disponía de una cámara de medida y un regulador de temperatura que, conjuntamente formaban una cámara de climatización. A su vez, el cabezal de medida estaba equipado con un sensor de medida de la temperatura y humedad en equilibrio de las muestras. Un convertidor transformaba las señales del sensor y los valores medidos de la humedad relativa en equilibrio (actividad de agua) y temperatura, leyéndose directamente en una pantalla. El equipo estaba conectado a un ordenador, y gracias a un software se podía visualizar la evolución de la actividad de agua con el tiempo tal y como se muestra en la Figura 4.3.4.



**Figura 4.3.4.** Equipos de medida de  $a_w$  conectados a un ordenador.

Las características técnicas de los equipos de medida de actividad de agua Novasina se muestran a continuación:

- Regulación de la temperatura entre 0 y 50°C
- Variación de regulación máxima: 0.2°C
- Gama de medida de humedad:
  - 0.06 - 1.00  $a_w$ , modelo AW SPRINT TH500
  - 0.05 - 1.00  $a_w$ , modelo TH200
- Precisión:  $\pm 0.01a_w$ ;  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ , modelo AW SPRINT TH500  
 $\pm 0.01a_w$ ;  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , modelo TH200
- Repetibilidad:  $\pm 0.002 a_w$ , modelo AW SPRINT TH500  
 $\pm 0.005 a_w$ , modelo TH200
- Interface: RS232, Código ASCII, 9600 baudios

#### **4.3.3. Determinación de la humedad**

Con el fin de determinar la humedad, una vez obtenida la actividad de agua, se homogeneizaron las muestras de carne. Se realizaron un total de tres repeticiones por cada muestra, considerándose como contenido en humedad la media de las tres repeticiones. La humedad se determinó siguiendo las directrices del método oficial de la AOAC nº 950.46 (1997) para la determinación de humedades de productos cárnicos.

#### **4.3.4. Modelización de las isotermas de sorción**

Con el fin de determinar si las isotermas experimentales a 25, 30, 35 y 40°C eran estadísticamente diferentes, se compararon los resultados experimentales de actividad de agua a una humedad determinada a las distintas temperaturas. Para ello se calcularon los intervalos LSD con un nivel de confianza del 95%, mediante el programa Statgraphics plus 5.1.

Una vez analizadas estadísticamente las isotermas experimentales, se procedió a su ajuste mediante la utilización de varios modelos matemáticos, con

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

objeto de determinar los parámetros característicos de los mismos. Para la modelización matemática de las isothermas de sorción se utilizaron cinco modelos. Dos de los modelos utilizados fueron empíricos, el modelo de Oswin (Ecuaciones 2.2.15., 2.2.16., 2.2.17.) y el modelo de Henderson (Ecuaciones 2.2.18., 2.2.19., 2.2.20.). Otro modelo utilizado fue uno semiempírico, el modelo de Halsey modificado (Ecuaciones 2.2.12., 2.2.13., 2.2.14.). Por último se utilizaron dos modelos teóricos, el modelo de GAB (Ecuaciones 2.2.2., 2.2.5., 2.2.6., 2.2.7.) y el modelo de BET (Ecuaciones 2.2.8., 2.2.10., 2.2.11.). En todos los casos, a modelización se realizó incluyendo y no incluyendo el efecto de la temperatura en los parámetros de los modelos.

Para ajustar cada modelo se formuló un problema de optimización, en el que las variables decisorias fueron los parámetros de los modelos y la función objetivo el promedio de los residuos cuadráticos relativos (Ecuación 4.3.1.). La resolución del problema de optimización se llevó a cabo utilizando la herramienta SOLVER de la hoja de cálculo EXCEL 2000.

$$\text{FUNCIÓN OBJETIVO} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{W_{i\text{exp}} - W_{i\text{calc}}}{W_{i\text{exp}}} \right)^2}{N} \quad \text{Ec. 4.3.1.}$$

Con el fin de evaluar la bondad de cada ajuste, se procedió a calcular el coeficiente de determinación múltiple o porcentaje total de varianza explicada (% var) calculado tal y como se describe en las Ecuaciones 4.3.2., 4.3.3. y 4.3.4. (Rinaman et al., 1996).

$$\% \text{ var} = \left( 1 - \frac{S_{yx}^2}{S_y^2} \right) \times 100 \quad \text{Ec. 4.3.2.}$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (W_{iexp} - \bar{W}_{exp})^2}{N-1} \quad \text{Ec. 4.3.3.}$$

$$S_{yx}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (W_{iexp} - W_{icalc})^2}{(N-1-1)} \quad \text{Ec. 4.3.4.}$$

La bondad del ajuste también se evaluó mediante el error medio relativo (EMR) (Ecuación 4.3.5.):

$$\text{EMR (\%)} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \text{abs} \frac{(W_{iexp} - W_{icalc})}{W_{iexp}} \quad \text{Ec. 4.3.5.}$$

#### 4.3.5. Isoterma de sorción de carne salada

Dado lo laborioso de la determinación completa de las isotermas de sorción y puesto que se comprobó previamente una buena concordancia para algunos casos, se decidió utilizar resultados de la bibliografía. Así pues, la isoterma de sorción de carne salada no se determinó experimentalmente sino que se utilizó la obtenida por Comaposada et al. (2000a) para el músculo *Gluteus medius*. Con el fin de comprobar que los resultados obtenidos por estos autores eran válidos para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*, se diseñó una serie de experimentos de secado de carne salada. Para ello se secaron cilindros salados de los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus* a distintas temperaturas durante tiempos variables. En la Tabla 4.3.2. se muestra el diseño experimental. La experimentación se llevó a cabo en cámaras de temperatura y humedad relativa controlada (apartado 4.4.3.1.5.).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Tabla 4.3.2.** Diseño de experimentos para la comprobación de las isotermas obtenidas por Comaposada et al. (2000a) para carne salada de cerdo.

MUESTRA	MÚSCULO	t salado (min)	T secado (°C)	t secado (min)
BF_3_3_15_1	<i>Bíceps femoris</i>	17	15	6722
BF_3_3_15_2	<i>Bíceps femoris</i>	17	15	15306
BF_3_2_5_1	<i>Bíceps femoris</i>	14	5	15306
BF_3_2_5_2	<i>Bíceps femoris</i>	14	5	6722
SM_3_3_15_1	<i>Semimembranosus</i>	17	15	15306
SM_3_3_15_2	<i>Semimembranosus</i>	17	15	6722
SM_3_3_5_3	<i>Semimembranosus</i>	17	5	6722
SM_3_3_5_2	<i>Semimembranosus</i>	17	5	15306

Una vez finalizado el proceso de secado, se determinó por triplicado a las muestras la actividad de agua (apartado 4.3.2.), la humedad final (apartado 4.3.3.) y el contenido en sal (apartado 4.4.1.2.), tomándose como valor de estos parámetros la media de las tres medidas.

### **4.3.6. Determinación del calor isostérico de sorción**

Para la determinación del calor isostérico de sorción se aplicó la ecuación de Clausius-Clayperon (Ecuación 2.2.23.) a las isotermas de sorción experimentales a las diferentes temperaturas.

$$\left( \frac{d(\ln a_w)}{dT} \right)_W = \frac{Q_n^{st}}{RT^2} \quad \text{Ec. 2.2.23.}$$

A partir de los valores experimentales de actividad de agua a las distintas temperaturas para un mismo contenido en humedad, se representó el  $\ln(a_w)$  frente a  $1/T$  ( $K^{-1}$ ), calculándose los valores de las pendientes ( $-Q_n^{st}/R$ ) de las rectas que se obtuvieron. Con el valor de estas pendientes se determinó el calor isostérico neto. Finalmente el calor isostérico de sorción ( $Q^{st}$ ) se obtuvo sumándole al calor isostérico neto ( $Q_n^{st}$ ) el calor latente de vaporización del agua pura ( $L_v$ ).

#### **4.4. Experiencias de secado**

Para poder analizar las cinéticas de deshidratación a distintas condiciones de secado y para diferentes geometrías, en primer lugar se realizaron experiencias en un secadero convectivo para el producto estudiado con geometría cilíndrica finita e infinita. Después se realizaron experiencias de secado a baja temperatura de muestras cilíndricas saladas. Por último se determinó la cinética de deshidratación a 5 y 15°C de músculos enteros (*Bíceps femoris* y *Semimembranosus*) salados.

##### **4.4.1. Técnicas experimentales**

###### **4.4.1.1. Medida de la humedad**

Las humedades finales de las muestras deshidratadas se determinaron tal y como se ha descrito en el apartado 4.3.3. La humedad inicial se calculó a partir de la humedad inicial y de la pérdida de peso.

###### **4.4.1.2. Medida de la concentración de sal**

La medida de la concentración de sal final en las muestras saladas y secadas a baja temperatura se realizó midiendo la concentración de cloruro sódico en extractos obtenidos de las mismas. Para ello, las muestras una vez secas se trituraron con un picadora Moulinex modelo D56. Se tomaron aproximadamente 0.5 gramos de muestra a los cuales se les añadieron 100 mL de agua destilada en un vaso de vidrio. Posteriormente, la mezcla se homogeneizó durante cinco minutos con un ultraturrax modelo T25 (Kika-Werne, GMBH&CO-KG, Staufen, Alemania) a 11500 r.p.m. Tras el homogeneizado, la muestra se filtró con un embudo y papel de filtro, con lo que se obtuvo un extracto, al cual se le determinó el contenido en iones cloruro. Para esta determinación se utilizó un analizador de cloruros Ciba Corning (Halstead, Essex C09 2DX, Inglaterra) modelo 925. La medida consiste en hacer pasar una corriente de iones plata, generada por dos electrodos de plata que están inmersos en un tampón ácido (105 g/L CH<sub>3</sub>COOH, 9

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

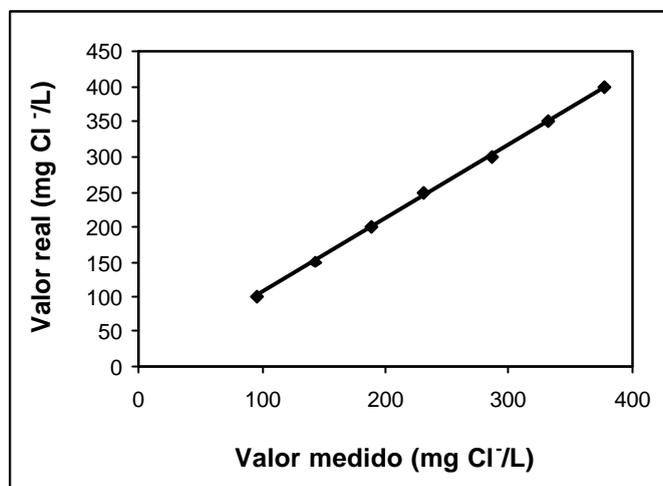
g/L HNO<sub>3</sub>, agente para suspensión y anticoagulante). Para realizar las medidas se añadieron 500 µL de extracto al tampón ácido. Tanto éste como el extracto se mantuvieron a una temperatura de entre 2 y 5°C. Al añadir el extracto, que contiene iones cloruro, éstos precipitan con los iones plata, formando cloruro de plata. Cuando todos los iones cloruro han precipitado, empiezan a aparecer iones plata, con lo que cambia la conductividad de la disolución. Este cambio es detectado por un sensor, apareciendo en la pantalla del equipo la concentración de iones cloruro en mg Cl<sup>-</sup>/L.

De cada una de las muestras se realizaron tres extractos y de cada uno de ellos se realizaron una serie de medidas hasta conseguir tres medidas que no difiriesen entre sí más de 3 mg Cl<sup>-</sup>/L. Se consideró como contenido en iones del extracto la media de las tres medidas así obtenidas. Este valor se transformó para ser expresado en gramos de cloruro sódico por 100 gramos de muestra.

A continuación se detallan las características más importantes del equipo:

- Dimensiones: 315x200x250 mm
- Rango de medida: 10 – 999 mg Cl<sup>-</sup>/L
- Reproducibilidad: ± 3 mg/L
- Linealidad: ± 3 mg/L
- Condiciones de trabajo: 10 – 35°C

Previamente a la toma de medidas en los extractos con el analizador de cloruros Ciba Corning, se procedió a su calibración. Para ello se prepararon una serie de disoluciones patrón de 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 mg Cl<sup>-</sup>/L utilizando NaCl deshidratado durante 2 horas a 110°C (método oficial de la AOAC nº 980.25, 1997) y agua destilada. El contenido en iones cloruro de las disoluciones patrón se determinó tal y como se ha explicado anteriormente. Correlacionando los valores reales con los medidos por el equipo se obtuvo la recta de calibrado del equipo, que se representa en la Figura 4.4.1. y en la Ecuación 4.4.1.



**Figura 4.4.1.** Recta de calibrado del analizador de cloruros Ciba Corning modelo 925.

$$\text{Valor real} = 1.06 \cdot \text{Valor medido} + 0.46; R^2 = 0.9995$$

Ec. 4.4.1.

Mediante la recta de calibrado a partir de los valores volumétricos medidos en los extractos de carne se obtuvieron los valores reales correspondientes.

#### **4.4.2. Experiencias en secadero convectivo**

Las cinéticas de deshidratación en secadero convectivo se realizaron para muestras de geometría cilíndrica finita e infinita, obtenidas tal y como se indica a continuación. Se usaron condiciones suaves del aire de secado con el fin de evitar el encostramiento de las muestras. El equipo utilizado fue un secadero convectivo a escala de laboratorio.

##### **4.4.2.1. Secadero convectivo**

Para determinar las cinéticas de deshidratación de cilindros de carne se utilizó un secadero convectivo a escala de laboratorio descrito por Bon et al., (1994). Es un secadero directo por convección forzada, con control de temperatura

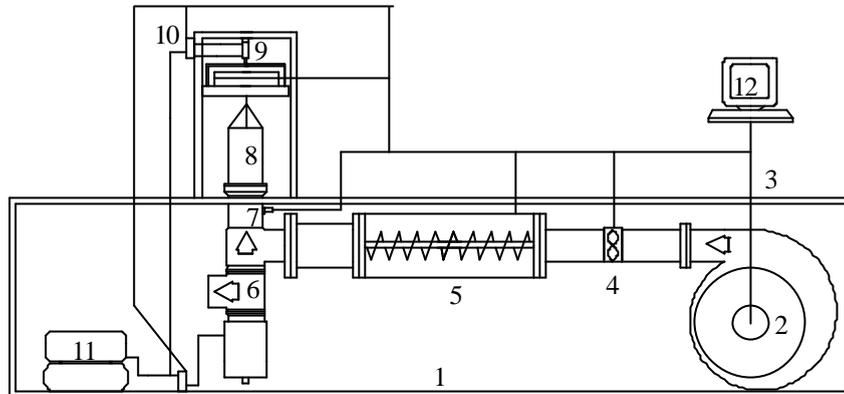
## MATERIALES Y MÉTODOS

---

y velocidad del aire de secado, que permite que el aire circule atravesando el lecho de partículas. Las partes del equipo se describen a continuación:

- **Sistema de ventilación.** Está compuesto por un soplante de 0.9 kW que impulsa el aire de secado que circula a través del lecho. La velocidad del aire de secado es regulada por un variador de velocidad Ohmrom Sysdrive 3GSV Inverter y se mide con un anemómetro digital Panasonic Inverter DV-551 (precisión  $\pm 0.1$  m/s) localizado en el conducto del aire.
- **Sistema de calefacción.** Para calentar el aire, el secadero tiene una resistencia de 3000 W de potencia (en 220 Voltios). Dicha resistencia está gobernada por un controlador automático de temperatura conectado a un ordenador mediante una salida repetida proporcional.
- **Portamuestras.** Para colocar la muestra el equipo dispone de una canastilla metálica acoplada en la conducción de salida de aire. El diámetro del portamuestras es de 10 cm y su base inferior es de malla de luz  $1 \text{ mm}^2$ . Para realizar las pesadas se utiliza un sistema automatizado de adquisición de datos a través de una balanza Mettler PM2000 conectada al ordenador Samtron General PC. Con el fin de obtener pesadas estables, cada vez que se realiza una pesada una válvula de tres pasos desvía la corriente de aire.

El control del secadero se realizó mediante un programa en Visual Basic 6.0. Éste permite introducir y controlar los valores consigna del secadero (velocidad y temperatura del aire e intervalo entre pesadas) así como el registro del peso de la muestra y de las condiciones de secado. El equipo descrito anteriormente se esquematiza en la Figura 4.4.2.



**Figura 4.4.2.** Secadero a escala de laboratorio. 1. Soporte; 2. Soplante; 3. Control de flujo; 4. Anemómetro; 5. Elemento calefactor; 6. Válvula Neumática; 7. Sensor de temperatura (pt-100); 8. Portamuestras; 9. Balanza de pesada rápida; 10. Elevador; 11. Compresor de aire; 12. Ordenador

#### 4.4.2.2. Preparación de la muestra

A continuación se describe la obtención de las muestras cilíndricas deshidratadas en el secadero convectivo.

##### 4.4.2.2.1. Cilindros infinitos

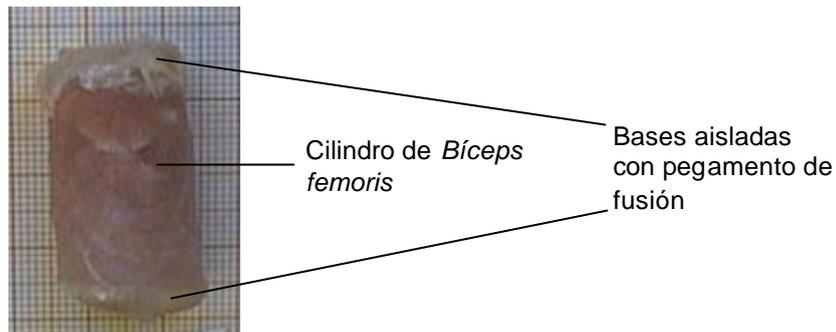
El secado de cilindros infinitos sólo se realizó con muestras obtenidas del músculo *Bíceps femoris*. A partir del músculo congelado se obtuvieron cilindros de aproximadamente 2, 3 y 4 cm de diámetro en sentido perpendicular a las fibras del músculo. Para obtener los cilindros se utilizaron 3 coronas Starret de 22, 33 y 43 mm de diámetro interno acopladas a un taladro Bosch modelo CSB 1000-2RET, de 1010 W de potencia.

Con el fin de conseguir que la pérdida de agua durante el proceso de secado sólo tuviese lugar en sentido radial (comportamiento de cilindro infinito) se aislaron las bases de los cilindros. Para ello primero se cauterizaron poniéndolas en contacto con una plancha de metal incandescente, tras lo cual se cubrieron con

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

un pegamento de fusión. En la Figura 4.4.3., se muestra el resultado de la preparación de la muestra.



**Figura 4.4.3.** Cilindro "infinito" preparado para secar.

Las muestras así preparadas, sin descongelar, se introdujeron de nuevo en el congelador hasta su utilización.

### **4.4.2.2.2. Cilindros finitos**

Las experiencias de secado de cilindros de geometría finita se realizaron con cilindros de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*. Al igual que en el caso de geometría infinita se obtuvieron los cilindros a partir de los músculos congelados mediante una base Starret acoplada a un taladro Bosch modelo CSB 1000-2RET, de 1010 W de potencia. Los cilindros se obtuvieron en sentido perpendicular a las fibras del músculo y sus dimensiones fueron aproximadamente 2 cm de diámetro y 3 cm de altura.

### **4.4.2.3. Cinéticas de secado**

Con el fin de evitar posibles interferencias del proceso de descongelación de las muestras, todas se descongelaron controladamente de la misma manera, en cámara de temperatura controlada a  $12 \pm 1$  °C, temperatura a la que permanecieron durante 12 horas aproximadamente, hasta que comenzó el proceso de secado.

A la hora de determinar las condiciones de secado de los cilindros hay que tener en cuenta que la carne es un producto que se encostra con mucha facilidad durante su deshidratación. Por lo tanto se eligieron condiciones de secado suaves: temperatura de 25°C y velocidad del aire de 0.6, 2 y 2.8 m/s. El aire se hizo circular de modo perpendicular al eje longitudinal de los cilindros. El proceso de secado se prolongó hasta pérdida de peso del 30%. Para cada una de las condiciones de secado y para cada tamaño se realizaron dos repeticiones en el caso de geometría infinita y tres en el caso de geometría finita.

Previo al secado, y con el fin de garantizar que éste tenía lugar a una temperatura constante, se realizó un atemperado de las muestras. Para ello las muestras envueltas en un film plástico se colocaron en el secadero a las condiciones de secado durante un tiempo variable, según su diámetro, tal y como se muestra en la Tabla 4.4.1. De esta manera se garantizó que las muestras alcanzaban la temperatura uniforme del aire de secado sin perder agua.

**Tabla 4.4.1.** Tiempo de atemperado en función del diámetro de la muestra.

DIAMETRO DE LA MUESTRA (cm)	TIEMPO DE ATEMPERADO (min)
2	20
3	30
4	40

#### 4.4.2.4. Determinación de la contracción

Con el fin de determinar la contracción de las muestras durante el proceso de secado, se tomaron varias medidas. En el caso de cilindros finitos, se determinaron las dimensiones al principio y al final de la deshidratación de las muestras. En cambio, en el caso de cilindros infinitos, sus dimensiones fueron determinadas varias veces a lo largo del proceso.

### **4.4.2.4.1. Contracción de cilindros finitos**

Durante la deshidratación de cilindros finitos no se realizó un seguimiento de la variación de volumen a lo largo del proceso de secado, sino que únicamente se determinaron las dimensiones iniciales y finales. El volumen inicial y final de cada uno de los cilindros estudiados se determinó a partir de tres métodos de medida: medida directa con un pie de rey, análisis de imagen e inmersión en un fluido. Estos tres métodos se describen a continuación.

#### **a) Medida directa con pie de rey**

De cada uno de los cilindros de carne se determinó por triplicado la altura y el diámetro con un pie de rey. A partir de estas medidas y considerando como diámetro y como altura de un cilindro la media de las medidas obtenidas mediante el calibre, se calculó el volumen de la muestra.

#### **b) Análisis de imagen**

Al inicio y al final del proceso de secado se tomaron cuatro fotografías, en distintas posiciones, de los cilindros. Para ello se utilizó una cámara digital (Canon PS 1001) acoplada a una base KAISER. En cada una de las fotografías se midieron seis diámetros y cinco alturas, tomándose como diámetro y como altura la media de todas las medidas obtenidas. Las medidas se tomaron con el programa ADOBE PHOTOSHOP 5.5. En la Figura 4.4.4. se muestra una imagen de la toma de medidas de uno de los cilindros estudiados.

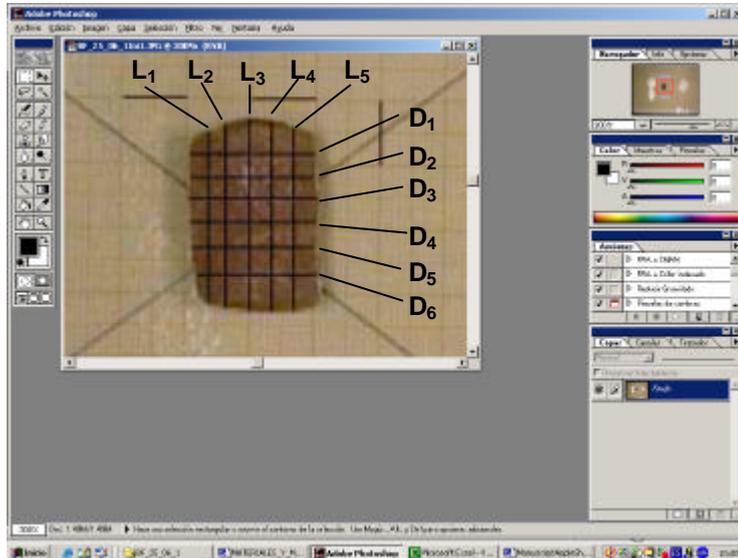


Figura 4.4.4. Toma de medidas con el programa ADOBE PHOTOSHOP 5.5.

**c) Inmersión en un fluido**

Al inicio y al final del proceso de secado, se determinó el volumen de los cilindros por inmersión de los mismos en aceite de oliva. El método consistió en pesar las muestras sin sumergir y sumergidas en aceite de oliva. El hecho de que el peso señalado por la balanza cuando las muestras se introdujeron en el aceite es el resultado de la diferencia de las fuerzas que actuaban sobre ellas en ese momento (Figura 4.4.5.), permitió deducir la fórmula para el cálculo del volumen.

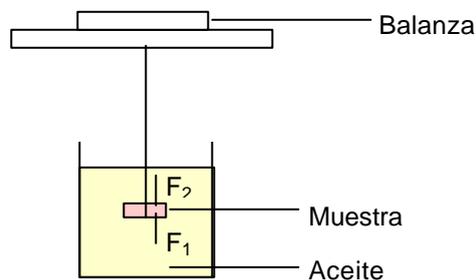


Figura 4.4.5. Esquema de la medida del volumen de la muestra por inmersión en aceite.

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

El volumen de las muestras se determinó a partir de la Ecuación 4.4.2., siendo  $V$  el volumen de la muestra ( $m^3$ ),  $m$  la masa de la muestra (kg),  $P_b$  el peso registrado por la balanza durante la inmersión de la muestra (kg) y  $\rho_a$  la densidad del aceite ( $kg/m^3$ )

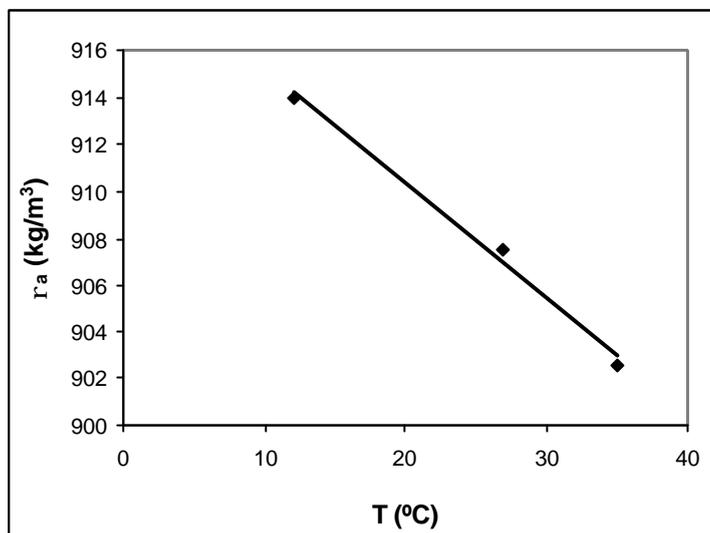
$$V = (m - P_b)/\rho_a \quad \text{Ec. 4.4.2.}$$

El aceite empleado para realizar las medidas fue aceite de oliva de 0.4° de acidez. Su densidad se determinó utilizando picnómetros de líquido, a partir del volumen de los picnómetros y de la masa de aceite que éstos pueden contener. Las medidas se realizaron por triplicado a tres temperaturas diferentes, 12, 27 y 35°C. Se eligieron estas temperaturas porque abarcaban el rango dentro del cual iban a realizarse las medidas de volumen. Como medida de la densidad a una temperatura se tomó la media de las tres medidas realizadas.

Los resultados obtenidos para la densidad del aceite utilizado en las medidas de contracción, se muestran en la Tabla 4.4.2. A partir de estas medidas se ajustó el valor de la densidad del aceite frente a la temperatura (°C) a una recta para el rango de temperaturas estudiado (Figura 4.4.6., Ecuación 4.4.3.).

**Tabla 4.4.2.** Resultados de la determinación de la densidad del aceite.

TEMPERATURA (°C)	$r_a$ ( $kg/m^3$ )
12	$913.9 \pm 0.6$
27	$907.6 \pm 0.7$
35	$902.5 \pm 0.5$



**Figura 4.4.6.** Representación de la densidad del aceite en función de su temperatura.

$$\rho_a = -0.49 \cdot T + 920.04$$

Ec. 4.4.3.

Con el fin de evitar una contaminación por aceite en las muestras que dificultara el proceso de secado, antes de la medida del volumen inicial, las muestras se envolvieron con film plástico. Se procuró que la envoltura de film fuese lo más homogénea y fina posible. De este modo se consideró despreciable el volumen del film frente al volumen de la muestra. Una vez realizada la medida del volumen inicial, el film plástico se retiró con sumo cuidado, para evitar que el aceite contaminase la muestra.

Para la toma de la medida del volumen final, la muestra no se envolvió en film, pues al haber sufrido deformaciones, esta operación se veía muy dificultada. Por ello, tras ser introducida en aceite el tiempo mínimo indispensable para tomar la medida, se extrajo y se eliminaron rápidamente los restos de aceite con alcohol, con el fin de utilizar la muestra para otras medidas.

### **4.4.2.4.2. Contracción de cilindros infinitos**

Con objeto de determinar la evolución del diámetro de los cilindros durante el proceso de secado, se tomaron fotografías de los mismos durante la determinación de las cinéticas de deshidratación cada cierto tiempo. Para ello se utilizó una base KAISER con una cámara digital acoplada (Canon PS 1001). Las fotografías se realizaron sobre un papel milimetrado lo que permitió posteriormente tomar medidas en las fotografías.

Para cada uno de los tiempos se tomaron 2 fotografías y en cada fotografía se midieron 6 diámetros. Se tomó como diámetro a un tiempo determinado la media de esas doce medidas

### **4.4.3. Secado en cámaras a baja temperatura**

Dado que durante el proceso de elaboración del jamón curado, los jamones son deshidratados en cámaras de secado a temperatura y humedad relativa controlada y velocidad de aire prácticamente nula, se determinaron también cinéticas de deshidratación en condiciones análogas.

#### **4.4.3.1. Cinéticas de cilindros**

##### **4.4.3.1.1. Obtención de cilindros**

A partir de los músculos congelados *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*, se obtuvieron cilindros en sentido perpendicular a las fibras del músculo. La obtención se realizó con la ayuda de tres coronas Starret de 22, 33 y 43 mm de diámetro interno acopladas a un taladro Bosch modelo CSB 1000-2RET, de 1010 W de potencia, por lo que se obtuvieron cilindros de aproximadamente 2, 3 y 4 cm de diámetro. Se consideraron dos alturas para los cilindros, 2 y 3 cm. En total se obtuvieron 6 tamaños (por triplicado) para cada músculo y condición de secado, por lo que se analizaron un total de 144 muestras. Los cilindros así obtenidos se mantuvieron congelados hasta el momento de su utilización.

Dado que los jamones curados tienen un contenido en sal final entre el 3 y el 9% (Arnau et al., 1995), las muestras se salaron hasta alcanzar inicialmente un

contenido aproximado de sal del 3%. Para ello se utilizó una salmuera saturada de NaCl. Pero antes del salado fue necesario calcular la difusividad de la sal durante el proceso con el fin de determinar el tiempo de salado necesario para que las muestras alcanzasen el contenido en sal predeterminado. Este porcentaje se vio incrementado durante la deshidratación debido a la pérdida de agua.

#### **4.4.3.1.2. Determinación de la difusividad de sal**

Con objeto de determinar la difusividad de sal en las muestras de carne se realizaron experiencias de salado durante tiempo variable. Para ello, en primer lugar se preparó una salmuera saturada de NaCl que se mantuvo a 2°C, temperatura a la cual se realizaron las experiencias de salado.

Se obtuvieron cilindros del músculo *Bíceps femoris* tal y como se explica en el apartado 4.4.2.2.2. Los cilindros obtenidos, de 2 cm de diámetro aproximadamente y altura aproximada 3 cm, se introdujeron en la salmuera saturada durante distintos tiempos comprendidos entre 600 y 900 segundos. Gisbert (1999) realizó experiencias de salado durante 900 segundos en cilindros de lomo de cerdo de 2.5 cm de diámetro y 5 cm de altura, alcanzándose concentraciones de alrededor del 9% de sal. Por ello y dado que las dimensiones de los cilindros fueron menores, se consideraron tiempos de salado inferiores. El salado de las muestras se realizó en el interior de una cámara de refrigeración a temperatura controlada de 2°C, con el fin de garantizar el mantenimiento de dicha temperatura durante el proceso. Una vez saladas, las muestras se introdujeron 5 segundos en agua destilada para eliminar el exceso de sal de su superficie y se envolvieron en film plástico, para evitar pérdidas de humedad, manteniéndose a 2°C durante 48 horas con el fin de garantizar una distribución relativamente homogénea de la sal en toda la muestra. Este tiempo fue determinado a partir del análisis de perfiles de sal en experiencias preliminares. Transcurrido este tiempo, se determinó el contenido en sal de cada una de las muestras, tal y como se expone en el apartado 4.4.1.2.

El transporte de sal desde la salmuera hasta el interior de la muestra de carne se consideró que tenía lugar principalmente por difusión. Por ello el análisis

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

de los datos experimentales, tiempo de salado – ganancia de sal, se realizó en términos de la ley de Fick. La ecuación de gobierno que modeliza la variación del contenido en sal con el tiempo en un cilindro finito se muestra a continuación (Ecuación 4.4.4.):

$$\frac{\partial C_s(x,r,t)}{\partial t} = D_s \left( \frac{\partial^2 C_s(x,r,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_s(x,r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_s(x,r,t)}{\partial r} \right) \quad \text{Ec. 4.4.4.}$$

Para resolver estas ecuaciones diferenciales se tuvieron en cuenta una serie de hipótesis, algunas de las cuales condicionaban las condiciones de contorno y la condición inicial:

- La muestra se encontraba inicialmente libre de sal,  $C_s(x,r,0) = C_0 = 0$  kg NaCl/kg muestra.
- La geometría de la muestra permaneció constante durante el tiempo de salado.
- La muestra era isótropa y homogénea.
- El contenido en sal en la superficie de la muestra estaba en equilibrio con la salmuera:

$$\text{en una lámina infinita: } t > 0 \rightarrow C_s(L,r,t) = C_{se} \quad \text{Ec. 4.4.5.}$$

$$\text{en un cilindro infinito: } t > 0 \rightarrow C_s(x,R,t) = C_{se} \quad \text{Ec. 4.4.6.}$$

- Se asumió la condición de simetría del sistema respecto a cada uno de los ejes de coordenadas:

$$\frac{\partial C_s(0,r,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{Ec. 4.4.7.}$$

$$\frac{\partial C_s(x,0,t)}{\partial r} = 0 \quad \text{Ec. 4.4.8.}$$

La resolución de este modelo, admitiendo las hipótesis enumeradas anteriormente, se llevó a cabo analíticamente mediante el Método de Separación de Variables, para lo cual, los contenidos en sal se expresaron de forma adimensional (Anejo 10.2.). Por lo tanto, la expresión para calcular la concentración media de sal, suponiendo que la resistencia interna a la transferencia de sal es mucho mayor que la resistencia externa, viene dada por la Ecuación 4.4.9.

$$\Psi_s(t) = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-D_s \lambda_n^2 t}}{(\lambda_n L)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_s \beta_n^2 t}}{(\beta_n R)^2} \quad \text{Ec. 4.4.9.}$$

El valor de la concentración de sal en el equilibrio,  $C_{se}$  (kg NaCl/kg muestra), se determinó utilizando el modelo empírico de Peleg (Peleg, 1988).

Para determinar el valor de la difusividad de la sal,  $D_s$  ( $m^2/s$ ), se utilizó la herramienta SOLVER de la hoja de cálculo Excel 2000. Con ella se minimizó la suma de las diferencias al cuadrado entre el contenido en sal experimental y el calculado por el modelo. La función objetivo viene expresada por la Ecuación 4.4.11. y la variable decisoria fue el valor de la difusividad de la sal. La bondad del ajuste se determinó a partir del porcentaje de varianza explicada (Ecuación 4.3.2., 4.4.12. y 4.4.13.).

$$FO = \sum_{i=1}^N (C_{s\text{exp}} - C_{s\text{calc}})^2 \quad \text{Ec. 4.4.10.}$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{s\text{exp}} - \overline{C_{s\text{exp}}})^2}{N - 1} \quad \text{Ec. 4.4.11.}$$

$$S_{yx}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{si \text{ exp}} - C_{si \text{ calc}})^2}{(N - 1 - 1)} \quad \text{Ec. 4.4.12.}$$

#### **4.4.3.1.3. Determinación del tiempo de salado**

A partir del valor obtenido de difusividad de la sal se puede proceder a determinar el tiempo de salado necesario para alcanzar un contenido en sal final de las muestras alrededor del 3%, que es el deseado. Para ello se utilizó la Herramienta “Buscar objetivo” de la hoja de cálculo Microsoft Excel 2000. El tiempo se calculó para obtener un contenido medio en sal del 3% tras la operación. A partir de las experiencias descritas en el apartado 4.4.3.1.2. se calcularon los tiempos de salado para alcanzar las condiciones deseadas.

#### **4.4.3.1.4. Salado de las muestras**

Los cilindros congelados se descongelaron a una temperatura controlada de 12°C. Una vez descongelados se introdujeron en la cámara de 2°C durante 12 horas para su atemperado previo al proceso de salado.

El salado de las muestras se realizó en una salmuera saturada de NaCl. La salmuera fue preparada el día anterior con NaCl y agua destilada. Una vez preparada se introdujo en la cámara de 2°C para que se atemperase. Al igual que en el salado de muestras utilizadas para determinar la difusividad de sal, el salado se realizó en el interior de la cámara de 2°C con el fin de garantizar una temperatura constante durante todo el proceso, tras lo cual las muestras se introdujeron en agua destilada durante 5 segundos para eliminar el exceso de salmuera adherida en su superficie. Después, las muestras se envolvieron en film plástico y se mantuvieron a 2°C durante 48 horas. Estas condiciones fueron determinadas a partir de los resultados obtenidos en experiencias preliminares. De esta forma se consiguió que el contenido en sal fuera homogéneo en toda la muestra manteniendo constante el contenido en humedad.

#### 4.4.3.1.5. Cámaras de secado

Para cada temperatura y cada músculo se estudiaron 6 tamaños diferentes, cada uno de ellos por triplicado. Por lo tanto, para cada temperatura se determinó la cinética de 36 cilindros. Las muestras se codificaron con un código compuesto por dos letras (BF para muestras obtenidas del músculo *Bíceps femoris* y SM para las obtenidas del músculo *Semimembranosus*) y tres números, el primero indicaba el diámetro, el segundo la altura y el tercero el número de repetición. Por ejemplo, la muestra BF\_2\_3\_3 correspondió a la tercera repetición de un cilindro del músculo *Bíceps femoris* de 2 cm de diámetro y 3 cm de altura.

En la Figura 4.4.7. se esquematiza la cámara de secado utilizada en las experiencias de deshidratación de carne salada. Con el fin de evitar confusiones y sus errores asociados, los cilindros del músculo *Bíceps femoris* se colocaron en un nivel de la cámara y los del músculo *Semimembranosus* en otro nivel. Todos los cilindros se colocaron con su eje paralelo a la base de la cámara y se secaron hasta una pérdida de peso de entre el 30 y el 40%. Se eligió esta pérdida de peso para conseguir una humedad final entre el 28 y el 60%, que es la que tienen los jamones curados (Arnau et al., 1995).

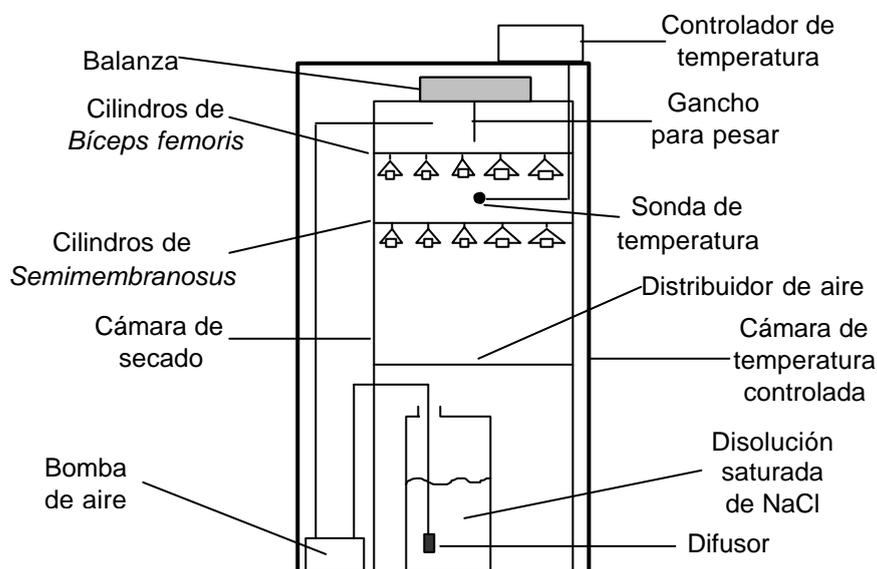
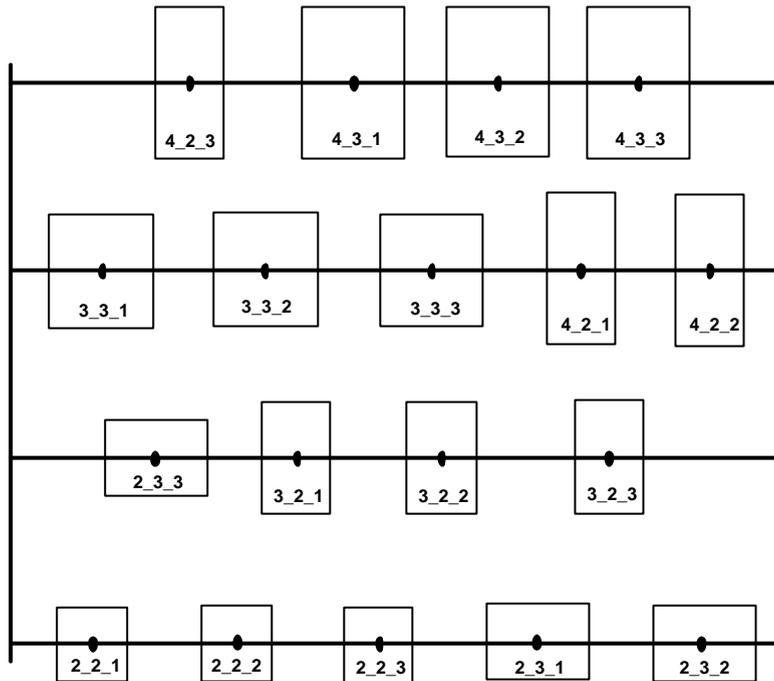


Figura 4.4.7. Esquema de la cámara de secado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

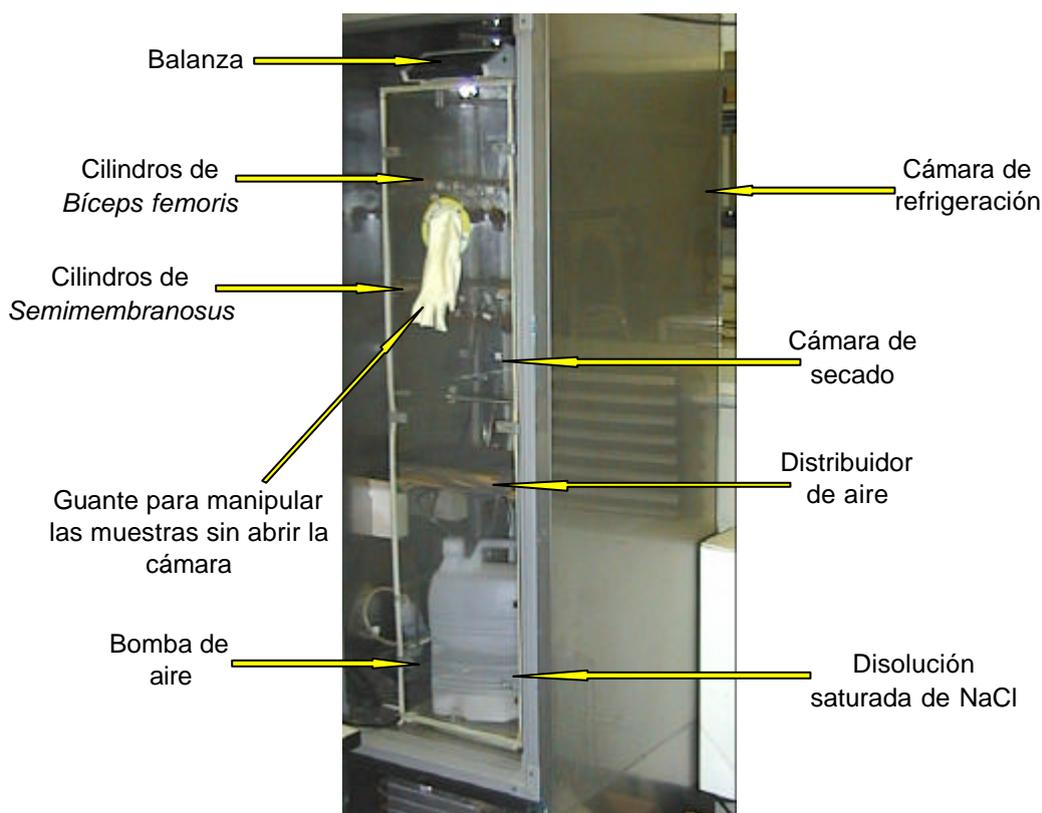
La disposición de los cilindros en cada uno de los niveles se realizó al tresbolillo en función de su tamaño, con el fin de evitar posibles influencias de la posición, tal y como se muestra en la Figura 4.4.8.



**Figura 4.4.8.** Disposición de las muestras en las cámaras de secado.

La humedad relativa en el interior de la cámara de secado se controló mediante una disolución saturada de NaCl. Para ello se hizo burbujear a través de un difusor aire en la misma mediante una bomba de aire. La medida de la humedad relativa en el interior de la cámara se realizó a partir del índice de refracción de glicerol introducido dentro de ella, tal y como describió Steele (1987). Las medidas de la humedad relativa del aire se realizaron en distintos puntos de la cámara y en diferentes momentos del proceso de secado. Se obtuvo un valor de la humedad relativa del aire del  $84.88 \pm 1.54$  %, que se puede considerar representativa del estado estacionario. El control de la temperatura se realizó mediante un controlador TOHO TM19 y una sonda de temperatura pt100.

Transcurridas las 48 horas en las que las muestras envueltas en film plástico permanecieron a 2°C con el fin de homogeneizar el contenido en sal, éstas se introdujeron en las cámaras de secado durante 12 horas con el fin de que se atemperasen y que el proceso de secado tuviese lugar a una temperatura constante. Transcurrido este tiempo, las muestras fueron liberadas de su envoltura y se procedió a la higienización de las mismas. Al tratarse de una deshidratación a baja temperatura y por ello de larga duración, se intentó evitar la contaminación de las muestras por mohos, ya que probablemente el efecto conservador de la sal no fuera suficiente. Para ello se quemó azufre, aproximadamente 0.02 g/L, en el interior de la cámara justo al inicio del secado. Durante éste, la pesada se realizó mediante un gancho colgado de la parte inferior de la balanza e introducido en la cámara. En la Figura 4.4.9. se muestra una fotografía del montaje descrito anteriormente.



**Figura 4.4.9.** Fotografía del montaje de las cámaras de secado de carne salada.

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

Con el objetivo de conseguir que las condiciones de secado se mantuviesen lo más uniformes posible a lo largo del proceso, se evitó abrir la cámara para realizar las pesadas. Por ello se perforó la puerta y se insertó un guante de látex en el orificio, de manera que las muestras se pudiesen pesar colgándolas del gancho conectado a la balanza sin necesidad de abrir la cámara de secado, tal y como se muestra en la Figura 4.4.10.



**Figura 4.4.10.** Pesada de las muestras cilíndricas de *Biceps femoris* y *Semimembranosus*.

### 4.4.3.1.6. Cinéticas de secado

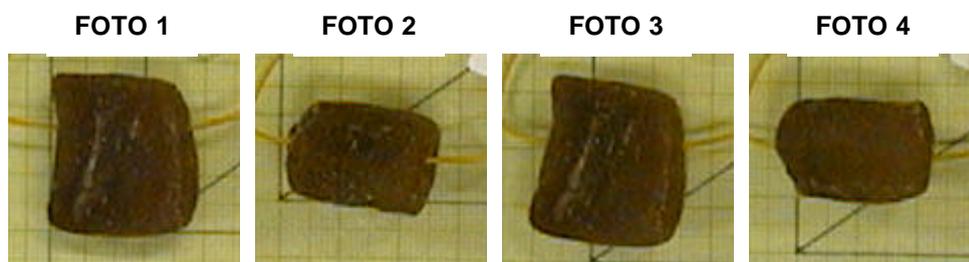
Las cinéticas de secado se determinaron a una humedad relativa del aire en torno al 85% y a cuatro temperaturas, 5, 10, 15 y 20°C. El aire de secado se mantuvo en reposo. La velocidad del aire fue siempre inferior a  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s, siendo

esta velocidad la máxima que se obtenía al renovar el aire de la cámara para controlar la humedad relativa. En otro caso existía convección natural.

El peso de las muestras fue medido diariamente. La humedad final de las mismas así como el contenido en sal final se determinó tal y como se explica en los apartados 4.4.1.1. y 4.4.1.2. respectivamente. A partir de la humedad final y del peso fue estimada la humedad correspondiente en el tiempo de pesada.

#### **4.4.3.1.7. Determinación de la contracción**

Para determinar la contracción se tomaron fotografías de las muestras en distintos momentos del proceso de secado, las cuales se analizaron con el programa ADOBE PHOTOSHOP 5.5. En cada momento se tomaron cuatro fotografías en distintas posiciones, ya que debido a la fuerza de la gravedad los cilindros se achataban con el tiempo (Figura 4.4.11.). En cada fotografía se midieron seis diámetros y seis alturas, por lo que el diámetro y la altura de cada momento se determinó a partir de la media de las 24 medidas tomadas para cada tiempo. El volumen se calculó a partir del radio y de la altura calculada para cada tiempo.



**Figura 4.4.11.** Fotos de la muestra BF\_3\_3\_20 al final del secado.

Para no romper las condiciones de secado establecidas en la cámara, se procuró abrirla lo menos posible durante el proceso de deshidratación. Dado que se estudiaron distintos tamaños de muestra, la duración del proceso hasta una misma pérdida de peso fue variable. Por ello, hubo que abrir la cámara para extraer las muestras que ya habían alcanzado la pérdida de peso preestablecida.

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

Entonces, se aprovechó para realizar fotografías de las muestras que todavía no se habían deshidratado completamente. Además, todas las muestras fueron fotografiadas al inicio y al final del proceso de secado.

A partir del radio y del volumen inicial de todas las muestras se calculó un radio y un volumen inicial medio. La función de contracción considerada fue de tipo lineal, ajustándose al contenido en humedad los cocientes  $R/R_0$  y  $V/V_0$ , siendo  $R_0$  y  $V_0$  el radio y el volumen medio inicial considerado respectivamente.

### 4.4.3.2. Cinéticas de músculo entero

Además de las experiencias realizadas en cilindros de carne salada, también se obtuvieron las cinéticas de deshidratación en cámaras de temperatura y humedad relativa controlada, de músculos enteros (*Biceps femoris* y *Semimembranosus*) salados. Para ello se planificaron experiencias a dos temperaturas, 5 y 15 °C. A continuación se expone el procedimiento seguido.

#### 4.4.3.2.1. Preparación de las muestras

Los músculos enteros fueron separados de la pierna de cerdo y se congelaron a una temperatura de -20°C. La carne fue descongelada a una temperatura de 12°C durante 48 horas.

Las muestras fueron saladas en una salmuera saturada de NaCl a 2°C previamente a su deshidratación. Para determinar el tiempo de salado necesario para conseguir que las muestras alcanzasen un 3% de sal se consideró que se comportaba como una lámina infinita. Por ello a partir de los valores de la difusividad de la sal y teniendo en cuenta las condiciones de contorno análogas a las descritas en el apartado 4.4.3.1.2., se calculó el tiempo de salado necesario para conseguir en los músculos un contenido medio en sal del 3% mediante la ecuación 4.4.13.

$$\Psi_s(t) = 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-D_s \lambda_n^2 t}}{(\lambda_n L)^2} \quad \text{Ec. 4.4.13.}$$

Las muestras se mantuvieron a 2°C durante las 24 horas previas al salado. El tiempo de salado de los músculos *Bíceps femoris* fue de 4 horas y de los *Semimembranosus* de 3 horas y media. El salado se realizó en la cámara de 2°C con objeto de evitar variaciones de temperatura que pudieran afectar al proceso. Tras el salado, los músculos se introdujeron en agua destilada durante 15 segundos para eliminar el exceso de sal adherido a su superficie.

#### 4.4.3.2.2. Cinéticas de deshidratación

Las cinéticas de deshidratación se determinaron en las cámaras de secado descritas en el apartado 4.4.3.1.5. La humedad relativa del aire se mantuvo en torno al 85% y la temperatura fue de 5 y 15°C. Es decir, un músculo *Bíceps femoris* y otro *Semimembranosus* se deshidrataron a 5°C y a 15°C, obteniéndose un total de cuatro cinéticas experimentales. Las cinéticas de ambos músculos a una misma temperatura se obtuvieron simultáneamente, tal y como se observa en la Figura 4.4.12. Los músculos fueron atemperados y envueltos en un film plástico durante 36 horas. Tras el atemperado, se procedió a la higienización de la carne y la cámara quemando azufre (Figura 4.4.12.)



**Figura 4.4.12.** Disposición de los músculos enteros en las cámaras de secado. Quemado de azufre.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

---

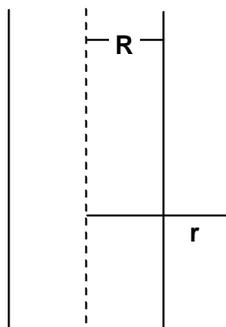
Las muestras se pesaron cada cierto tiempo (entre 3 y 5 días) hasta que sufrieron una pérdida de peso entre el 23 y el 30%. Una vez finalizado el proceso se determinó el contenido final de humedad y de sal, tal y como se expone en los apartados 4.4.1.1. y 4.4.1.2. respectivamente.

#### **4.5. Modelización de las cinéticas de secado**

La modelización de las experiencias de secado permite identificar parámetros de interés en el proceso. En primer lugar permite determinar la difusividad efectiva, como cuantificadora de la inversa de la resistencia interna a la transferencia de materia, para cada una de las condiciones de secado y geometrías estudiadas. Además, también se puede calcular el coeficiente de transferencia de materia en aquellos casos en que se considere la resistencia externa a la transferencia de materia no despreciable frente a la interna. Según la geometría y las condiciones de contorno se formularon diferentes modelos.

##### **4.5.1. Modelización de geometría cilíndrica infinita**

Considerando una geometría de cilindro infinito, con el fin de analizar el proceso de secado, se diferenciaron tres modelos difusivos, atendiendo a la contracción y a la resistencia externa, considerando en todos los casos la difusividad constante. La consideración de cilindro infinito supone que la difusión del agua sólo se produce en dirección radial. En los tres modelos considerados para geometría cilíndrica infinita, la ecuación de gobierno (Ecuación 4.5.1.), la condición inicial (Ecuación 4.5.2.) y la condición de simetría respecto al eje del cilindro (Ecuación 4.5.3.) fueron idénticas, siendo diferentes las condiciones de contorno en superficie (Ecuaciones 4.5.4., 4.5.5., 4.5.6.). En la Figura 4.5.1. se muestra el eje de coordenadas elegido para la formulación de los modelos.



**Figura 4.5.1.** Eje de coordenadas utilizado en la modelización de geometría cilíndrica infinita.

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

$$D_e \left( \frac{\partial^2 W(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W(r,t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial W(r,t)}{\partial t} \quad \text{Ec. 4.5.1.}$$

$$W(r,0) = W_0 \quad \text{Ec. 4.5.2.}$$

$$\frac{\partial W}{\partial r}(0,t) = 0 \quad \text{Ec. 4.5.3.}$$

La condición de contorno en la superficie del cilindro para cada uno de los modelos se muestra a continuación (Ecuación 4.5.4., 4.5.5. y 4.5.6.).

MODELO 1: SIN CONSIDERAR CONTRACCIÓN Y SIN CONSIDERAR RESISTENCIA EXTERNA

$$W(R,t) = W_e \quad \text{Ec. 4.5.4.}$$

MODELO 2: CONSIDERANDO LA CONTRACCIÓN Y SIN CONSIDERAR RESISTENCIA EXTERNA

$$W(R(W),t) = W_e \quad \text{Ec. 4.5.5.}$$

MODELO 3: SIN CONSIDERAR CONTRACCIÓN Y CONSIDERANDO RESISTENCIA EXTERNA

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(R,t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.6.}$$

En el modelo 2, en el cual se tuvo en cuenta la contracción, la función de contracción considerada fue la descrita en la Ecuación 5.3.4.

$$\frac{R}{R_0} = 0.103 * W + 0.764 \quad \text{Ec. 5.3.4.}$$

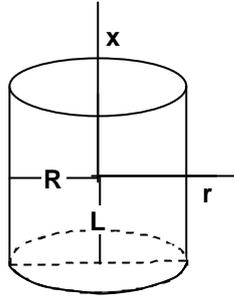
Los tres modelos se resolvieron utilizando el Método de los Elementos Finitos (Anejo 10.4.). Además, el modelo 1 se resolvió también analíticamente utilizando el Método de Separación de Variables (Anejo 10.3.), a efectos de comprobación. La identificación del valor de la difusividad efectiva (modelos 1, 2 y 3) y del coeficiente de transferencia de materia (modelo 3) se abordó utilizando un

método de optimización. Como función objetivo se consideró el promedio de las diferencias al cuadrado entre los valores experimentales y calculados de la humedad media para cada tiempo. La humedad media calculada se obtuvo integrando los valores de humedad local obtenidos con los modelos,  $W(r,t)$ , para todo el radio. De esta manera se obtuvieron los valores de humedad media calculada a un determinado tiempo ( $W(t)$ ). Para minimizar la función objetivo, considerando la difusividad efectiva (modelo 1, 2 y 3) y el coeficiente de transferencia de materia (modelo 3) como variables decisorias, se utilizó el método de optimización no lineal del Gradiente Reducido Generalizado (GRG). La bondad del ajuste se determinó mediante el cálculo del porcentaje de varianza explicada (Ecuaciones 4.3.2., 4.3.3. y 4.3.4.).

El coeficiente de transferencia de materia además de determinarse a partir de la minimización de la función objetivo, también se estimó a partir de ecuaciones semiempíricas obtenidas en la bibliografía (Treybal, 1968) tal y como se muestra en el Anejo 10.6.

#### **4.5.2. Modelización de geometría cilíndrica finita**

Para el análisis de las cinéticas de los cilindros finitos, tanto deshidratados en secadero convectivo como en cámara de secado, se utilizaron 4 modelos, incluyendo y sin incluir la contracción e incluyendo y sin incluir la resistencia externa a la transferencia de materia. También en este caso se considera la difusividad constante. Para todos los modelos, la ecuación de gobierno (Ecuación 4.5.7.) y la condición inicial (Ecuación 4.5.8.) fueron las mismas. También se consideró en todos los modelos la condición de simetría respecto al eje  $r$  (Ecuación 4.5.9.) y respecto al eje  $x$  (Ecuación 4.5.10.). En la Figura 4.5.2. se muestran los ejes de coordenadas elegidos.



**Figura 4.5.2.** Ejes de coordenadas elegidos en la modelización de las cinéticas de deshidratación de cilindros finitos.

$$D_e \left( \frac{\partial^2 W(r, x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W(r, x, t)}{\partial r} \right) = \frac{\partial W(r, x, t)}{\partial t} \quad \text{Ec. 4.5.7.}$$

$$W(r, x, 0) = W_0 \quad \text{Ec. 4.5.8.}$$

$$\frac{\partial W}{\partial r}(0, x, t) = 0 \quad \text{Ec. 4.5.9.}$$

$$\frac{\partial W}{\partial x}(r, 0, t) = 0 \quad \text{Ec. 4.5.10.}$$

Las demás condiciones de contorno variaron según el modelo considerado, tal y como se muestra a continuación:

MODELO 4: SIN CONSIDERAR CONTRACCIÓN Y SIN CONSIDERAR RESISTENCIA EXTERNA

$$W(R, x, t) = W_e \quad \text{Ec. 4.5.11.}$$

$$W(r, L, t) = W_e \quad \text{Ec. 4.5.12.}$$

MODELO 5: CONSIDERANDO CONTRACCIÓN Y SIN CONSIDERAR RESISTENCIA EXTERNA

$$W(R(W), x, t) = W_e \quad \text{Ec. 4.5.13.}$$

$$W(r, L(W), t) = W_e \quad \text{Ec. 4.5.14.}$$

MODELO 6: SIN CONSIDERAR CONTRACCIÓN Y CONSIDERANDO RESISTENCIA EXTERNA

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(R, x, t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.15.}$$

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial x}(r, L, t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.16.}$$

MODELO 7: CONSIDERANDO CONTRACCIÓN Y CONSIDERANDO RESISTENCIA EXTERNA

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(R(W), x, t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.17.}$$

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial x}(r, L(W), t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.18.}$$

En aquellos modelos en los que se consideró la contracción, las funciones de contracción utilizadas fueron las obtenidas para todos los cilindros, independientemente de las condiciones de secado ensayadas y de la geometría. Dichas funciones vienen descritas por las Ecuaciones 5.3.4. y 5.3.5.

$$\frac{R}{R_0} = 0.103 * W + 0.764 \quad \text{Ec. 5.3.4.}$$

$$\frac{V}{V_0} = 0.372 * W + 0.197 \quad \text{Ec. 5.3.5.}$$

La resolución de los modelos se abordó utilizando dos métodos. Todos los modelos se resolvieron mediante el Método Implícito de las Diferencias Finitas (Anejo 10.5.) y además el modelo 4 se resolvió analíticamente utilizando el Método de Separación de Variables (Anejo 10.3.) a efectos de comprobación. La bondad del ajuste se determinó mediante el cálculo del porcentaje de varianza explicada (Ecuaciones 4.3.2., 4.3.3. y 4.3.4.).

El valor de la difusividad efectiva (modelos 4, 5, 6 y 7) y del coeficiente de transferencia de materia (modelos 6 y 7) se determinó utilizando un método de optimización. La función objetivo considerada fue en todos los casos el promedio

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

de las diferencias al cuadrado entre los valores experimentales y calculados de la humedad media para cada tiempo. Los valores de humedad media calculada se determinaron integrando los valores puntuales obtenidos a partir de los modelos ( $W(r,x,t)$ ) en todo el volumen, con lo que se obtuvieron valores de humedad media ( $W(t)$ ) para cada tiempo. Para minimizar la función objetivo se consideraron como variables decisorias la difusividad efectiva y/o el coeficiente de transferencia de materia.

En el caso de las cinéticas de deshidratación obtenidas en el secadero convectivo, la minimización de la función objetivo para los modelos 4 y 5, se realizó mediante la función "fminbnd" del programa Matlab 6.1. Esta función encuentra el mínimo de una función de una sola variable en un intervalo de búsqueda determinado. Para la búsqueda del óptimo utiliza el Método de la Sección Áurea e Interpolación Parabólica. Cuando la resistencia externa a la transferencia de materia fue considerada, (modelos 6 y 7), las variables decisorias fueron la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de materia. Para identificar el valor de las variables decisorias a partir de la minimización de la función objetivo se utilizó la función "fmincon" de Matlab 6.1. Esta función determina el mínimo de una función no lineal de varias variables, en un intervalo de búsqueda determinado. El método de optimización utilizado por esta función es el Método de Programación Cuadrática Secuencial.

En aquellas cinéticas obtenidas en cámaras de secado, para la identificación de la difusividad a partir de los modelos que no incluyeron la resistencia externa a la transferencia de materia (modelos 4 y 5), se utilizó un programa escrito en FORTRAN 90. Dicho programa identifica el valor de la difusividad optimizando la función objetivo mediante el método de Gauss-Newton. En aquellos modelos que incluyeron la resistencia externa (modelos 6 y 7), se tomó como valor de difusividad efectiva el obtenido a partir de las cinéticas determinadas en secadero convectivo. Por ello, únicamente se identificó el valor del coeficiente de transferencia de materia. Esta determinación se realizó minimizando la función objetivo mediante la función "fmincon" de Matlab 6.1, considerando como variable decisorias el coeficiente de transferencia de materia,  $k$  (m/s).

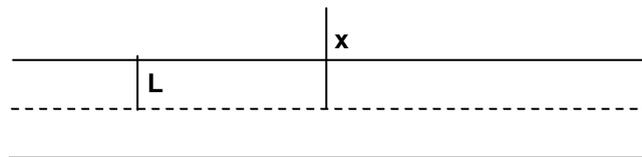
El coeficiente de transferencia de materia, además se determinó a partir de ecuaciones semiempíricas obtenidas en la bibliografía (Treyball, 1968). El procedimiento de cálculo se muestra en el Anejo 10.6. para los cilindros deshidratados en secadero convectivo (convección forzada) y en el Anejo 10.7. para aquéllos que fueron deshidratadas en cámaras de secado (convección natural).

La variación del coeficiente de difusividad efectiva con la temperatura de secado se consideró mediante la ecuación de Arrhenius.

$$D_e = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R T}\right) \quad \text{Ec. 2.1.8.}$$

#### 4.5.3. Modelización del músculo entero

Para la modelización de las cinéticas de deshidratación de los músculos enteros salados se consideró que éstos se comportaban como una lámina infinita. Además, en el modelo no se incluyó la contracción, pero sí la resistencia externa a la transferencia de materia. El eje de coordenadas elegido se muestran en la Figura 4.5.3.



**Figura 4.5.3.** Eje de coordenadas utilizado en la modelización de los músculos enteros.

La ecuación de gobierno, así como las condiciones inicial y de contorno utilizadas en la modelización de los músculos enteros se muestran a continuación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

MODELO 8: NO CONSIDERANDO CONTRACCIÓN Y CONSIDERANDO RESISTENCIA EXTERNA. MÚSCULO ENTERO

ECUACIÓN DE GOBIERNO  $D_e \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial W}{\partial t}$  Ec. 4.5.19.

CONDICIÓN INICIAL  $W(x,0) = W_0$  Ec. 4.5.20.

CONDICIONES DE CONTORNO  $\left\{ \begin{array}{l} -D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial x}(L,t) = k(C_a - C_\infty) \\ \frac{\partial W}{\partial r}(0,t) = 0 \end{array} \right.$  Ec. 4.5.21.

El valor de difusividad efectiva utilizado en el modelo fue el considerado para la modelización de las cinéticas de deshidratación de los cilindros salados sin tener en cuenta la contracción y teniendo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia. Además se consideró convección natural. Por ello el cálculo del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ) se realizó tal y como se expone en el Anejo 10.7., tomando como valores de  $a$  y  $n$  los obtenidos en la bibliografía para una superficie vertical ( $a = 0.59$  y  $n = 0.25$ ). El cálculo de la humedad media se realizó integrando los valores locales para toda la longitud. La bondad de los ajustes entre los valores de humedad media calculados y los experimentales se determinó a partir del cálculo del porcentaje de varianza explicada (Ecuaciones 4.3.2., 4.3.3. y 4.3.4.).

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**



## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se expondrán los resultados obtenidos en el presente trabajo.

### 5.1. Caracterización de la materia prima

Para caracterizar la materia prima utilizada, se determinó su contenido en humedad, cenizas, grasa, proteína y pH. Los resultados medios obtenidos para ambos músculos estudiados se muestran en la Tabla 5.1.1.

**Tabla 5.1.1.** Resultados de la caracterización de la materia prima.

MÚSCULO	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	GRASA (%)	PROTEINA (%)	pH
<i>Bíceps femoris</i>	73.39 ± 0.12	0.98 ± 0.12	4.06 ± 0.18	21.08 ± 0.05	5.70 ± 0.11
<i>Semimembranosus</i>	74.46 ± 0.09	1.14 ± 0.03	1.40 ± 0.18	22.67 ± 0.13	5.81 ± 0.11

### 5.2. Isotermas de sorción

Los valores experimentales de las isotermas de sorción se muestran en el Anejo 10.8. En las Figuras 5.2.1. y 5.2.2., se representan las isotermas experimentales a las cuatro temperaturas estudiadas para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* respectivamente.

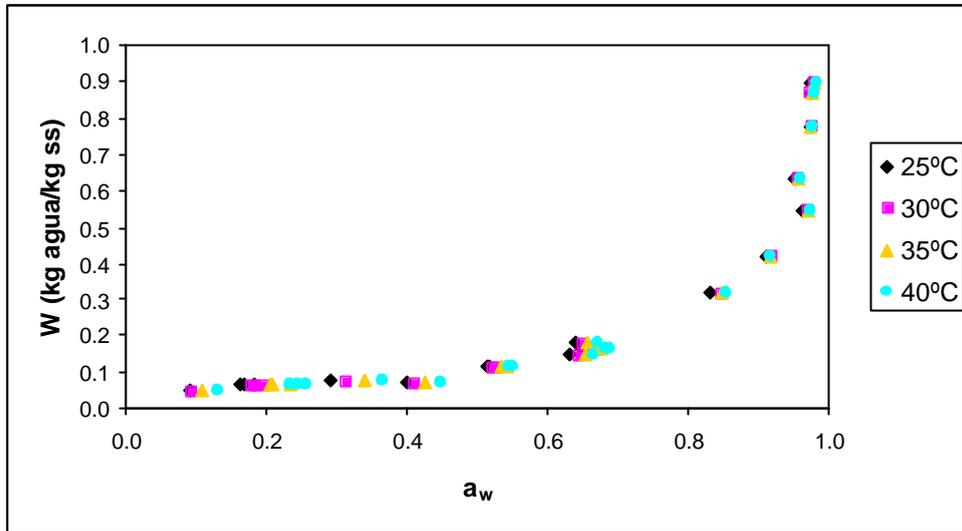


Figura 5.2.1. Isotherma experimental del músculo *Biceps femoris* a las cuatro temperaturas estudiadas.

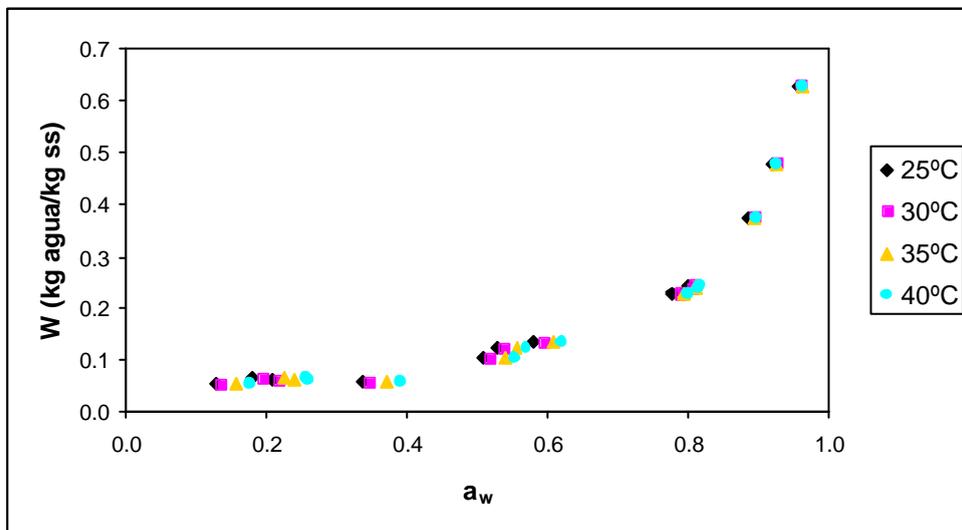


Figura 5.2.2. Isotherma experimental del músculo *Semimembranosus* a las cuatro temperaturas estudiadas.

En las Figuras 5.2.1. y 5.2.2. puede apreciarse cómo la correlación entre la actividad de agua y la humedad describe la forma típica de las isotermas de desorción en alimentos. Se observa que conforme el producto pierde humedad la proporción de agua móvil va disminuyendo, lo que indicaría que conforme el producto se deshidrata, cada vez le resulta más difícil seguir haciéndolo debido a que la proporción de agua ligada aumenta. Este tipo de curvas es muy común en alimentos y se ha observado en diferentes productos agroalimentarios, tanto vegetales (patata (Sánchez et al., 1997), mora (Mascan y Göğüs, 1998), coliflor (Mulet et al., 1999b), menta (Park et al., 2002)), como productos cárnicos (cerdo (Comaposada et al., 2000a y 2000b), ternera y cerdo cocidos y curados (Delgado y Sun, 2002a), ternera cruda (Trujillo et al., 2003)).

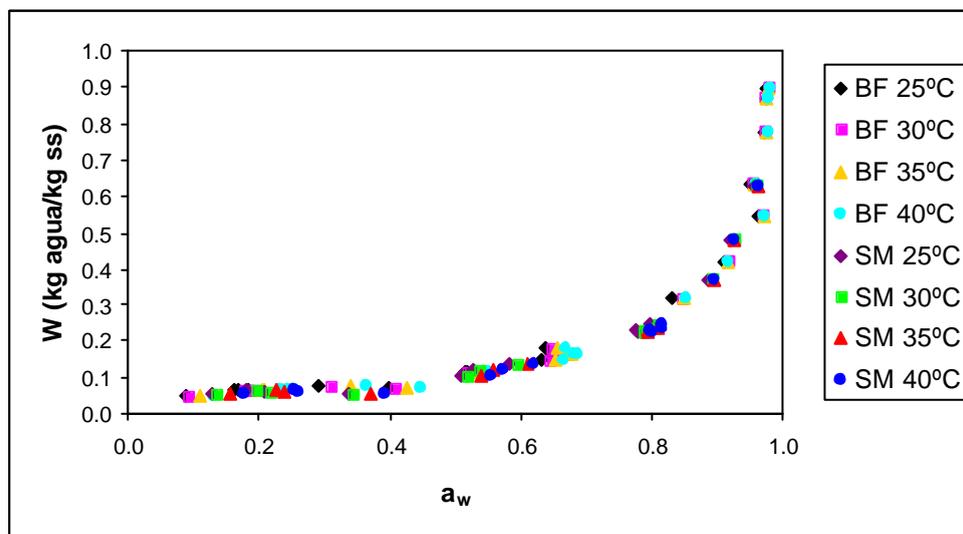
Además, la experimentación ha permitido establecer que existe una relación entre la temperatura y la actividad de agua para una humedad constante, de manera que si aumenta la temperatura también lo hace la actividad de agua, más acusadamente para contenidos de humedad bajos. Este hecho también ha sido observado en otros músculos del jamón como el *Gluteus medius* (Comaposada, 1999) y en otros productos como la cebolla (Adam et al., 2000), el chile (Hossain y Bala, 2000a), la menta (Kouhila et al., 2001), etc. Es un hecho ampliamente aceptado que un aumento en la temperatura provoca un aumento de la actividad de agua (Hill y Rizvi, 1982; Okos et al, 1992). El aumento de la actividad de agua con la temperatura se debe principalmente a cambios en la fijación de las moléculas de agua en la matriz sólida, disociación de las moléculas de agua y/o aumento de la solubilidad de solutos en el agua (Rahman, 1995). Para valores de actividad de agua elevados, los componentes solubles del alimento tienen una mayor cantidad de agua a su disposición para solubilizarse y por lo tanto el aumento de la temperatura tiene un efecto positivo sobre esta solubilidad (Saravacos, 1995).

En la representación gráfica de las isotermas, se observan tres regiones. La región de actividad de agua baja, que va desde 0.09 hasta 0.20, corresponde con el final del proceso de desorción cuando las humedades son más bajas, desde 0.05 hasta 0.07 kg agua/kg ss. En esta región el agua, que está adsorbida en forma de monocapa, no tiene prácticamente movilidad, por lo que su

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

disponibilidad para las reacciones químicas está muy limitada. La siguiente región de actividad de agua, región media, va desde 0.20 hasta 0.65. La humedad en esta región está comprendida entre 0.07 y 0.18 kg agua/kg ss. Por último, se observa la región de actividad de agua alta, que va desde 0.65 hasta 0.99 aproximadamente. Se corresponde con valores de humedad más altos, desde 0.70 hasta 0.90 kg agua/kg ss. Debido a que la movilidad del agua es cada vez mayor, al aumentar la humedad, aumenta el riesgo de contaminación en la carne, convirtiéndola en un producto fácilmente perecedero. Por ello, las mayores diferencias de actividad de agua, para una misma temperatura, se dan para humedades elevadas, es decir, cuando el agua tiene una mayor movilidad.

Para comparar las isotermas de sorción de los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus* se representaron conjuntamente todos los datos experimentales de las isotermas a las distintas temperaturas. Esta representación se muestra en la Figura 5.2.3.



**Figura 5.2.3.** Isotermas de desorción de los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*.

Tal y como se observa en la Figura 5.2.3., los resultados experimentales obtenidos para ambos músculos son muy similares. Estos resultados coinciden además con los obtenidos por Comaposada (1999) para el músculo *Gluteus medius* a 26°C sin adición de sal.

Al comparar los resultados experimentales obtenidos con aquéllos que obtuvieron Delgado y Sun (2002a) para carne de cerdo y de ternera se observan diferencias. En un rango de temperatura similar al estudiado (20 – 49°C), para un mismo contenido en humedad, estos autores obtuvieron valores de actividad de agua inferiores. En este trabajo, previamente a la determinación de las isotermas de sorción, las muestras fueron saladas y cocidas, lo que explicaría que para un mismo contenido en humedad, el agua tuviese menor disponibilidad ( $a_w$  menor). La presencia de NaCl deteriora los sarcómeros y las proteínas son dispersadas desde los mismos, lo que lleva a la carne a retener una mayor cantidad de agua (Lewis y Jewell, 1975).

Con el fin de determinar si las isotermas experimentales eran estadísticamente diferentes o no, se calcularon los intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). De esta forma se compararon los valores de  $a_w$  a cada temperatura correspondientes a un mismo contenido en humedad. Los resultados obtenidos se muestran en el Anejo 10.9. Se observa que para  $a_w$  superiores a 0.45 – 0.50, no existen diferencias significativas entre los valores de actividad de agua de equilibrio obtenidos para las diferentes temperaturas. Si la actividad de agua es inferior a 0.45 – 0.50, dependiendo del incremento de temperatura, se encuentran o no diferencias significativas entre los valores de actividad de agua obtenidos. Así, para un incremento de temperatura de 15°C, los valores de  $a_w$  obtenidos son significativamente diferentes. Si el incremento de temperatura es de 5°C, los valores de actividad de agua obtenidos para un mismo contenido en humedad son estadísticamente similares. Por último, cuando las temperaturas difieren entre sí 10°C, a veces se obtienen diferencias significativas entre los valores de actividad de agua para un mismo contenido en humedad y otras veces no se encuentran. Trujillo et al. (2003) concluyeron en un estudio sobre isotermas de carne magra de ternera que en un intervalo de temperatura comprendido entre 5 y 40 °C y actividad de agua entre 0.30 y 0.99, las isotermas de sorción de este producto

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

eran independientes de la temperatura. En cambio, Comaposada et al. (2000b) observaron que para carne de cerdo fresca (músculo *Gluteus medius*) la temperatura no tenía un efecto significativo si la actividad de agua era inferior a 0.70, para un rango de temperatura comprendido entre 5 y 26°C. A la vista de lo expuesto anteriormente, se observa que el efecto de la temperatura en isothermas de carne tal vez dependa de factores ligados a la composición de la misma, por lo que resulta difícil comparar los resultados.

### **5.2.1. Modelización de las isothermas de sorción**

La adsorción del agua en sistemas multicomponente, como son los alimentos, es un fenómeno muy complejo que depende de numerosos factores como las propiedades de sorción de cada uno de los componentes del sistema (polímeros, solutos no iónicos, solutos iónicos etc) y la temperatura. Los componentes solubles (azúcares y sales) pueden sufrir transiciones de fase. Por lo tanto la interpretación teórica de las características de sorción de este tipo de sistemas presenta enormes dificultades (McMinn y Magee, 1997a).

En la bibliografía se encuentran multitud de modelos para describir las isothermas de sorción. Algunos de ellos son empíricos, otros son semiempíricos y otros son teóricos. La expresión matemática es diferente para cada uno de los modelos, siendo generalmente más sencillos los empíricos que los teóricos. Otra consideración importante es que cada modelo ofrece una información diferente sobre el proceso de sorción. Además, con cada uno de ellos puede ajustarse un rango de actividad de agua determinado, variando también la bondad del ajuste obtenido según el modelo utilizado. Por todo ello, es difícil elegir a priori un único modelo con el que describir los datos experimentales de la isoterma de sorción. Así, es recomendable utilizar varios modelos de complejidad variable, con el fin de establecer cual de ellos proporciona una mejor explicación de la realidad así como con cuál de ellos se consiguen de forma más adecuada los fines perseguidos. Por ejemplo, el uso de un modelo empírico expresado mediante una ecuación sencilla puede facilitar cálculos posteriores en los que se precise la isoterma de sorción, aunque su significado físico sea menos consistente.

En el presente apartado, a partir de las isotermas de sorción de carne de cerdo (músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*) a distintas temperaturas, se procederá a ajustar los resultados experimentales utilizando varios modelos: dos empíricos, el modelo de Oswin y el modelo de Henderson, uno semiempírico, el modelo de Halsey modificado y dos teóricos, el modelo de GAB y el modelo de BET. Dichos modelos se encuentran descritos en el apartado 2.2.3.1.

#### 5.2.1.1. Modelo de Oswin

El modelo empírico de Oswin se ajustó muy satisfactoriamente, con una varianza superior al 98% y unos errores inferiores al 9%, en casi todo el rango de actividades, a partir de valores de actividad de agua superiores a 0.18. Los valores obtenidos para los parámetros del modelo de Oswin se muestran en las Tablas 5.2.1. (*Bíceps femoris*) y 5.2.2. (*Semimembranosus*).

**Tabla 5.2.1.** Parámetros del modelo de Oswin. *Bíceps femoris*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.18 – 0.97	0.20 – 0.98	0.23 – 0.98	0.25 – 0.98
<b><math>K_{O1}</math></b>	0.549	0.553	0.559	0.550
<b><math>K_{O2}</math></b>	0.116	0.113	0.108	0.104
<b>EMR</b>	6.3	6.5	5.9	6.8
<b>% var</b>	99.2	99.2	99.5	99.0

**Tabla 5.2.2.** Parámetros del modelo de Oswin. *Semimembranosus*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.18 – 0.96	0.20 – 0.96	0.23 – 0.96	0.26 – 0.96
<b><math>K_{O1}</math></b>	0.572	0.570	0.584	0.600
<b><math>K_{O2}</math></b>	0.110	0.106	0.101	0.097
<b>EMR</b>	8.5	8.2	8.6	8.6
<b>% var</b>	99.0	99.1	98.6	98.3

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Los resultados obtenidos para los parámetros  $K_{O1}$  y  $K_{O2}$  son similares para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

Gisbert (2001) encontró valores del parámetro  $K_{O1}$  para temperaturas entre 6 y 16°C, comprendidos entre 0.49 y 0.85 ( $a_w > 0.90$ ) y entre 0.65 y 0.67 ( $a_w < 0.90$ ). Estos valores son muy similares a los obtenidos en el presente estudio. Por otro lado, Diaferia et al. (1998) obtuvieron valores del mismo orden en un estudio realizado en diferentes tipos de salami (entre 0.81 y 0.94 a 20°C y entre 0.74 y 0.97 a 10°C).

En cuanto al parámetro  $K_{O2}$ , Gisbert (2001) obtuvo valores superiores a los obtenidos en el presente estudio, aunque del mismo orden (0.094 – 0.26 para  $a_w > 0.90$  y 0.185 – 0.197 para  $a_w < 0.90$ ). Por otro lado los resultados obtenidos en el presente estudio son similares a los que obtuvieron Diaferia et al. (1998): 0.080 y 0.082 para temperatura de 20°C y 0.091 y 0.094 para temperatura de 10°C.

En las Tablas 5.2.1. y 5.2.2. se observa que cuando aumenta la temperatura, el parámetro  $K_{O2}$  disminuye. El otro parámetro del modelo,  $K_{O1}$ , no tiene una dependencia clara con la temperatura. Por ello, se recurrió al modelo de Oswin con efecto de la temperatura descrito en el apartado 2.2.3.1. Los resultados obtenidos al realizar este ajuste se muestran en la Tabla 5.2.3.

**Tabla 5.2.3.** Parámetros del modelo de Oswin con efecto de la temperatura.

Parámetro	<i>Bíceps femoris</i>	<i>Semimembranosus</i>
$A_o$	0.0002	0.0003
$B_o$	0.548	0.479
$C_o$	-0.0008	-0.0008
$D_o$	0.137	0.137
EMR	6.4	9.5
% var	99.2	97.7

El ajuste de los parámetros del modelo fue satisfactorio, al obtenerse un error inferior al 10% y una varianza superior al 97%, aunque fue en el músculo *Bíceps femoris* en el que se obtuvo un ajuste más satisfactorio. Comaposada et al. (2000a) encontraron resultados no concordantes con los del presente estudio para los parámetros del modelo de Oswin con efecto de la temperatura. Al modelizar las isotermas del músculo *Gluteus medius* de la pierna de cerdo, obtuvieron para  $a_w < 0.75$ ,  $A_0 = -0.0245$ ,  $B_0 = 0.176$ ,  $C_0 = 0$ ,  $D_0 = 0.429$  y para  $a_w > 0.75$ ,  $A_0 = 0$ ,  $B_0 = 3.856$ ,  $C_0 = -0.020$ ,  $D_0 = 1.007$ .

En el Anejo 10.10. se muestran gráficamente los resultados obtenidos para el ajuste de los datos experimentales con el modelo de Oswin, teniendo y no teniendo en cuenta la influencia de la temperatura en el ajuste.

En la Tabla 5.2.3. se observa que ambos músculos proporcionaron valores similares para los parámetros de los modelos. Al ajustar el modelo de Oswin teniendo en cuenta el efecto de la temperatura, se obtuvo que cuando la temperatura aumenta  $K_{O_2}$  disminuye y se corroboró también que  $K_{O_1}$  aumenta con la temperatura tal y como se muestra en la Tabla 5.2.4. En ésta se muestran los valores obtenidos para los parámetros  $K_{O_1}$  y  $K_{O_2}$  al incluir el efecto de la temperatura en la modelización. Esta tendencia fue también puesta de manifiesto por Gisbert (2001) para  $a_w < 0.90$  y temperatura comprendida entre 6 y 16°C, en un estudio en lomo de cerdo salado.

**Tabla 5.2.4.** Parámetros del modelo de Oswin a las distintas temperaturas.

PARÁMETROS		25°C	30°C	35°C	40°C
<i>Bíceps femoris</i>	$K_{O_1}$	0.552	0.552	0.553	0.554
	$K_{O_2}$	0.116	0.112	0.108	0.104
<i>Semimembranosus</i>	$K_{O_1}$	0.554	0.569	0.584	0.599
	$K_{O_2}$	0.117	0.113	0.109	0.105

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.2.1.2. Modelo de Henderson

El ajuste de los resultados experimentales también se realizó con otro modelo empírico, el modelo de Henderson. Como se observa en las Tablas 5.2.5. y 5.2.6., el modelo se ajustó para valores de actividad de agua superiores a 0.29 con un error inferior al 9% y una varianza explicada superior al 96%. El mejor ajuste se obtuvo para una temperatura de 40°C, siendo los resultados obtenidos para ambos músculos estudiados similares.

**Tabla 5.2.5.** Parámetros del modelo de Henderson. *Bíceps femoris*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.29 – 0.97	0.31 – 0.98	0.34 – 0.98	0.36 – 0.98
<b>B<sub>1</sub></b>	0.863	0.849	0.830	0.819
<b>B<sub>2</sub></b>	4.649	4.680	4.673	4.748
<b>EMR</b>	8.6	8.3	7.4	6.1
<b>% var</b>	96.7	96.6	97.4	98.4

**Tabla 5.2.6.** Parámetros del modelo de Henderson. *Semimembranosus*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.34 – 0.96	0.35 – 0.96	0.37 – 0.96	0.39 – 0.96
<b>B<sub>1</sub></b>	0.880	0.874	0.839	0.809
<b>B<sub>2</sub></b>	5.219	5.339	5.195	5.073
<b>EMR</b>	5.9	5.8	5.4	5.1
<b>% var</b>	96.9	96.9	97.7	98.0

El parámetro B<sub>1</sub> del modelo de Henderson presenta una dependencia con la temperatura, de forma que al aumentar la temperatura disminuye el valor de éste. La dependencia con la temperatura del parámetro B<sub>2</sub> no es tan clara como en B<sub>1</sub>. La influencia de la temperatura en los parámetros del modelo de Henderson, se estableció tal y como se describe en las Ecuaciones 2.2.19. y 2.2.20. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5.2.7. El ajuste de los

parámetros del modelo teniendo en cuenta el efecto de la temperatura fue bueno, al obtenerse un error inferior al 8% y una varianza explicada superior al 97%.

**Tabla 5.2.7.** Parámetros del modelo de Henderson con efecto de la temperatura.

Parámetro	<i>Bíceps femoris</i>	<i>Semimembranosus</i>
$A_H$	0.839	0.850
$B_H$	0.009	0.009
EMR	7.9	6.3
% var	97.6	97.8

La representación de los valores de humedad calculados mediante el modelo de Henderson (teniendo y sin tener en cuenta el efecto de la temperatura en el modelo) frente a los experimentales se muestra en el Anejo 10.11. Al calcular los parámetros  $B_1$  y  $B_2$  a partir de  $A_H$  y  $B_H$  se comprobó que al aumentar la temperatura también aumentaba el parámetro  $B_2$ , permaneciendo constante el parámetro  $B_1$  tal y como se muestra en la Tabla 5.2.8. Ertugay et al. (2000) obtuvieron una relación similar entre la temperatura y los parámetros identificados del modelo de Henderson en un estudio sobre Tarhana (producto turco precocinado). No obstante, los valores obtenidos en el presente estudio son mayores a los identificados por estos autores para temperaturas 25 y 35°C. Valores elevados de las constantes del modelo de Henderson indican estabilidad de la estructura de los microporos durante la sorción, de manera que cuanto mayores son las constantes, la estructura de los microporos es más estable (Boki y Ohno, 1991). Los resultados obtenidos en el presente estudio son superiores a los obtenidos por Ertugay et al. (2000), por lo que podría considerarse que la microestructura de los músculos estudiados es relativamente estable.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Tabla 5.2.8.** Parámetros del modelo de Henderson a las distintas temperaturas.

PARAMETROS		25°C	30°C	35°C	40°C
<i>Bíceps femoris</i>	B <sub>1</sub>	0.839	0.839	0.839	0.839
	B <sub>2</sub>	4.571	4.648	4.724	4.801
<i>Semimembranosus</i>	B <sub>1</sub>	0.850	0.850	0.850	0.850
	B <sub>2</sub>	5.077	5.162	5.247	5.332

**5.2.1.3. Modelo de Halsey modificado**

El modelo semiempírico de Halsey modificado se ajustó para todo el rango de actividades de agua con un porcentaje de varianza explicada cercano al 98% y un error medio relativo inferior al 9% en todos los casos. En las Tablas 5.2.9. y 5.2.10. se muestran los resultados obtenidos para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* respectivamente.

**Tabla 5.2.9.** Parámetros del modelo de Halsey modificado. *Bíceps femoris*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
Rango a <sub>w</sub>	0.09 – 0.91	0.10 – 0.92	0.11 – 0.92	0.13 – 0.92
K <sub>H1</sub>	-35.188	-41.728	-36.504	-35.494
K <sub>H2</sub>	1.472	1.557	1.446	1.409
EMR	7.0	6.9	6.3	6.0
% var	97.7	98.2	98.0	98.0

**Tabla 5.2.10.** Parámetros del modelo de Halsey modificado. *Semimembranosus*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
Rango a <sub>w</sub>	0.13 – 0.92	0.14 – 0.93	0.16 – 0.93	0.18 – 0.93
K <sub>H1</sub>	-34.155	-38.207	-36.874	-36.253
K <sub>H2</sub>	1.422	1.480	1.414	1.384
EMR	8.9	7.9	8.9	8.7
% var	98.9	99.0	98.9	98.8

En las Tablas 5.2.9. y 5.2.10. puede observarse que los valores obtenidos son muy similares para los dos músculos estudiados. Además, se observa que no existe una correlación clara entre el parámetro  $K_{H1}$  y la temperatura. Los valores obtenidos por Gisbert (2001) para lomo de cerdo salado son similares a los del presente estudio para el parámetro  $K_{H2}$  pero diferentes para  $K_{H1}$ . Igualmente, García et al. (2000) en un estudio realizado en leche de soja obtuvieron para un rango de actividad de agua entre 0.1 y 0.9 valores similares del parámetro  $K_{H2}$  e inferiores para  $K_{H1}$ .

Los datos experimentales se ajustaron también utilizando el modelo de Hasley modificado teniendo en cuenta el efecto de la temperatura en los parámetros  $K_{H1}$  y  $K_{H2}$  tal y como se describe en el apartado 2.2.3.1. Los resultados se muestran en la Tabla 5.2.11.

**Tabla 5.2.11.** Parámetros del modelo de Halsey modificado con efecto de la temperatura.

Parámetro	<i>Bíceps femoris</i>	<i>Semimembranosus</i>
$A_{Hmod}$	-0.010	-0.009
$B_{Hmod}$	-3.277	-3.294
$C_{Hmod}$	1.453	1.416
EMR	6.5	9.0
% var	98.1	98.9

El ajuste de los parámetros del modelo fue satisfactorio (error inferior al 9% y una varianza superior al 98%), obteniéndose valores similares de los parámetros para ambos músculos. Los valores identificados de los parámetros del modelo de Halsey modificado ( $A_{Hmod}$ ,  $B_{Hmod}$ ,  $C_{Hmod}$ ) son muy similares a los obtenidos por Comaposada et al. (2000a). Estos autores modelizaron las isotermas de carne del músculo *Gluteus medius* obteniendo para  $a_w < 0.75$   $A_{Hmod} = -0.0284$ ,  $B_{Hmod} = -2.899$ ,  $C_{Hmod} = 1.478$  y para  $a_w > 0.75$   $A_{Hmod} = -0.0316$ ,  $B_{Hmod} = -2.559$ ,  $C_{Hmod} = 1.224$ . En el Anejo 10.12. se representan los ajustes obtenidos tanto teniendo como no teniendo en cuenta el efecto de la temperatura.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el ajuste realizado teniendo en cuenta la influencia de la temperatura, y tras calcular las constantes  $K_{H1}$  y  $K_{H2}$  a partir de  $A_{Hmod}$ ,  $B_{Hmod}$  y  $C_{Hmod}$ , se comprobó que la constante  $K_{H1}$  del modelo en valor absoluto aumentaba con la temperatura y que la constante  $K_{H2}$  no estaba influida por ella, tal y como muestran los resultados de la Tabla 5.2.12. García et al. (2000) obtuvieron una disminución del parámetro  $K_{H2}$  al aumentar la temperatura. En cambio, Gisbert (2001) encontró que para lomo de cerdo salado, un aumento en la temperatura provocaba un aumento en el valor absoluto del parámetro  $K_{H2}$ . Estos resultados, unidos a los obtenidos en el presente estudio, estarían indicando que no resultan concluyentes los estudios sobre el efecto de la temperatura en el parámetro  $K_{H2}$ . García et al. (2000) observaron que  $K_{H1}$  disminuía al aumentar la temperatura y Gisbert (2001) que permanecía constante, por lo que a la vista de estos resultados tampoco, el efecto de la temperatura sobre el parámetro  $K_{H1}$  queda establecido de manera concluyente.

**Tabla 5.2.12.** Parámetros del modelo de Halsey modificado a las distintas temperaturas.

PARÁMETROS		25°C	30°C	35°C	40°C
<i>Bíceps femoris</i>	$K_{H1}$	-33.705	-35.367	-37.110	-38.939
	$K_{H2}$	1.453	1.453	1.453	1.453
<i>Semimembranosus</i>	$K_{H1}$	-33.776	-35.339	-36.975	-38.686
	$K_{H2}$	1.416	1.416	1.416	1.416

### 5.2.1.4. Modelo de GAB

Para modelizar las isotermas según el modelo de GAB se empleó la Ecuación 2.2.2. Los parámetros del modelo obtenidos para los músculos *Bíceps femoris* (Tabla 5.2.13.) y *Semimembranosus* (Tabla 5.2.14.) se muestran a continuación.

**Tabla 5.2.13.** Parámetros del modelo de GAB. *Biceps femoris*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.09 – 0.97	0.10 – 0.98	0.11 – 0.98	0.13 – 0.98
<b><math>W_G</math></b>	0.061	0.059	0.057	0.056
<b><math>C_G</math></b>	31.196	32.502	26.915	20.521
<b><math>K_G</math></b>	0.952	0.954	0.954	0.952
<b>EMR</b>	5.7	8.4	5.3	5.2
<b>% var</b>	99.3	99.2	99.5	99.5

**Tabla 5.2.14.** Parámetros del modelo de GAB. *Semimembranosus*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.13 – 0.96	0.14 – 0.96	0.16 – 0.96	0.18 – 0.96
<b><math>W_G</math></b>	0.056	0.057	0.052	0.0513
<b><math>C_G</math></b>	27.813	32.502	24.888	19.576
<b><math>K_G</math></b>	0.959	0.948	0.958	0.960
<b>EMR</b>	7.3	5.8	7.2	7.2
<b>% var</b>	98.9	99.6	98.9	98.9

Los parámetros del modelo de GAB son  $W_G$ ,  $C_G$  y  $K_G$ , donde  $W_G$  es la humedad en la monocapa (kg agua/kg ss) y corresponde a la humedad del producto cuando los puntos de adsorción primarios están saturados por moléculas de agua y  $C_G$  y  $K_G$  son constantes de energía.  $C_G$  representa la diferencia de potencial químico de las moléculas de sorbato entre capas de sorción superiores y la monocapa y  $K_G$  es la relación entre el potencial químico de las moléculas de sorbato en estado líquido puro y en capas de sorción superiores (Timmermann et al., 2001).

El modelo de GAB se ajustó muy satisfactoriamente para todo el rango de actividad de agua estudiado. El error medio relativo (EMR) fue inferior al 9% y el porcentaje de varianza explicada (% var) fue superior al 98.5% en todos los casos.

Los resultados obtenidos para la humedad de la monocapa ( $W_G$ ) y de la constante  $K_G$  son muy similares a los que obtuvieron Trujillo et al. (2003) para

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

carne magra de ternera. Estos autores identificaron un valor de humedad en la monocapa de 0.0565 kg agua/kg ss y un valor de  $K_G$  de 0.9692 para un rango de temperatura comprendido entre 5 y 40°C. En cambio, el valor obtenido por éstos para  $C_G$  ( $C_G = 4.24$ ) es diferente al obtenido en el presente estudio. Rahman et al. (2002) modelizaron las isotermas de sorción de carne de atún liofilizada, para un rango de actividad de agua entre 0.113 y 0.877 y obtuvieron los siguientes valores:  $T = 5^\circ\text{C}$  ( $W_G = 0.0883$  kg agua/kg ss,  $C_G = 6.495$ ,  $K_G = 0.8588$ ),  $T = 22^\circ\text{C}$  ( $W_G = 0.0633$  kg agua/kg ss,  $C_G = 9.566$ ,  $K_G = 0.9139$ ),  $T = 50^\circ\text{C}$  ( $W_G = 0.0375$  kg agua/kg ss,  $C_G = 100.2$ ,  $K_G = 1.0315$ ). Como puede observarse, los datos de humedad de la monocapa y de  $K_G$  son similares a los obtenidos en el presente estudio. Además, los valores identificados para  $C_G$  se encuentran dentro de los valores obtenidos para dicho parámetro por Rahman et al. (2002). Comaposada et al. (2000a) obtuvieron valores similares para los parámetros  $W_G$  y  $C_G$  a los obtenidos en el presente estudio.

En las Tablas 5.2.13. y 5.2.14. se observa que existe una relación entre la humedad de la monocapa ( $W_G$ ) y la temperatura, de manera que si aumenta la temperatura,  $W_G$  disminuye. Para los otros dos parámetros del modelo,  $C_G$  y  $K_G$ , no se observa una relación bien definida con la temperatura.

Con el fin de establecer el efecto de la temperatura en los parámetros obtenidos, se ajustaron los datos experimentales utilizando el modelo de GAB que considera la influencia de la temperatura (Ecuaciones 2.2.5., 2.2.6., 2.2.7.). En la Tabla 5.2.15. se muestran los resultados obtenidos para ambos músculos estudiados. Además, en el Anejo 10.13. se representan los ajustes obtenidos (valores de humedad calculada frente a humedad experimental) tanto teniendo como no teniendo en cuenta el efecto de la temperatura.

**Tabla 5.2.15.** Parámetros del modelo de GAB considerando el efecto de la temperatura.

Parámetro	<i>Bíceps femoris</i>	<i>Semimembranosus</i>
<b>A<sub>G</sub></b>	-0.0005	-0.0006
<b>B<sub>G</sub></b>	0.2161	0.2336
<b>C<sub>G</sub></b>	1279.30	1279.30
<b>D<sub>G</sub></b>	-0.8814	-0.8809
<b>E<sub>G</sub></b>	0.0002	0.0002
<b>F<sub>G</sub></b>	-0.0973	-0.0946
<b>EMR</b>	5.7	9.5
<b>% var</b>	99.4	98.6

El ajuste de los parámetros del modelo considerando el efecto de la temperatura fue bueno en ambos músculos, ya que se obtuvo un error inferior al 10% y una varianza superior al 98.5%. En la Tabla 5.2.15. se observa que los resultados obtenidos para ambos músculos son similares.

Comaposada et al. (2000a) ajustaron datos experimentales de la isoterma del músculo *Gluteus medius* teniendo en cuenta el efecto de la temperatura, para 5, 13 y 26°C. Los resultados obtenidos por estos autores se muestran en las Ecuaciones 5.2.1., 5.2.2. y 5.2.3.

$$W_G = -0.00167 * T + 0.5484 \quad \text{Ec. 5.2.1.}$$

$$C_G = \exp\left(\frac{1279.3}{T} - 0.9195\right) \quad \text{Ec. 5.2.2.}$$

$$K_G = \exp(-0.00359 * T + 0.0592) \quad \text{Ec. 5.2.3.}$$

Los valores identificados para A<sub>G</sub>, B<sub>G</sub>, C<sub>G</sub> y D<sub>G</sub> son similares a los obtenidos en el presente estudio. En cambio se encuentran diferencias en los parámetros E<sub>G</sub> y F<sub>G</sub>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

La relación entre la humedad de la monocapa y la temperatura obtenida por Gisbert (2001) viene expresado en las Ecuaciones 5.2.4. y 5.2.5.

$$W_G = 0.0025 * T + 0.044, a_w > 0.90 \quad \text{Ec. 5.2.4.}$$

$$W_G = -0.0012 * T + 0.8691, a_w < 0.90 \quad \text{Ec. 5.2.5.}$$

Para actividades de agua inferiores a 0.90, los resultados obtenidos por Gisbert (2001) coinciden con los obtenidos en el presente estudio.

### 5.2.1.5. Modelo de BET

Los resultados obtenidos en el ajuste realizado utilizando el modelo de BET, se muestran en las Tablas 5.2.16. (*Biceps femoris*) y 5.2.17. (*Semimembranosus*), siendo  $W_B$  la humedad de la monocapa (kg agua/kg ss) y  $C_B$  la constante de BET. La constante de BET está relacionada logarítmicamente con la diferencia entre el potencial químico de las moléculas de sorbato en estado líquido puro y en la primera capa de sorción (Timmermann et al., 2001).

**Tabla 5.2.16.** Parámetros del modelo de BET. *Biceps femoris*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.18 – 0.83	0.20 – 0.85	0.23 – 0.85	0.26 – 0.85
<b><math>W_B</math></b>	0.056	0.053	0.052	0.051
<b><math>C_B</math></b>	49.527	80.445	37.098	31.579
<b>EMR</b>	5.2	6.1	6.0	6.3
<b>% var</b>	98.2	96.5	96.3	96.7

**Tabla 5.2.17.** Parámetros del modelo de BET. *Semimembranosus*.

	25°C	30°C	35°C	40°C
<b>Rango <math>a_w</math></b>	0.18 – 0.80	0.20 – 0.81	0.23 – 0.81	0.26 – 0.82
<b><math>W_B</math></b>	0.050	0.048	0.047	0.046
<b><math>C_B</math></b>	62.217	108.704	75.429	47.325
<b>EMR</b>	8.0	8.0	7.9	7.9
<b>% var</b>	97.6	97.6	97.7	97.8

El modelo de BET se ajustó satisfactoriamente para casi todo el rango de actividad de agua estudiado con un EMR en torno al 8.0% y una varianza superior al 96% en todos los casos. Los valores identificados de  $W_B$  son similares para ambos músculos. En cambio difieren los valores identificados para la constante  $C_B$ .

Los valores de humedad en la monocapa en el modelo de GAB ( $W_G$ ) y de BET ( $W_B$ ), así como los valores de la constante  $C_G$  (GAB) y  $C_B$  (BET) son comparables (Timmermann et al., 2001). En las Tablas 5.2.16. y 5.2.17. se observa que el valor de la humedad de la monocapa identificada con el modelo de BET es inferior a la identificada con el modelo de GAB. En cambio se observan valores superiores para la constante  $C_B$  (BET) respecto a la constante  $C_G$  (GAB). Diferentes autores (Duras y Hiver, 1993; Lagoudaki et al., 1993; McLaughlin y Magee, 1998; Park et al., 2000; Rahman et al., 2002) han observado que  $W_B < W_G$  y que  $C_B > C_G$ , tal como se obtuvo en el presente trabajo. Estas inecuaciones suponen un dilema sobre cuál es el modelo que identifica las constantes de manera que la realidad física sea explicada con mayor exactitud. Timmerman et al., (2001) concluyeron que los valores identificados utilizando el modelo de GAB son los que proporcionan una mejor explicación del sentido físico de la realidad.

En el modelo de BET también se observa una relación entre la humedad de la monocapa ( $W_B$ ) y la temperatura, disminuyendo cuando aumenta la temperatura. El otro parámetro,  $C_B$ , del modelo no muestra claramente su dependencia con la temperatura. Por ello, se ajustó el modelo de BET que

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

considera el efecto de la temperatura (Ecuaciones 2.2.10., 2.2.11.). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.2.18.

**Tabla 5.2.18.** Parámetros del modelo de BET con efecto de la temperatura.

Parámetro	<i>Bíceps femoris</i>	<i>Semimembranosus</i>
$A_B$	0.009	0.007
$B_B$	4446	4833
$C_B$	0.0001	0.0458
$D_B$	32607	17873
EMR	5.9	8.1
% var	97.4	98.0

El ajuste de los parámetros del modelo fue bueno, ya que se obtuvo un error inferior al 8.5% y una varianza superior al 97%. A partir de  $A_B$ ,  $B_B$ ,  $C_B$  y  $D_B$  se calcularon los valores de  $W_B$  y  $C_B$  incluyendo el efecto de la temperatura, encontrándose tal y como se muestra en la Tabla 5.2.19., que las constantes del modelo de BET ( $W_B$  y  $C_B$ ) disminuían al aumentar la temperatura. Al aplicar el modelo teniendo en cuenta el efecto de la temperatura, los resultados obtenidos para los parámetros del modelo de BET ( $W_B$  y  $C_B$ ) fueron similares para el músculo *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* tal y como puede observarse en la Tabla 5.2.19.

**Tabla 5.2.19.** Parámetros del modelo de BET a las distintas temperaturas.

PARÁMETROS		25°C	30°C	35°C	40°C
<b>BF</b>	$W_B$	0.055	0.054	0.052	0.051
	$C_B$	62.757	50.507	40.935	33.401
<b>SM</b>	$W_B$	0.050	0.048	0.047	0.046
	$C_B$	62.214	55.232	49.223	44.030

Adam et al. (2000) también obtuvieron una disminución de los parámetros  $W_B$  y  $C_B$  con el aumento de la temperatura. En el Anejo 10.14. se muestran las representaciones gráficas de los ajustes obtenidos, tanto considerando como no considerando el efecto de la temperatura.

#### **5.2.1.6. Comparación de los resultados obtenidos**

Tras el análisis bibliográfico realizado con el fin de contrastar los resultados obtenidos en el presente estudio, se desprende que existe una gran variabilidad entre los resultados obtenidos por distintos autores en la determinación experimental y la modelización de las isothermas de sorción. En este sentido cabe destacar que en las conclusiones obtenidas en el proyecto europeo COST90 se puso de manifiesto esta situación debido a las diferentes metodologías utilizadas, distintas preparaciones de las muestras etc. (Gisbert, 2001).

Una vez ajustados los datos experimentales utilizando los cinco modelos propuestos, se procedió a comparar los resultados, para las distintas temperaturas, teniendo en cuenta el rango de actividades de agua donde se ajustó el modelo y la bondad de dicho ajuste. En las Tablas 5.2.20. y 5.2.21. se muestran comparativamente estos resultados para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

---

**Tabla 5.2.20.** Resultados obtenidos con los cinco modelos utilizados. Modelización sin considerar la influencia de la temperatura. Músculo *Bíceps femoris*.

MODELO	TEMPERATURA	RANGO $a_w$	% VAR
GAB	25°C	0.09 – 0.97	99.3
	30°C	0.10 – 0.98	99.2
	35°C	0.11 – 0.98	99.5
	40°C	0.13 – 0.98	99.5
BET	25°C	0.18 – 0.83	98.2
	30°C	0.20 – 0.85	96.5
	35°C	0.23 – 0.85	96.3
	40°C	0.26 – 0.85	96.7
Halsey modificado	25°C	0.09 – 0.91	97.7
	30°C	0.10 – 0.92	98.2
	35°C	0.11 – 0.92	98.0
	40°C	0.13 – 0.92	98.0
Oswin	25°C	0.18 – 0.97	99.2
	30°C	0.20 – 0.98	99.2
	35°C	0.23 – 0.98	99.5
	40°C	0.25 – 0.98	99.0
Henderson	25°C	0.29 – 0.97	96.7
	30°C	0.31 – 0.98	96.6
	35°C	0.34 – 0.98	97.4
	40°C	0.36 – 0.98	98.4

**Tabla 5.2.21.** Resultados obtenidos con los cinco modelos utilizados. Modelización sin considerar la influencia de la temperatura. Músculo *Semimembranosus*.

MODELO	TEMPERATURA	RANGO $a_w$	% VAR
GAB	25°C	0.13 – 0.96	98.9
	30°C	0.14 – 0.96	99.6
	35°C	0.16 – 0.96	98.9
	40°C	0.18 – 0.96	98.9
BET	25°C	0.18 – 0.80	97.6
	30°C	0.20 – 0.81	97.6
	35°C	0.23 – 0.81	97.7
	40°C	0.26 – 0.82	97.8
Halsey modificado	25°C	0.13 – 0.92	98.9
	30°C	0.14 – 0.93	99.0
	35°C	0.16 – 0.93	98.9
	40°C	0.18 – 0.93	98.8
Oswin	25°C	0.18 – 0.96	99.0
	30°C	0.20 – 0.96	99.1
	35°C	0.23 – 0.96	98.6
	40°C	0.26 – 0.96	98.3
Henderson	25°C	0.34 – 0.96	96.9
	30°C	0.35 – 0.96	96.9
	35°C	0.37 – 0.96	97.7
	40°C	0.39 – 0.96	98.0

En las Tablas 5.2.20. y 5.2.21. se muestra que el único modelo que se ajustó en todo el rango de actividades de agua estudiado fue el modelo de GAB. Además, también se obtuvieron los mejores resultados en el ajuste, con un porcentaje de varianza explicada en torno al 99%. Los ajustes con los otros modelos fueron satisfactorios, con un porcentaje de varianza explicada superior al

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

96% en todos los casos. Los modelos de BET y Henderson fueron los que se ajustaron en un intervalo de actividad de agua menos amplio.

En la Tabla 5.2.22 se muestran el porcentaje de varianza explicada obtenido para los dos músculos estudiados con cada uno de los modelos considerados teniendo en cuenta el efecto de la temperatura al ajustar los datos experimentales. Se observa que aunque en todos los casos se consiguieron ajustes satisfactorios, el modelo de GAB es el que proporciona los mejores ajustes. Para el músculo *Semimembranosus* con el modelo de Halsey se obtuvo un ajuste ligeramente superior a con el modelo de GAB, aunque cabe destacar que con este último el rango de actividad de agua considerado fue más amplio.

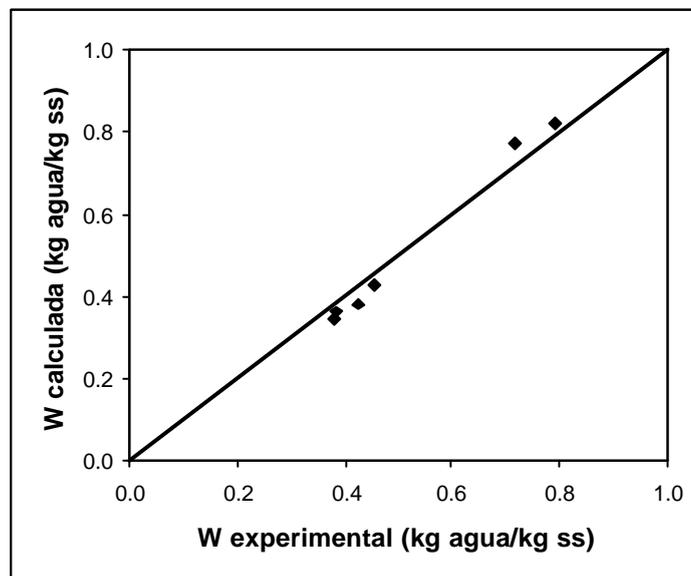
**Tabla 5.2.22.** Porcentaje de varianza explicada obtenido con cada uno de los modelos propuestos teniendo en cuenta el efecto de la temperatura.

	GAB	BET	Halsey modificado	Oswin	Henderson
<b><i>Bíceps femoris</i></b>	99.4	97.4	98.1	99.2	97.6
<b><i>Semimembranosus</i></b>	98.6	98.0	98.9	97.7	97.8

Otros autores han encontrado resultados similares. Trujillo et al., (2003) tras modelizar la isoterma de sorción de carne de ternera con tres modelos, GAB, Peleg y Lewicki, observaron que el mejor ajuste fue proporcionado con el modelo de GAB. Lopes-Filho et al. (2002) también encontraron mejores resultados al aplicar el modelo de GAB en isotermas de carne de caimán. En un estudio realizado en atún, Rahman et al. (2002) compararon los resultados proporcionados por tres modelos, obteniendo un mejor ajuste al utilizar el modelo de GAB. Gisbert (2001) observó que el modelo de GAB era el que mejor se ajustaba en un estudio realizado en lomo de cerdo salado. Comaposada (1999) también obtuvo que el modelo de GAB, junto con el de Mújica era el que mejor se ajustaba a las isotermas experimentales de músculo *Gluteus medius*. Además, el proyecto COST90 aconsejó la aplicación de este modelo en la modelización de las isotermas de sorción de productos agroalimentarios (Gisbert, 2001).

### 5.2.2. Isotermas de carne salada

Dado que las isotermas experimentales obtenidas en el presente trabajo a 25°C para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus* eran muy similares a la obtenida por Comaposada (1999) a 26°C para el músculo *Gluteus medius*, se decidió utilizar la isoterma de carne de cerdo salada obtenida por este autor. No obstante, en primer lugar se procedió a verificar que sus valores eran semejantes a los de los músculos considerados en el presente estudio. Por ello, a partir de los valores de contenido en sal y  $a_w$  de las muestras preparadas para comprobar la isoterma propuesta por Comaposada et al (2000a) (apartado 4.3.5.), se determinó un valor de humedad aplicando el modelo de GAB con los parámetros obtenidos por estos autores para el músculo *Gluteus medius*. Este valor de humedad se comparó con el obtenido experimentalmente para cada una de las muestras de comprobación preparadas. Los resultados de dicha comparación se muestran en la Figura 5.2.4.



**Figura 5.2.4.** Comprobación de la isoterma propuesta por Comaposada et al. (2000a).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Como puede observarse, la isoterma describe satisfactoriamente (porcentaje de varianza explicada del 93.9%) el comportamiento de los datos experimentales. Por lo tanto será utilizada en los cálculos en los que sea necesaria. En esta isoterma, los parámetros del modelo de GAB dependen de la temperatura, T (K), tal y como se muestra en el apartado 2.2.3.1. La influencia del contenido en sal,  $w_s$  (kg NaCl/kg ss), en dichos parámetros se describe de manera lineal según las Ecuaciones 5.2.6., 5.2.7., 5.2.8., 5.2.9., 5.2.10. y 5.2.11., en las que los valores numéricos ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ) fueron obtenidos por Comaposada et al (2000a).

$$A_G = a_1 * w_s + a_2 \quad \text{Ec. 5.2.6.}$$

$$B_G = b_1 * w_s + b_2 \quad \text{Ec. 5.2.7.}$$

$$C_G = c_1 * w_s + c_2 \quad \text{Ec. 5.2.8.}$$

$$D_G = d_1 * w_s + d_2 \quad \text{Ec. 5.2.9.}$$

$$E_G = e_1 * w_s + e_2 \quad \text{Ec. 5.2.10.}$$

$$F_G = f_1 * w_s + f_2 \quad \text{Ec. 5.2.11.}$$

### 5.2.3. Calor isostérico de sorción

Con el fin de conocer la energía de sorción de las moléculas de agua a la matriz sólida, es interesante determinar el calor isostérico de sorción. El calor isostérico de sorción es un parámetro que permite extraer informaciones relacionadas con el tiempo y la energía necesaria para alcanzar un determinado contenido en humedad durante el proceso de secado. Por ello es conveniente calcularlo previamente al secado de un determinado material (Mascan y Göğüs, 1998).

El calor isostérico de desorción se calculó a partir de los datos obtenidos de las isotermas a las distintas temperaturas, tal y como se expone en el apartado 4.3.6. Para ello se representó el  $\ln(a_w)$  frente a la inversa de la temperatura, ajustando los puntos a una recta. Todas las rectas obtenidas correspondientes a las diferentes humedades se muestran en las Figuras 5.2.5. (*Biceps femoris*) y 5.2.6. (*Semimembranosus*).

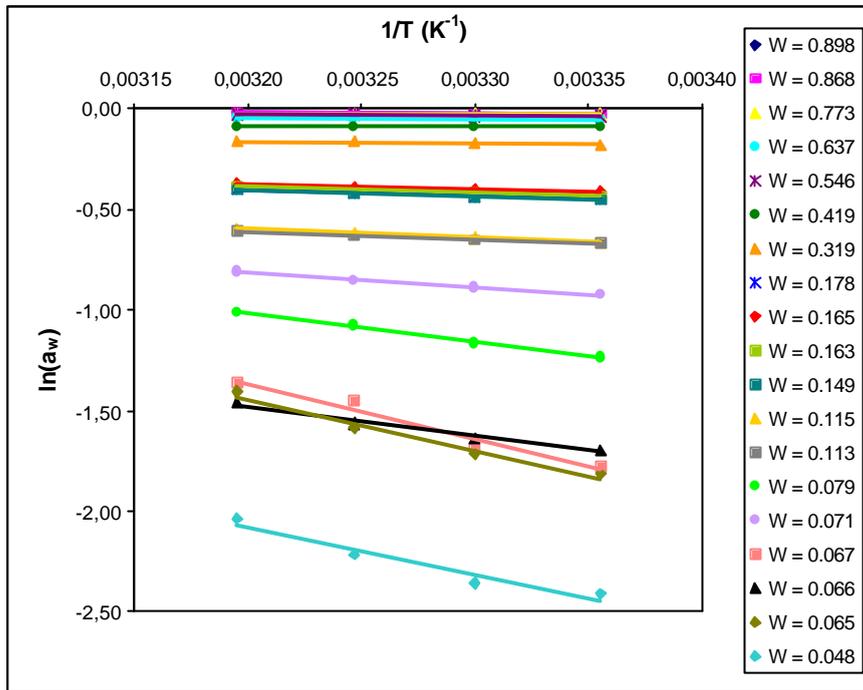


Figura 5.2.5. Representación gráfica del  $\ln(a_w)$  frente a  $1/T$  ( $K^{-1}$ ) para el cálculo de los calores isostéricos de desorción (*Biceps femoris*).

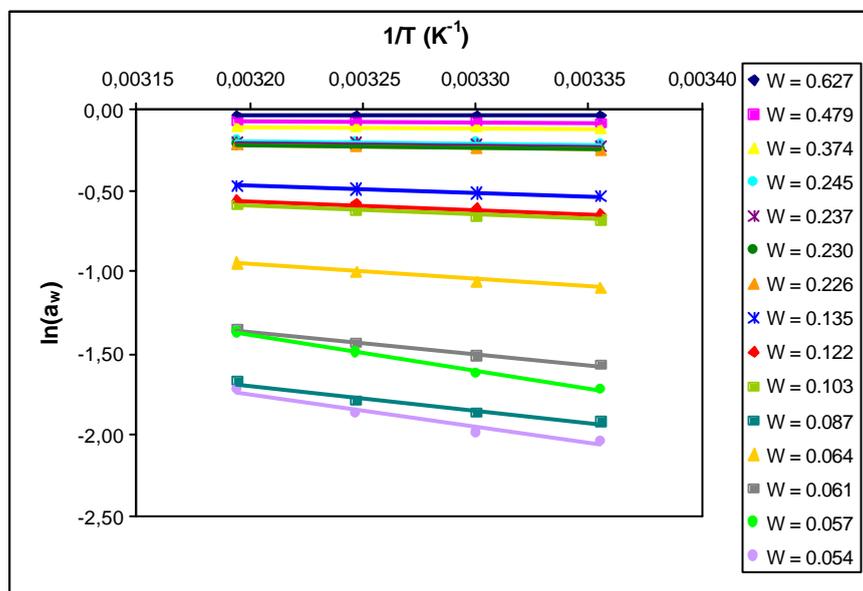
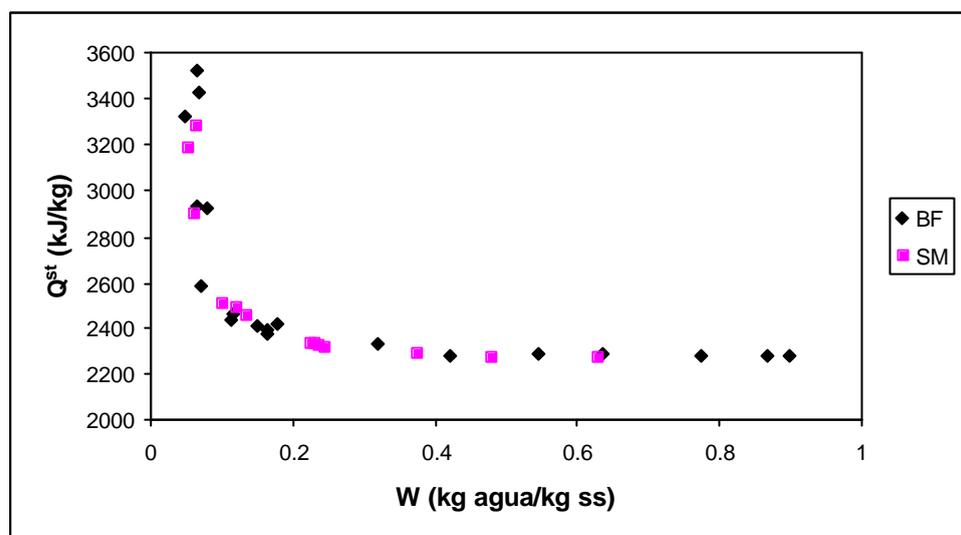


Figura 5.2.6. Representación gráfica del  $\ln(a_w)$  frente a  $1/T$  ( $K^{-1}$ ) para el cálculo de los calores isostéricos de desorción (*Semimembranosus*).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los valores de las pendientes de las rectas obtenidas mediante la ecuación de Clausius-Clayperon se calculó el calor isostérico neto. En el Anejo 10.15. se muestran los resultados obtenidos. Dichos resultados también se muestran en la Figura 5.2.7., en la que se representa el calor isostérico frente a la humedad para los dos músculos estudiados.



**Figura 5.2.7.** Representación del calor isostérico de desorción (kJ/kg) frente a la humedad (kg agua/kg ss) para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*.

En la Figura 5.2.7. puede observarse que el calor isostérico disminuye al aumentar la humedad, tal y como ha sido observado en diversos alimentos: patata (Sánchez et al., 1997; McLaughlin y Magee, 1998), mora (Mascan y Gögüs, 1998), coliflor (Mulet et al., 1999b), carne de cerdo (Comaposada, 1999), ternera y cerdo cocidos y curados (Delgado y Sun, 2002a). Este hecho indica que cuanto mayor es el contenido en agua, menor es la energía necesaria para eliminarla a esa concentración.

En la Figura 5.2.7. se observan dos zonas. Para contenidos en humedad superiores a 0.10 kg agua/kg ss, el calor isostérico de la carne permanece prácticamente constante, acercándose al valor del calor latente de vaporización del agua pura (2259.29 kJ/kg, valor medio entre 25 y 40°C). Para humedades

inferiores, el calor isostérico de sorción aumenta significativamente al disminuir el contenido en humedad.

El aumento del calor isostérico al disminuir la humedad puede explicarse teniendo en cuenta que inicialmente la sorción tiene lugar en los sitios disponibles más activos, lo cual lleva aparejado elevadas energías de sorción. Conforme estos lugares van siendo ocupados, la sorción tiene lugar en sitios menos activos con una menor energía asociada (Wang y Brennan, 1991). Esto significa que el agua en la región de humedad baja (región de la monocapa) está más fuertemente ligada a la matriz sólida que en la zona de humedad alta (Cadden, 1988).

Además, se observa que los valores de los calores isostéricos de desorción en los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* son muy similares. Estos valores coinciden con los obtenidos por Comaposada (1999).

### **5.3. Contracción durante el secado**

Durante el secado de alimentos, mientras el agua es eliminada del producto, se producen tensiones en la estructura, que tiende a colapsar, lo que provoca el encogimiento del material, deformaciones y a veces incluso su rotura. Si existe algún factor que refuerza la estructura, como por ejemplo las bajas temperaturas, el colapso puede ser disminuido. Por esta razón, durante el secado a vacío así como durante la liofilización, se suele producir una menor contracción de los productos (Mayor y Sereno, 2004).

Con objeto de caracterizar el producto deshidratado, resulta interesante disponer de una función de contracción. En el presente estudio, la determinación de la función de contracción se realizó a partir de una serie de medidas tomadas al comienzo, durante y al final del proceso de secado, tal y como se describe en el apartado 4 (Materiales y Métodos).

#### **5.3.1. Secado en secadero convectivo**

En primer lugar se determinó la contracción para las muestras secadas en secadero convectivo, tanto para geometría cilíndrica finita como infinita.

##### **5.3.1.1. Contracción durante el secado de cilindros finitos**

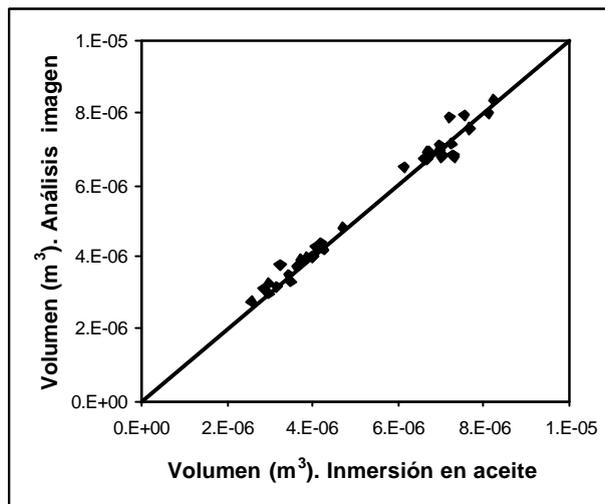
A continuación se expondrán los resultados correspondientes a las medidas de contracción para cilindros de geometría finita secados en secadero convectivo.

###### **5.3.1.1.1. Comparación de métodos de medida**

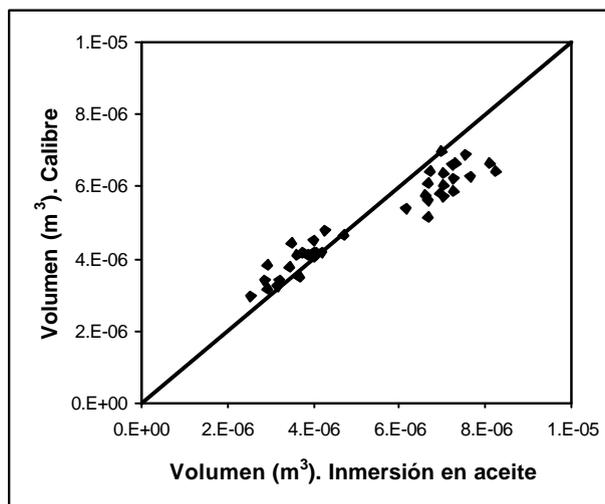
El volumen inicial y final de los cilindros de los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus* se determinó utilizando tres métodos de medida, con el fin de comparar los resultados obtenidos con cada uno de ellos y poder determinar la fiabilidad de las medidas realizadas. Con el calibre y mediante análisis de imagen, se midieron el diámetro y la longitud de cada muestra, calculándose el volumen a partir de estas medidas. Por inmersión en aceite el volumen se determinó por

diferencia de peso. Todos los métodos de medida se exponen en el apartado 4.4.2.4.1.

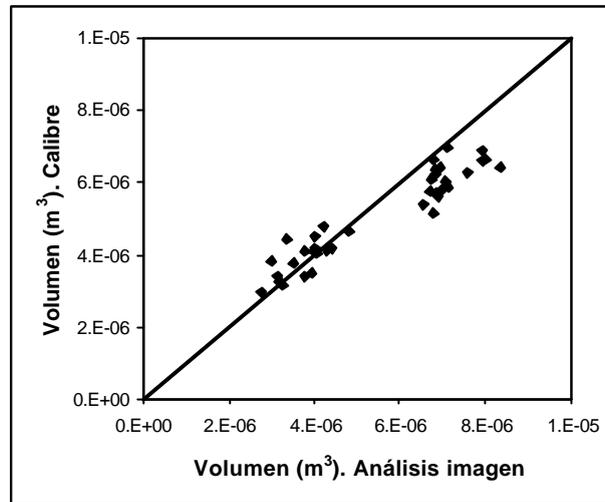
En las Figuras 5.3.1., 5.3.2. y 5.3.3. se muestran de forma comparativa los resultados obtenidos para los volúmenes inicial y final utilizando los tres métodos indicados.



**Figura 5.3.1.** Comparación entre los resultados obtenidos para el volumen por análisis de imagen e inmersión en aceite.



**Figura 5.3.2.** Comparación entre los resultados obtenidos para el volumen por medida directa con un calibre e inmersión en aceite.



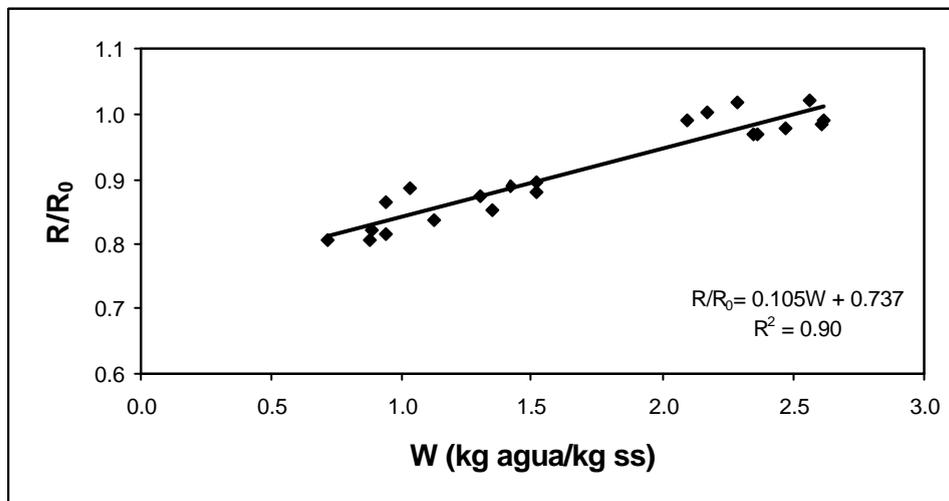
**Figura 5.3.3.** Comparación entre los resultados obtenidos para el volumen por medida directa con un calibre y análisis de imagen.

En la Figura 5.3.1. se observa que utilizando el análisis de imagen para medir el volumen de las muestras estudiadas se obtienen resultados similares que al utilizar la medida del volumen del aceite desplazado. En cambio, la medida directa con calibre proporciona resultados no sólo diferentes a los otros dos métodos sino también más dispersos. Esto sería debido a que la medida directa del diámetro y la longitud es más subjetiva que las otras dos. En realidad se observa que hay una mejor concordancia de las medidas realizadas con el calibre con las obtenidas mediante los otros dos métodos cuando las muestras están más deshidratadas. En ese caso en las Figuras 5.3.2. y 5.3.3. se puede observar que los puntos se encuentran sobre la diagonal. Sin embargo, las medidas de los volúmenes iniciales son sistemáticamente menores al ser realizadas con el calibre (Figuras 5.3.2. y 5.3.3.), lo que indicaría que al ser la carne menos consistente en ese momento, el mismo procedimiento empleado falsea la medida. Parece como que el calibre se ajusta demasiado a la pieza de carne, lo que proporciona un volumen menor. Es decir, el operador introduce un sesgo en la medida. Esto indicaría que el método del calibre sólo resultaría útil cuando la carne ya ha sido deshidratada, en las condiciones ensayadas.

Aunque el análisis de imagen proporciona resultados similares al de inmersión en aceite, presenta la ventaja de que las medidas son repetibles. Es decir, las medidas tomadas sobre fotografías realizadas antes, durante y después del proceso de secado pueden reexaminarse en cualquier momento. En cambio, no existe la oportunidad de repetir la medida por el método de inmersión en un fluido una vez que ésta se ha realizado. Por ello se considera que el método de análisis de imagen a partir de fotografías es el más adecuado de los tres considerados.

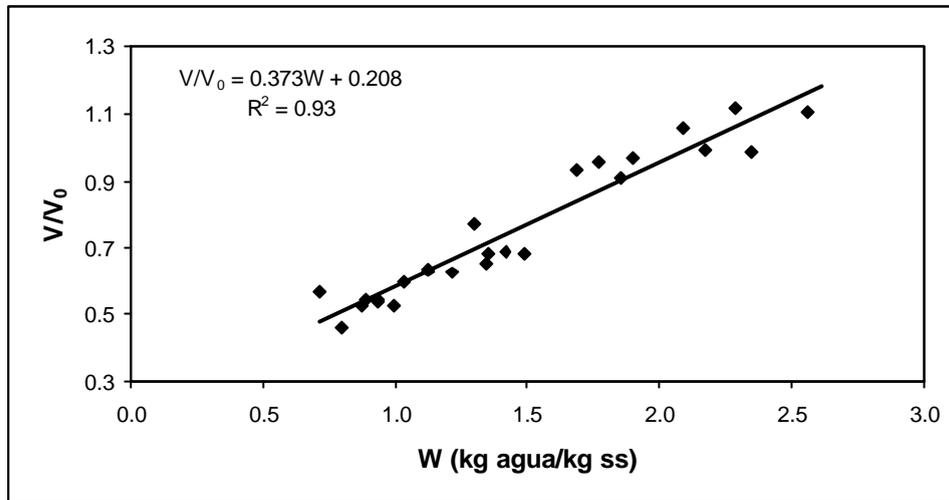
**5.3.1.1.2. Ajuste de las funciones de contracción**

Las funciones de contracción se determinaron a partir de fotografías tomadas al inicio y al final del proceso de secado. Como radio inicial ( $R_0$ ) y como volumen inicial ( $V_0$ ) se tomó la media de todos los valores obtenidos para las 18 muestras analizadas. En las Figuras 5.3.4. y 5.3.5. se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 5.3.4.** Contracción del radio durante el secado de cilindros de geometría finita de carne de cerdo (BF y SM) en secadero convectivo a distintas velocidades de aire.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 5.3.5.** Contracción de volumen durante el secado de cilindros de geometría finita de carne de cerdo (BF y SM) en secadero convectivo a distintas velocidades de aire.

En las Figuras 5.3.4. y 5.3.5. se observa que los cocientes  $R/R_0$  y  $V/V_0$  se relacionan linealmente con el contenido en humedad satisfactoriamente ( $R^2 > 0.90$ ).

La variación de la longitud de las muestras se calculó a partir de los ajustes obtenidos para el radio y el volumen tal y como muestra las Ecuaciones 5.3.1. y 5.3.2.

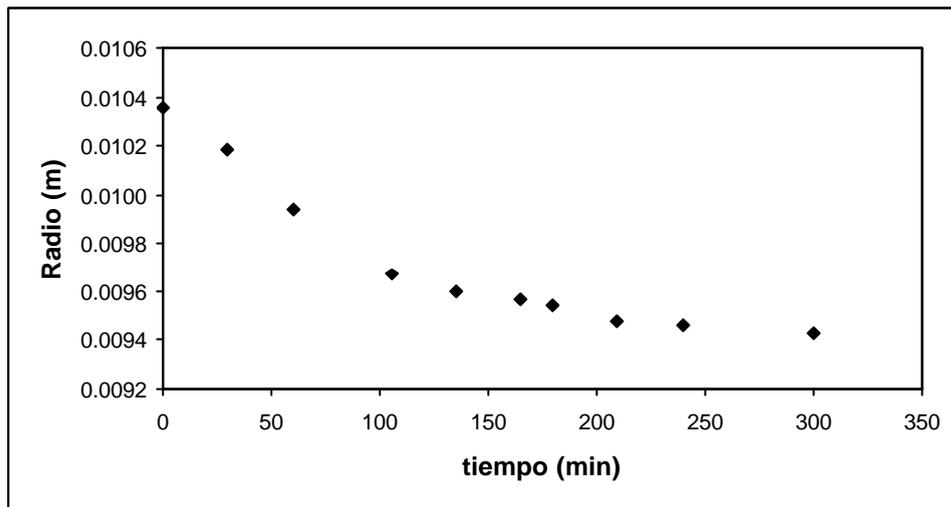
$$\frac{L}{L_0} = \frac{V}{V_0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 \quad \text{Ec. 5.3.1.}$$

$$\frac{L}{L_0} = (0.373 * W + 0.208) * \left( \frac{1}{0.105 * W + 0.737} \right)^2 \quad \text{Ec. 5.3.2.}$$

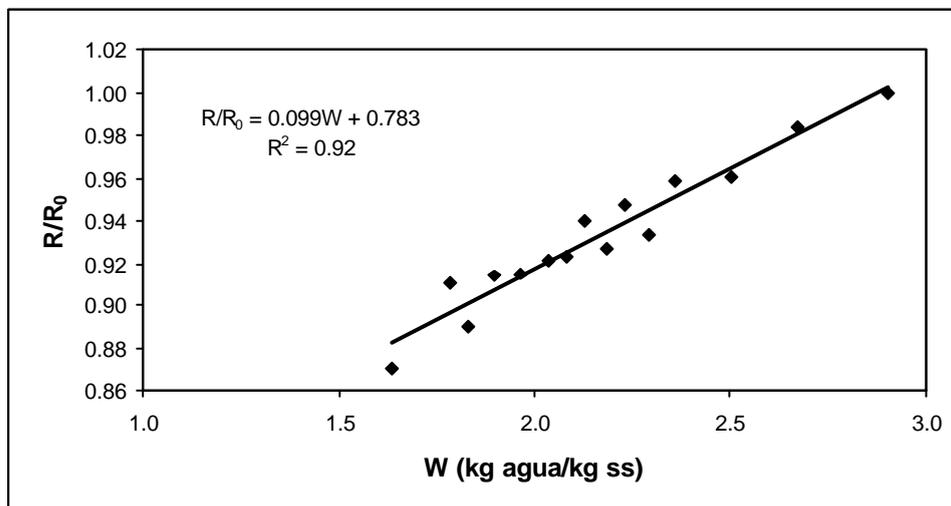
### 5.3.1.2. Contracción durante el secado de cilindros infinitos

Con el fin de determinar la variación del radio a lo largo del proceso de secado, se tomaron fotografías de las muestras en distintos momentos del mismo. Como ejemplo, en la Figura 5.3.6. se representa la variación del radio a lo largo

del proceso de secado. El ajuste de la variación del radio con el contenido en humedad para esa misma muestra se puede observar en la Figura 5.3.7.



**Figura 5.3.6.** Variación del radio durante el secado de un cilindro de geometría infinita de *Bíceps femoris* de 2 cm de diámetro con velocidad del aire de 2 m/s.



**Figura 5.3.7.** Relación del contenido en humedad con la variación del radio durante el secado de un cilindro de geometría infinita de *Bíceps femoris* de 2 cm de diámetro con velocidad del aire de 2 m/s.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

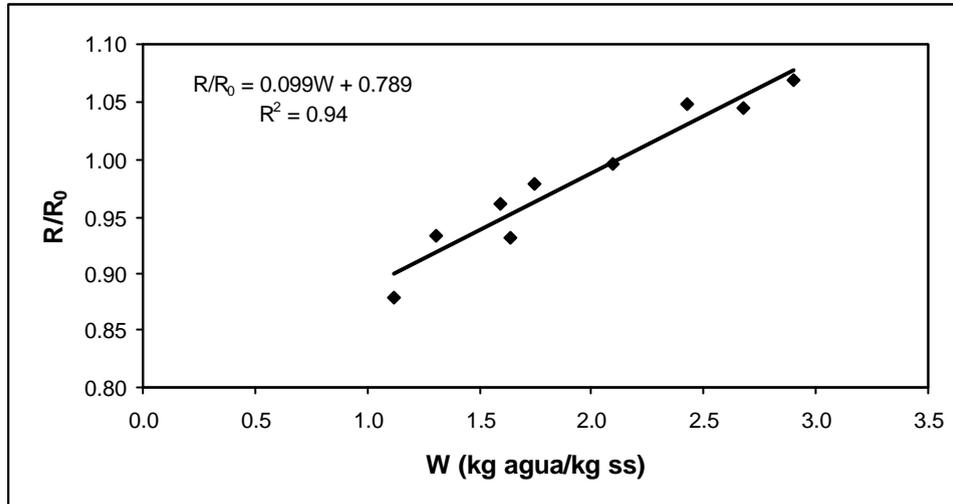
En la Figura 5.3.6. se observa que el radio disminuye más rápidamente al principio del proceso de secado. Al principio del proceso de secado la humedad de las muestras decrece a mayor velocidad y por lo tanto éstas se contraen más. Se obtuvo una relación lineal entre la variación del radio y el contenido en humedad a lo largo del proceso de secado, tal y como se puede observar en la Figura 5.3.7.

Dado que la velocidad del aire de secado influye en la resistencia externa a la transferencia de materia, se evaluó si además influía en la contracción de los cilindros. Para ello, se ajustaron los datos del cociente  $R/R_0$  frente a la humedad para cada una de las velocidades. En la Tabla 5.3.1. se muestran los valores obtenidos para la pendiente y la ordenada en el origen así como los intervalos de confianza calculados para un 95% de nivel de confianza.

**Tabla 5.3.1.** Ajuste de la función de contracción para cilindros de geometría infinita. Influencia de la velocidad de aire.

v (m/s)	PENDIENTE $\pm$ IC (95%)	ORDENADA ORIGEN $\pm$ IC (95%)	R <sup>2</sup>
0.6	0.092 $\pm$ 0.010	0.744 $\pm$ 0.024	0.91
2.0	0.092 $\pm$ 0.011	0.741 $\pm$ 0.024	0.90
2.8	0.106 $\pm$ 0.010	0.764 $\pm$ 0.017	0.90

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.3.1. se descarta una influencia de la velocidad del aire utilizada, dentro del intervalo ensayado, en la contracción de la carne durante su secado. Por este motivo se decidió obtener una función de contracción única para todas las muestras. Para ello se calculó un radio inicial medio según el tamaño de muestra y con éste se calculó el cociente  $R/R_0$  antes y después del secado. Estos cocientes se relacionaron linealmente con el contenido en humedad de las muestras tal y como se muestra en la Figura 5.3.8.

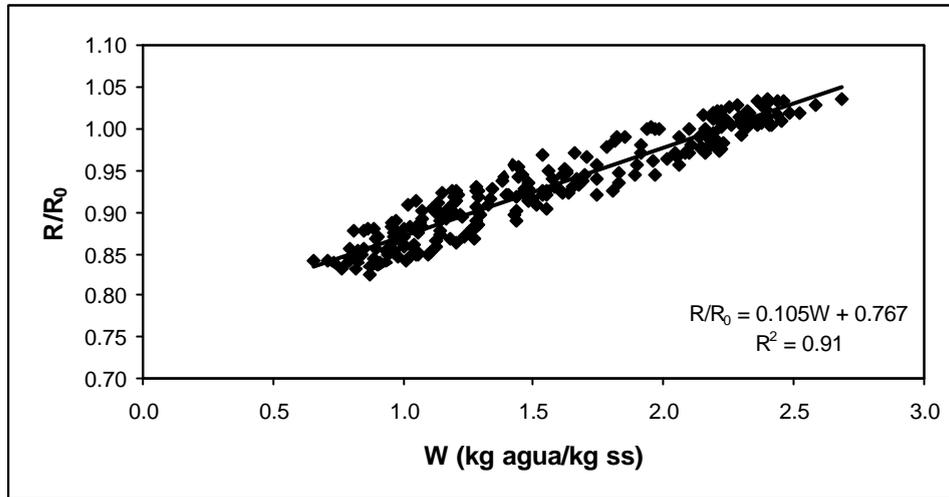


**Figura 5.3.8.** Relación entre el cociente  $R/R_0$  y el contenido en humedad durante el secado de cilindros de geometría infinita en secadero convectivo por aire caliente.

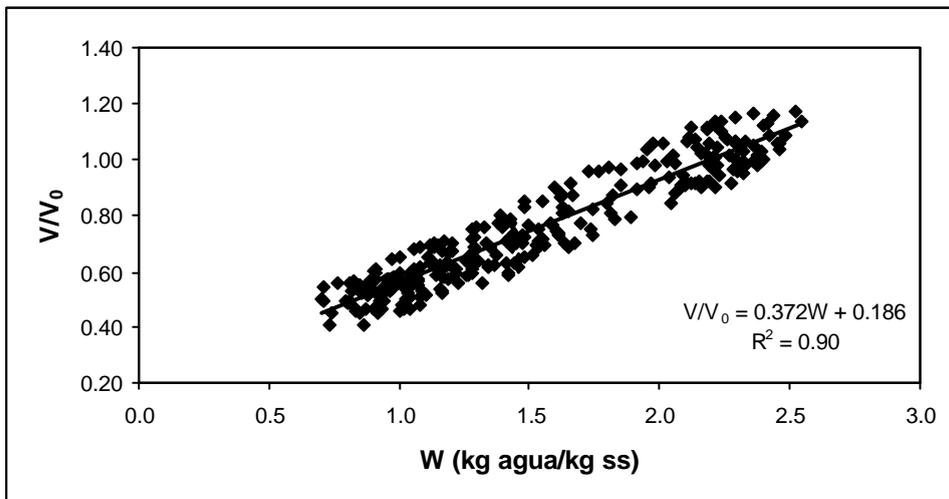
### **5.3.2. Secado de cilindros finitos en cámara de secado**

A partir de las fotografías obtenidas antes, durante y al final del proceso de secado se determinó una función de contracción, que relacionaba la contracción con el contenido en humedad. La función se determinó a partir de todas las muestras estudiadas en todos los momentos en que se disponía de medida.

Se ajustaron los cocientes  $R/R_0$  y  $V/V_0$  frente al contenido en humedad. Se utilizó el mismo radio y volumen inicial para todas las muestras obtenidas de un mismo tamaño. Estos valores se determinaron como la media del radio y del volumen de todas las muestras obtenidas con la misma corona Starret y de una altura determinada. En las Figuras 5.3.9. y 5.3.10. se muestran los resultados de los ajustes realizados.



**Figura 5.3.9.** Contracción del radio durante el secado de cilindros de carne de cerdo (BF y SM) salados en cámaras de secado.



**Figura 5.3.10.** Contracción del volumen durante el secado de cilindros de carne de cerdo (BF y SM) salados en cámaras de secado.

En las Figuras 5.3.9. y 5.3.10. se observa que los ajustes obtenidos tanto para el volumen como para el radio son satisfactorios ( $R^2 > 0.90$ ).

La contracción en la dirección longitudinal se determinó a partir de la contracción del radio y del volumen (Ecuación 5.3.3.).

$$\frac{L}{L_0} = (0.372 * W + 0.186) * \left( \frac{1}{0.105 * W + 0.767} \right)^2 \quad \text{Ec. 5.3.3.}$$

### 5.3.3. Comparación de las funciones de contracción

En la Tabla 5.3.2. se muestran los resultados obtenidos para las funciones de contracción en todas las condiciones de secado estudiadas.

**Tabla 5.3.2.** Relación entre la variación de las dimensiones y el contenido en humedad para las distintas muestras.

SECADO	RELACIÓN	PTE ± IC (95%)	ORD OR ± IC (95%)	R <sup>2</sup>
Secadero. Cilindros infinitos	R/R <sub>0</sub>	0.099 ± 0.022	0.789 ± 0.045	0.94
Secadero. Cilindros finitos	R/R <sub>0</sub>	0.105 ± 0.016	0.737 ± 0.029	0.91
Cámaras. Cilindros finitos	R/R <sub>0</sub>	0.105 ± 0.005	0.767 ± 0.008	0.91
Secadero. Cilindros finitos	V/V <sub>0</sub>	0.372 ± 0.044	0.208 ± 0.068	0.93
Cámaras. Cilindros finitos	V/V <sub>0</sub>	0.372 ± 0.017	0.186 ± 0.026	0.90

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.3.2., cabría pensar que las condiciones de secado no influyen en la variación de las dimensiones durante el secado de carne para las condiciones ensayadas. Algunos autores han encontrado resultados similares para otros productos agroalimentarios. Por ejemplo, Hatamipour y Mowla (2002) encontraron que no existía influencia ni de la temperatura del aire de secado ni del diámetro de las muestras en la contracción de cilindros de zanahoria durante su secado en lecho fluidizado. Estos autores (Hatamipour y Mowla (2003)) constataron que este hecho también tenía lugar durante el secado de maíz y de guisantes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Hatamipour y Mowla (2002) consideraron una única función de contracción, tomando como valor para los coeficientes de las funciones de contracción la media de los obtenidos para cada una de las condiciones de secado y geometría estudiadas. Así, en el presente estudio se consideraron como funciones de contracción, para todas las condiciones de secado y geometrías utilizadas, las descritas en las Ecuaciones 5.3.4. y 5.3.5.

$$\frac{R}{R_0} = 0.103 * W + 0.764 \quad \text{Ec. 5.3.4.}$$

$$\frac{V}{V_0} = 0.372 * W + 0.197 \quad \text{Ec. 5.3.5.}$$

En la bibliografía se encuentran trabajos de algunos autores que también han encontrado una relación lineal entre la contracción y el contenido en humedad durante el secado, para distintos productos agroalimentarios. Por ejemplo, Gisbert (2001) obtuvo la función de contracción volumétrica para lomo de cerdo salado que viene descrita en la Ecuación 5.3.6.

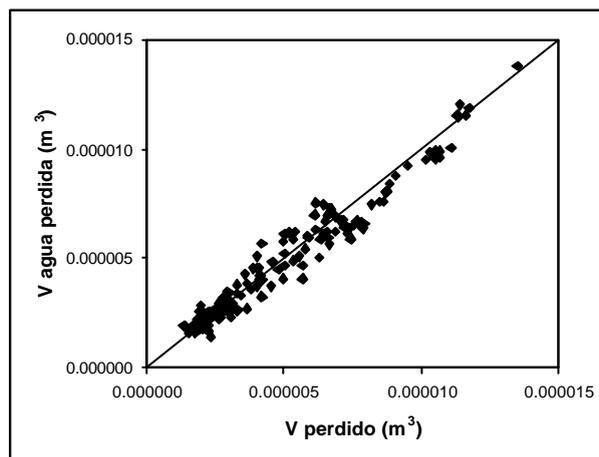
$$\frac{V}{V_0} = 0.29 * W + 0.22 \quad \text{Ec. 5.3.6.}$$

En cambio, otros autores han observado durante las últimas etapas del secado, en las cuales el contenido en humedad del producto es muy bajo, que la contracción no se relaciona de forma lineal con el contenido en humedad (Lozano et al., 1983; Ratti, 1994; Wang y Brennan, 1995; Achanta et al., 1997). Levi y Karel (1995) encontraron que la movilidad de la matriz sólida es un proceso dinámico que depende de la diferencia ( $T - T_g$ ) siendo  $T$  la temperatura de la muestra durante la deshidratación y  $T_g$  la temperatura de transición vítrea. Otros autores (Karathanos et al., 1993; Achanta et al., 1997; Del Valle et al., 1998; Willis et al., 1999) también han relacionado la cantidad de contracción durante el secado con aire con la diferencia ( $T - T_g$ ). Cuando el contenido en humedad es elevado el

material está en estado gomoso, la contracción compensa la pérdida de humedad y por ello el volumen disminuye linealmente con el contenido en humedad. En cambio cuando la humedad es baja, la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) aumenta, lo que provoca que el material pase de estado gomoso a estado vítreo y como consecuencia se produce una disminución de la contracción (Mayor y Sereno, 2004). Algunos autores han observado a partir de la medida de la temperatura de transición vítrea en productos cárnicos, que las transiciones de fase en ellos se producen por debajo de  $0^\circ\text{C}$  (pollo (Delgado y Sun, 2002b), atún (Rahman et al., 2003)). Por ello, se puede concluir que en las condiciones de secado ensayadas en el presente estudio no se producen transiciones de fase. Por un lado, se trabaja con temperaturas de secado superiores a  $0^\circ\text{C}$ . Además, la pérdida de volumen y el contenido en humedad se relacionaron de forma lineal.

#### 5.3.4. Relación entre el agua perdida y la disminución de volumen

Con el fin de determinar la relación entre el agua perdida durante el secado y la contracción experimentada por las muestras a lo largo de dicho proceso, se determinó el volumen del agua perdida y se representó frente al decremento de volumen que tuvo lugar durante el secado. Esta representación se muestra en la Figura 5.3.11.



**Figura 5.3.11.** Representación del volumen de agua perdida frente al volumen perdido durante el secado para todas las cinéticas estudiadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

Tal y como se observa en la Figura 5.3.11. el volumen perdido por el cilindro es similar al volumen del agua perdida durante el secado. El coeficiente de correlación entre ellos es  $R^2 = 0.96$ . Por lo tanto, podría considerarse en las condiciones ensayadas en el presente estudio, que la disminución del contenido en humedad es la responsable de la disminución del volumen de las muestras, independientemente de las condiciones de secado que se hayan utilizado para su deshidratación.

La contracción de los alimentos aumenta al aumentar el volumen de agua eliminada, de manera que cuanto mayor es la cantidad de agua eliminada, mayores son las tensiones de contracción que se originan en el material. En algunos casos, el equilibrio mecánico se alcanza cuando el encogimiento del material es igual al volumen de agua eliminada (Mayor y Sereno, 2004).

En la bibliografía existen estudios sobre la relación entre el volumen perdido y la cantidad de agua eliminada. Por ejemplo, para zanahorias el volumen de agua eliminada se corresponde con el volumen perdido por las muestras durante el proceso de secado (Lozano et al., 1983; Krokida y Maroulis, 1997). En otros estudios se observó que el volumen de agua eliminada durante las últimas etapas del secado era superior que la reducción del volumen de las muestras, para diferentes alimentos como calamar (Rahman y Potluri, 1990; Rahman et al., 1996), patata (Lozano et al., 1983; Wang y Brennan, 1995) o manzana (Lozano et al., 1980; Krokida y Maroulis, 1997; Moreira et al., 2000). Este comportamiento puede explicarse por la disminución de la movilidad de la matriz sólida para contenidos bajos de humedad. La movilidad de la matriz sólida se encuentra directamente relacionada con su estado físico. Una elevada movilidad se corresponde con un comportamiento viscoelástico típico del estado gomoso, mientras que una baja movilidad se corresponde con un comportamiento elástico, típico del estado vítreo. Cuando durante el proceso de secado se alcanzan contenidos bajos de humedad, en los cuales se produce la transición del estado gomoso al estado vítreo, la rigidez del material frena la contracción (Mayor y Sereno, 2004), lo que conlleva que al ser la matriz sólida más rígida ésta resiste las tensiones creadas por la disminución de humedad.

## **5.4. Secado en secadero convectivo**

Se analizaron las cinéticas de deshidratación determinadas en un secadero convectivo (apartado 4.4.2.) a distintas condiciones de secado, tanto para geometría cilíndrica infinita como finita.

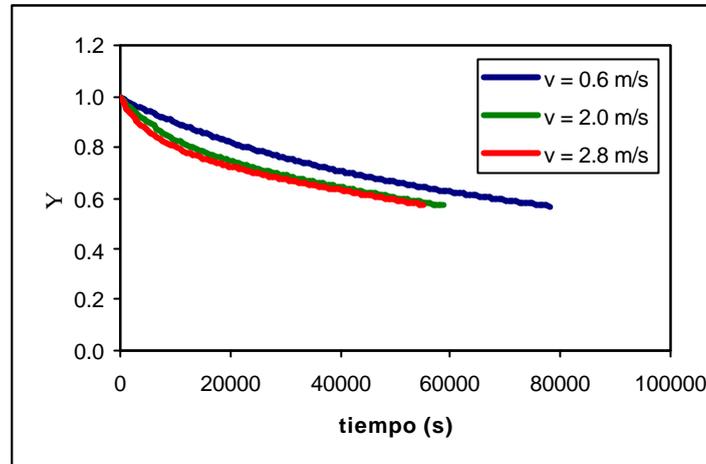
### **5.4.1. Secado de cilindros infinitos**

A continuación se expondrán los resultados correspondientes a geometría cilíndrica infinita.

#### **5.4.1.1. Cinéticas de secado**

Con el fin de evitar el encostramiento de la carne las cinéticas de secado se deben determinar en unas condiciones moderadas de temperatura y velocidad de aire. La temperatura elegida fue 25°C. Para estudiar la influencia de la velocidad del aire en las cinéticas, las muestras se secaron empleando tres velocidades diferentes: 0.6, 2 y 2.8 m/s.

Como ejemplo, en la Figura 5.4.1. se muestran las curvas de secado correspondientes a tres muestras (de las 18 analizadas) de 3 cm de diámetro, cada una de ellas secadas con una velocidad de aire diferentes. Para ello se representa la humedad adimensional,  $\Psi = (W - W_e)/(W_0 - W_e)$ , frente al tiempo. El valor de  $W_e$  viene determinado por la isoterma de sorción del músculo *Bíceps femoris* a 25°C (modelizada utilizando el modelo de GAB) y por la humedad relativa del aire de secado.



**Figura 5.4.1.** Curvas de secado de cilindros infinitos de *Bíceps femoris*. Efecto de la velocidad del aire de secado.

En la Figura 5.4.1. se observa la existencia de una influencia de la velocidad del aire de secado en las cinéticas. Al aumentar la velocidad del aire de 0.6 m/s a 2 m/s, la pérdida de humedad se produce más rápidamente. En cambio entre velocidad 2 y 2.8 m/s las cinéticas de secado son prácticamente coincidentes. Es decir, parece que no existe influencia, a esas velocidades, de la velocidad del aire de secado en la deshidratación. En la bibliografía aparece reseñado un umbral de velocidad de aire relacionado con las resistencias internas y externas que se sitúa alrededor de 1.5 m/s (patata (Rosselló et al., 1992), zanahoria y patata (Mulet, 1994), coliflor (García-Reverter, 1996), brócoli (Mulet et al., 1999a). Las experiencias mostradas en la Figura 5.4.1. confirmarían este extremo. El realizar experiencias por debajo y por encima de dicho umbral es interesante para una mejor validación de los modelos.

#### 5.4.1.2. Modelización de las cinéticas de secado

Con el fin de analizar el comportamiento de los músculos del jamón durante el secado se consideraron tres modelos. Según sus características se resolvieron analítica y/o numéricamente: sin considerar ni la influencia de la contracción ni de la resistencia externa (resuelto analítica y numéricamente), considerando la influencia de la contracción pero no de la resistencia externa

(resuelto numéricamente) y considerando la influencia de la resistencia externa a la transferencia de materia pero no la de la contracción durante el secado (resuelto numéricamente). La resolución analítica se realizó utilizando el método de separación de variables y la numérica mediante el método de los elementos finitos.

**5.4.1.2.1. Modelo sin contracción y sin resistencia externa**

La resolución del modelo que no tenía en cuenta ni la influencia de la contracción ni de la resistencia externa a la transferencia de materia se llevó a cabo analítica y numéricamente. En la Tabla 5.4.1. se muestran los resultados del ajuste obtenidos utilizando ambos métodos de resolución de los modelos. El porcentaje de varianza explicada obtenido en los ajustes (Anejo 10.16.) fue en todos los casos superior al 90%.

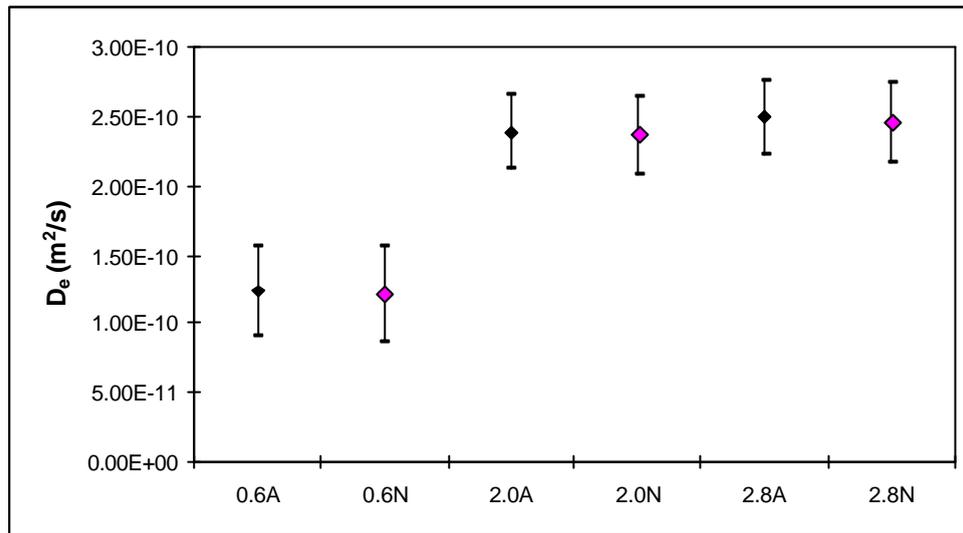
**Tabla 5.4.1.** Valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las velocidades utilizadas. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.

VELOCIDAD (m/s)	RESOLUCIÓN	$D_e \cdot 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)
0.6	Analítica	1.23 ± 0.31
0.6	Numérica	1.22 ± 0.32
2.0	Analítica	2.39 ± 0.46
2.0	Numérica	2.36 ± 0.49
2.8	Analítica	2.50 ± 0.34
2.8	Numérica	2.45 ± 0.37

En la Tabla 5.4.1. se observa que al aumentar la velocidad del aire de secado se obtienen valores superiores de difusividad efectiva, aunque los valores obtenidos para las velocidades más elevadas (2 y 2.8 m/s) son muy similares. Con el fin de evaluar estadísticamente estos resultados, se calcularon los intervalos LSD con un nivel de confianza del 95% mediante el programa Statgraphics Plus

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Los resultados obtenidos utilizando tanto la solución analítica como la numérica se muestran en la Figura 5.4.2.



**Figura 5.4.2.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) para la difusividad efectiva en función de la velocidad del aire de secado. 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). A,  $\blacklozenge$  (solución analítica). N,  $\blacklozenge$  (solución numérica).

En la Figura 5.4.2. se observa que la difusividad obtenida para las velocidades de aire de secado 2 y 2.8 m/s son significativamente diferentes del valor obtenido para velocidad de 0.6 m/s. Además, para todas las velocidades los valores obtenidos utilizando la solución analítica y la numérica son estadísticamente similares. La similitud de los resultados no sólo muestra que ambos métodos de resolución son comparables, sino también constituye una comprobación de los programas desarrollados a tal efecto.

### 5.4.1.2.2. Modelo con contracción y sin resistencia externa

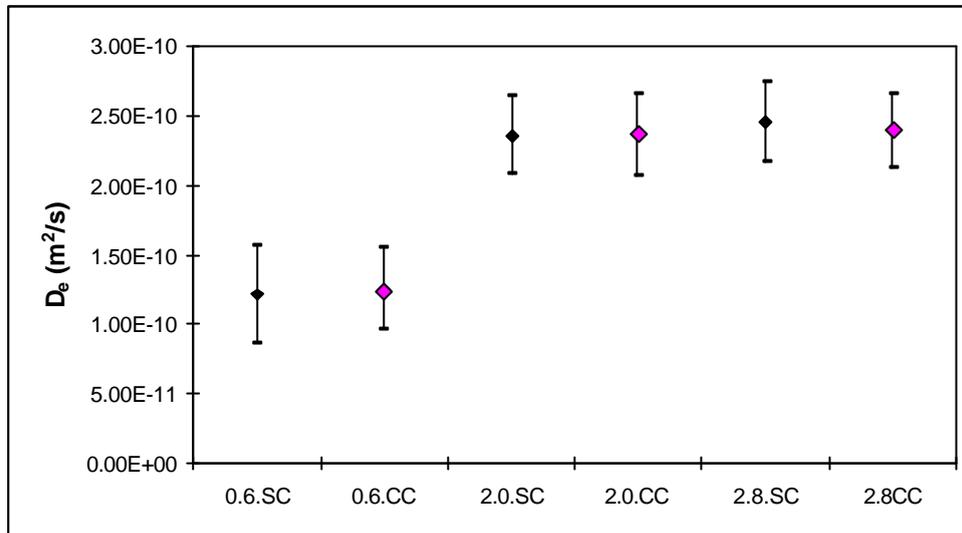
Con el fin de mejorar la descripción del problema y conocer con mayor precisión la influencia de las diferentes variables implicadas en el proceso, se incluyó la contracción en el modelo. Este fenómeno se consideró en el modelo a partir de la variación que experimenta el radio de las muestras al variar la

humedad de las mismas (Ecuación 5.3.4.). La resolución del modelo se realizó utilizando el método de los elementos finitos, pues sus características no permitían su resolución analítica. En la Tabla 5.4.2. se muestran los valores de la difusividad efectiva obtenidos en las condiciones descritas para cada una de las velocidades de secado estudiadas.

**Tabla 5.4.2.** Valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las velocidades de secado utilizadas. Modelo con contracción y sin resistencia externa.

VELOCIDAD (m/s)	$D_e \cdot 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)
0.6	1.26 ± 0.33
2.0	2.37 ± 0.46
2.8	2.39 ± 0.37

Al igual que ocurría al no incluir la contracción en el modelo, se observa que el aumento de la velocidad del aire de secado provoca un aumento de la difusividad efectiva, aunque para las velocidades de aire de secado mayores (2 y 2.8 m/s) los valores obtenidos son muy similares entre sí. Además, también puede observarse que los valores de difusividad efectiva obtenidos sin tener en cuenta la contracción y teniéndola en cuenta son muy similares. Con el fin de determinar la similitud entre los valores obtenidos con ambos modelos se calcularon los intervalos LSD, con un nivel de confianza del 95%. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.4.3., donde se puede observar que la solución obtenida numéricamente coincide en ambos casos.



**Figura 5.4.3.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) para la difusividad efectiva en función de la velocidad del aire de secado, en la modelización realizada sin tener en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia. 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). SC,  $\blacklozenge$  (sin contracción). CC,  $\blacklozenge$  (con contracción).

A partir de la representación gráfica de los intervalos LSD (Figura 5.4.3.) se observa que al incluir la contracción en el modelo se obtienen resultados estadísticamente similares a los obtenidos sin tenerla en cuenta.

En todas las cinéticas analizadas, los ajustes obtenidos fueron satisfactorios, con un porcentaje de varianza explicada obtenido superior al 93.5%. Para todas las cinéticas analizadas (18 experiencias) excepto para dos, el porcentaje de varianza explicada aumentó al incluir la contracción en el modelo. Sin embargo, en todos los casos, la mejora fue inferior al 1%. En las dos cinéticas en que el porcentaje de varianza explicada empeoró lo hizo menos de un 0.15%. A la vista de estos resultados, se puede considerar que la inclusión de la contracción no mejora sustancialmente los resultados obtenidos. Por ello cabe pensar que otros factores sean los responsables de las diferencias encontradas.

A este respecto cabe señalar que la velocidad del aire influye en la resistencia a la transferencia de materia. La resistencia global a la transferencia de materia es la suma de la resistencia externa y de la interna. El flujo de materia es

inversamente proporcional a la resistencia global y está influido por la velocidad del aire de secado dependiendo de la resistencia controlante (interna o externa). Si la resistencia controlante es la interna, la velocidad del aire de secado no influiría en la resistencia global por lo que no se observaría una influencia en la difusividad efectiva. En cambio, si la resistencia externa a la transferencia de materia es más importante, un aumento en la velocidad del aire de secado provoca un aumento en el valor de la difusividad efectiva (Mulet et al., 1987), puesto que al considerar un modelo difusional, sin diferenciar las resistencias presentes, en la difusividad efectiva se reflejan todos los fenómenos que tienen lugar. Por ello, al observar los valores de difusividad efectiva obtenidos para las distintas velocidades de secado utilizadas, puede deducirse que a velocidad del aire de secado 0.6 m/s, la resistencia externa afecta el proceso de transferencia de materia. En cambio, al secar a velocidades de 2 y 2.8 m/s la resistencia controlante sería la interna. Esta variación de la difusividad efectiva con la velocidad del aire de secado, según la resistencia controlante en el proceso de transferencia de materia, ha sido observada por otros autores en diferentes productos agroalimentarios, por ejemplo en patata (Rosselló et al., 1992), en zanahoria y patata (Mulet, 1994), en coliflor (García-Reverter et al., 1996) o en brócoli (Mulet et al., 1999a).

#### **5.4.1.2.3. Modelo sin contracción y con resistencia externa**

A la vista de los resultados obtenidos con los dos modelos anteriores, se observa que la resistencia externa a la transferencia de materia es importante para velocidad de secado de 0.6 m/s. Por ello se modelizaron los resultados experimentales utilizando un modelo que incluía la resistencia externa a la transferencia de materia. Este modelo se encuentra descrito en el apartado 4.5.1. La contracción no se incluyó en el modelo ya que su influencia en los resultados resultó ser poco importante tal como se dedujo anteriormente.

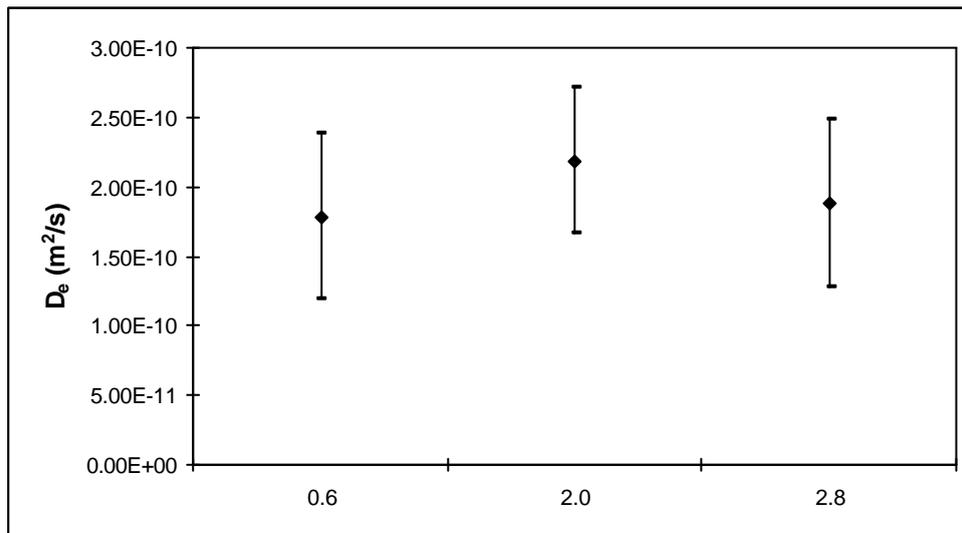
Los resultados obtenidos para la difusividad efectiva se muestran en la Tabla 5.4.3.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Tabla 5.4.3.** Valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las velocidades de secado utilizadas. Modelo sin contracción y con resistencia externa.

VELOCIDAD (m/s)	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)
0.6	1.79 ± 0.50
2.0	2.19 ± 0.47
2.8	1.89 ± 0.57

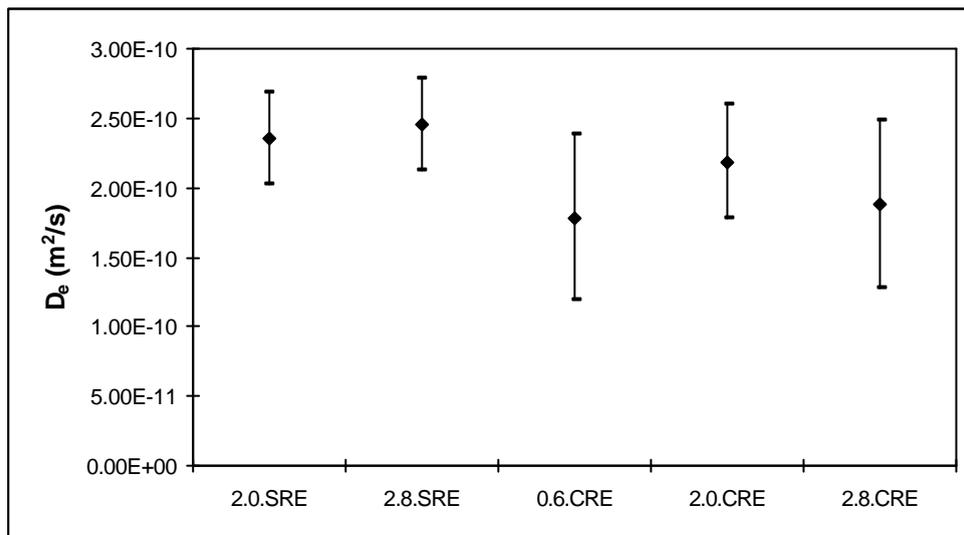
Para determinar si los resultados obtenidos para cada una de las velocidades de secado eran estadísticamente diferentes se calcularon los intervalos LSD, con un nivel de confianza del 95%. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.4.4.



**Figura 5.4.4.** Intervalos LSD (95% de nivel de confianza). Modelo sin contracción y con resistencia externa. 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s).

En la Figura 5.4.4. se observa que los valores obtenidos para las tres velocidades del aire de secado no son estadísticamente diferentes (nivel de confianza del 95%). Los valores obtenidos al incluir en el modelo la resistencia

externa a la transferencia de materia son similares a los que se obtuvieron a velocidades 2 y 2.8 m/s al no incluirla. En la Figura 5.4.5. se representan los intervalos LSD para todos los resultados obtenidos, con el fin de determinar si estos valores son significativamente diferentes.



**Figura 5.4.5.** Intervalos LSD (95% de nivel de confianza). Comparación entre modelos que no incluyeron la contracción. 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). SRE (sin resistencia externa). CRE (con resistencia externa).

La Figura 5.4.5. muestra que los valores de difusividad obtenidos al incluir la resistencia externa a la transferencia de materia en el modelo son estadísticamente similares a los obtenidos al no incluirla para velocidades 2 y 2.8 m/s.

A partir de las Figuras 5.4.2. y 5.4.3. se había deducido que para velocidades 2 y 2.8 m/s la resistencia interna predominaba sobre la externa. Por ello, al incluirla en el modelo los valores obtenidos para la difusividad son similares al utilizar ambos modelos. Cabe destacar que la difusividad efectiva realmente es una propiedad del material y por lo tanto debe ser independiente de la velocidad del aire de secado. En el caso de secado con una velocidad de 0.6 m/s, el valor de difusividad efectiva obtenido al incluir la resistencia externa a la transferencia de

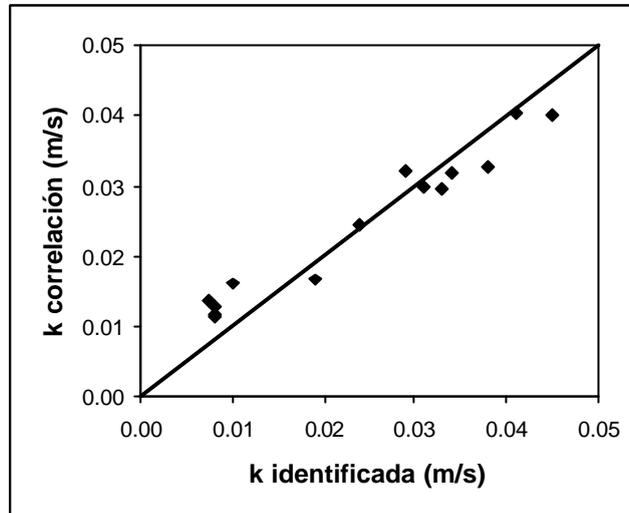
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

materia ( $D_e = 1.79 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) no es significativamente diferente al obtenido para velocidades 2 y 2.8 m/s. Este hecho indicaría que para esta velocidad del aire de secado, como la resistencia externa tiene importancia respecto a la interna, si no se incluye la primera en el modelo, el valor de difusividad efectiva estimado sale inferior al que en realidad corresponde al material. El valor identificado para la difusividad efectiva incluye todos los fenómenos de transferencia implicados. Sólo en la medida en que se describan adecuadamente éstos, se establecerá realmente la difusividad efectiva del material.

Respecto al porcentaje de varianza explicada obtenido en los ajustes, para todas las cinéticas determinadas a velocidades de secado 2 y 2.8 m/s excepto para dos, el porcentaje de varianza explicada disminuyó al incluir la resistencia externa a la transferencia de materia en el modelo. En cambio en los ajustes de las cinéticas determinadas a 0.6 m/s, en la mitad de las experiencias el porcentaje de varianza explicada aumentó y en la otra mitad disminuyó. Cabe destacar que en todos los casos, el porcentaje de varianza explicada fue superior al 93% y las variaciones experimentadas por el porcentaje de varianza explicada no superaron en ningún caso el 5%.

La inversa de la resistencia externa se ha cuantificado mediante un coeficiente de transferencia de materia. A partir del modelo propuesto, se han identificado los valores de dicho parámetro en las experiencias realizadas. Para comprobar la consistencia de estos valores es interesante compararlos con los que se obtienen a partir de correlaciones obtenidas en la bibliografía. Con este fin en la Figura 5.4.6. se representan los valores de los coeficientes de transferencia de materia identificados con el modelo que incluía la resistencia externa frente a los calculados mediante una correlación semiempírica (Rohsenow y Choi, 1961) (Anejo 10.6.).



**Figura 5.4.6.** Representación del coeficiente de transferencia de materia obtenido con la correlación frente al identificado con el modelo propuesto.

En la Figura 5.4.6. se observa una buena concordancia entre los valores obtenidos a partir de la bibliografía y los calculados utilizando el modelo que incluía la resistencia externa. El coeficiente de correlación,  $R^2$ , entre ambas series de valores es de 0.96.

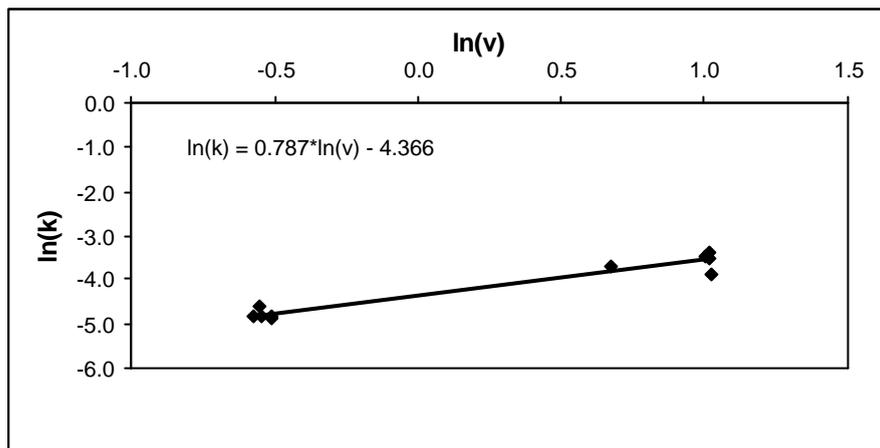
Krokida et al. (2001), tras realizar un revisión bibliográfica sobre coeficientes de transferencia de materia externa en procesado de alimentos, dedujeron una ecuación que relacionaba el factor de transferencia de materia ( $j_D$ ) con el número de Reynolds ( $Re$ ) tal y como se describe en la Ecuación 5.4.1.

$$j_D = a' Re^{n'} \quad \text{Ecuación 5.4.1.}$$

De la Ecuación 5.4.1. se deduce que el coeficiente de transferencia de materia,  $k$ , es proporcional a la velocidad del aire de secado elevada a  $n'+1$ , tal y como se muestra en el Anejo 10.19. Con el fin de determinar los valores de  $a'$  y  $n'$  en las cinéticas de secado estudiadas se representó  $\ln(k)$  frente a  $\ln(v)$  (Figura 5.4.7.). Dado que se ha experimentado a determinados valores de velocidad de

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

aire, la distribución de puntos no es uniforme, por lo que los valores de  $a'$  y  $n'$  deben ser considerados con prudencia.



**Figura 5.4.7.** Representación de  $\ln(k)$  frente a  $\ln(v)$ . Secado de cilindros infinitos.

En la Figura 5.4.7. se muestra un ajuste lineal del logaritmo neperiano del coeficiente de transferencia de materia con el logaritmo neperiano de la velocidad del aire de secado. A partir de los valores obtenidos en el ajuste de la pendiente y de la ordenada en el origen, se dedujeron los valores de los coeficientes  $a'$  y  $n'$ , obteniéndose 0.05 y -0.21 respectivamente. Estos resultados son similares a los obtenidos por Krokida et al. (2001). Estos autores dedujeron para el secado convectivo de distintos productos agroalimentarios valores de  $a'$  comprendidos entre 0.004 y 5.15 y de  $n'$  comprendidos entre -0.575 y -0.430. No obstante, dado que el valor obtenido para  $n'$  en el presente estudio es inferior, aunque del mismo orden de magnitud, al obtenido por Krokida et al. (2001), sería interesante validarlo a partir de una experimentación con una mejor distribución de los experimentos.

### **5.4.2. Secado de cilindros finitos**

Con el fin de profundizar en el conocimiento de los fenómenos que ocurren en la transferencia de materia, se realizaron experiencias en las que todas las dimensiones fueran finitas desde el punto de vista del modelo. De esta manera se

pueden validar las conclusiones obtenidas al deshidratar cilindros en los que se considere una longitud muy grande con respecto a su diámetro (cilindros infinitos). A continuación se expondrán los resultados obtenidos para las cinéticas de secado de cilindros de geometría finita en secadero convectivo.

#### 5.4.2.1. Cinéticas de secado

Las cinéticas de secado se obtuvieron a las mismas condiciones que las de los cilindros infinitos: temperatura 25°C y velocidades de aire 0.6, 2 y 2.8 m/s. En este caso las cinéticas se determinaron para dos músculos de la pierna del cerdo: *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*. Todas las muestras fueron de 2 cm de diámetro y altura 3 cm.

En la Figura 5.4.8. se muestran, a modo de ejemplo, las curvas de secado correspondientes a tres muestras (de las 18 analizadas) del músculo *Bíceps femoris*, cada una de ellas deshidratada con una velocidad de aire diferente. Estas curvas se representan como humedad adimensional,  $\Psi = (W - W_e)/(W_0 - W_e)$  frente al tiempo. El valor de  $W_e$  viene determinado por la isoterma de sorción de los músculo *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* a 25°C (modelizada utilizando el modelo de GAB) y por la humedad del aire de secado.

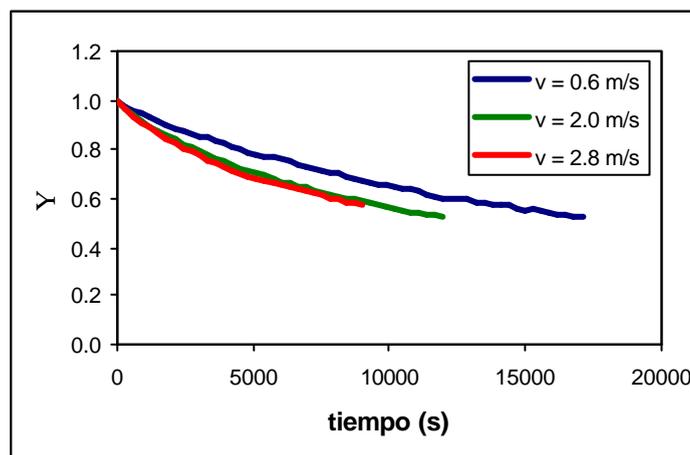


Figura 5.4.8. Curvas de secado de cilindros finitos de *Bíceps femoris*. Efecto de la velocidad del aire de secado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tal y como se observa en la Figura 5.4.8., el aumento de la velocidad del aire de secado de 0.6 a 2 m/s favorece la pérdida de humedad. En cambio, no parece haber diferencias en las cinéticas de secado obtenidas a las velocidades de aire 2 y 2.8 m/s.

### 5.4.2.2. Modelización de las cinéticas de secado

Para modelizar las cinéticas de secado se utilizaron cuatro modelos, descritos en el apartado 4.5.2. En estos modelos se consideró o no tanto la influencia de la contracción como de la resistencia externa a la transferencia de materia. Para la resolución de los modelos se utilizaron dos métodos dependiendo de las características de los mismos: el método analítico de separación de variables o el método numérico de las diferencias finitas.

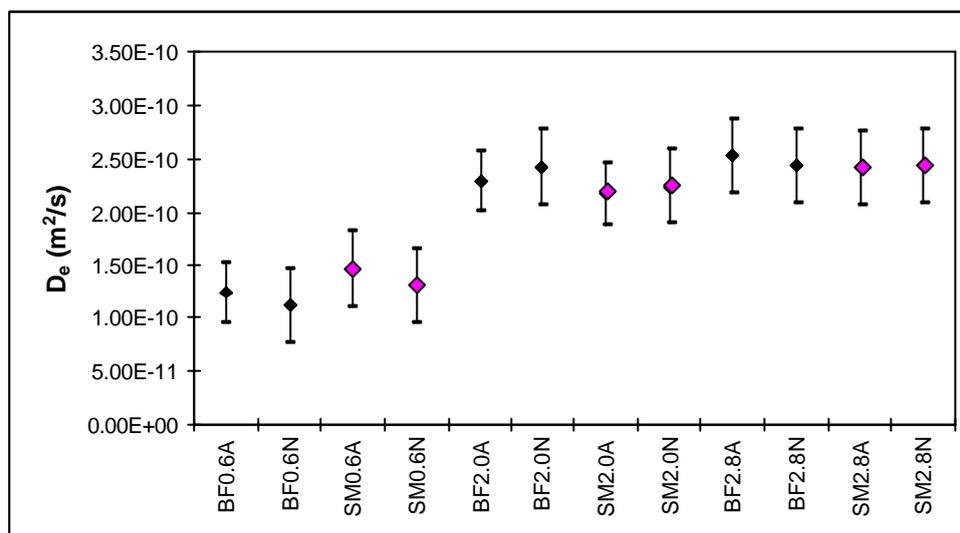
#### 5.4.2.2.1. Modelo sin contracción y sin resistencia externa

El primer modelo utilizado fue aquel en el cual no se tuvo en cuenta ni el efecto de la contracción ni de la resistencia externa en la cinética de secado. La resolución del modelo se llevó a cabo de forma analítica (método de separación de variables) y de forma numérica (método de las diferencias finitas). En la Tabla 5.4.4. se muestran los resultados obtenidos en función de la velocidad del aire y del músculo considerado.

**Tabla 5.4.4.** Difusividad efectiva para *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* con distintas velocidades de aire. Modelo sin contracción y sin resistencia externa. (A) solución analítica, (N) solución numérica.

MUSCULO	v (m/s)	$D_e \cdot 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s) (A)}$	$D_e \cdot 10^{10} \text{ (m}^2/\text{s) (N)}$
<i>Bíceps femoris</i>	0.6	$1.24 \pm 0.25$	$1.12 \pm 0.23$
<i>Bíceps femoris</i>	2.0	$2.29 \pm 0.30$	$2.42 \pm 0.17$
<i>Bíceps femoris</i>	2.8	$2.53 \pm 0.31$	$2.43 \pm 0.31$
<i>Semimembranosus</i>	0.6	$1.47 \pm 0.18$	$1.32 \pm 0.17$
<i>Semimembranosus</i>	2.0	$2.17 \pm 0.27$	$2.24 \pm 0.20$
<i>Semimembranosus</i>	2.8	$2.42 \pm 0.17$	$2.43 \pm 0.28$

Con el fin de determinar si los resultados eran estadísticamente diferentes, tanto en función de la velocidad del aire de secado como en función del método de resolución de los modelos utilizado se calcularon los intervalos LSD, con un nivel de confianza del 95% (Figura 5.4.9.) Estos intervalos fueron calculados con el programa Statgraphics Plus 5.1.



**Figura 5.4.9.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y sin resistencia externa a la transferencia de materia. BF,  $\blacklozenge$  (*Bíceps femoris*). SM,  $\blacklozenge$  (*Semimembranosus*). 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). A (solución analítica). N (solución numérica).

Tras el estudio tanto de la Tabla 5.4.4. como de la Figura 5.4.9., varios son los hechos que pueden constatar. En primer lugar, los resultados obtenidos son estadísticamente similares al utilizar la solución numérica y la solución analítica para cada una de las velocidades de secado analizadas, lo que indicaría que ambos métodos son comparables. Además, los valores de difusividad efectiva identificados no dependen del músculo estudiado (*Bíceps femoris* o *Semimembranosus*) sino de la velocidad del aire de secado utilizada para determinar las cinéticas de deshidratación. Así, al igual que ocurría con la geometría cilíndrica infinita, los valores identificados de la difusividad efectiva a una velocidad de aire de secado de 0.6 m/s son significativamente diferentes a los

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

obtenidos para las velocidades de aire 2 y 2.8 m/s. Las difusividades obtenidas para estas dos velocidades de aire son estadísticamente similares. Este hecho indicaría que la resistencia externa a la transferencia de materia para velocidad 0.6 m/s tiene importancia, siendo la resistencia interna la que predominaría a velocidades 2 y 2.8 m/s, tal y como se ha comentado anteriormente para cilindros de geometría infinita. En el Anejo 10.17. se muestran los resultados obtenidos para cada una de las 18 cinéticas de secado analizadas. Tal y como puede observarse, el porcentaje de varianza explicada superó el 90% en todos los casos.

### 5.4.2.2.2. Modelo con contracción y sin resistencia externa

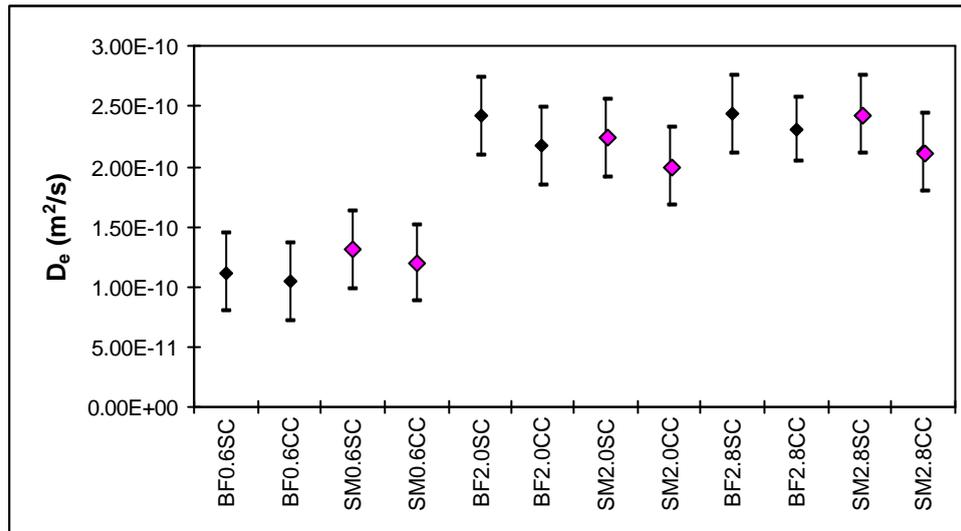
Con el fin de evaluar el efecto de la contracción, los resultados experimentales obtenidos también se modelizaron teniéndola en cuenta. Para ello, se utilizaron las ecuaciones de contracción obtenidas para cilindros finitos secados en secadero convectivo, en las cuales se relaciona la variación experimentada por el radio (Ecuación 5.3.4.) y por el volumen (Ecuación 5.3.5.) al variar el contenido en humedad durante el proceso de secado.

El modelo fue resuelto utilizando una técnica numérica, en concreto el método de las diferencias finitas, ya que al incluir la contracción, no se podía resolver analíticamente. En la Tabla 5.4.5. se muestran los resultados obtenidos para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

**Tabla 5.4.5.** Difusividad efectiva para el secado de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* a distintas velocidades de aire. Modelo con contracción y sin resistencia externa.

MÚSCULO	VELOCIDAD (m/s)	$D_e \cdot 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)
<i>Bíceps femoris</i>	0.6	1.05 ± 0.16
<i>Bíceps femoris</i>	2.0	2.19 ± 0.22
<i>Bíceps femoris</i>	2.8	2.31 ± 0.23
<i>Semimembranosus</i>	0.6	1.20 ± 0.17
<i>Semimembranosus</i>	2.0	2.00 ± 0.20
<i>Semimembranosus</i>	2.8	2.12 ± 0.24

En la Figura 5.4.10. se muestran los intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) calculados a partir de los valores de difusividad obtenidos, tanto considerando la contracción como sin considerarla.



**Figura 5.4.10.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Comparación de modelos sin resistencia externa. BF,  $\blacklozenge$  (*Biceps femoris*). SM,  $\blacklozenge$  (*Semimembranosus*). 0.6 m/s ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). SC (sin contracción). CC (con contracción).

Al igual que al examinar una geometría cilíndrica infinita y analizar los modelos en los que no se incluyó la resistencia externa a la transferencia de materia, el comportamiento de las difusividades identificadas en función de la velocidad del aire de secado fue similar. Se observa que a velocidad del aire de 0.6 m/s la resistencia predominante a la transferencia de materia es la externa, mientras que para velocidades 2 y 2.8 m/s predomina la resistencia interna a la transferencia de materia. La Tabla 5.4.5. y la Figura 5.4.10. muestran que los valores de difusividad identificados son significativamente similares (nivel de confianza del 95%) tanto si se considera la contracción durante el secado como si ésta no se considera.

En todas las cinéticas analizadas, excepto en dos de ellas, el porcentaje de varianza explicada aumentó al incluir la contracción en el modelo (Anejo

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

10.17.). Sin embargo la disminución del porcentaje de varianza explicada en las dos cinéticas fue inferior al 0.30% en ambos casos. La mejora experimentada por el porcentaje de varianza explicada en la mayoría de las muestras osciló entre el 0.15 y el 3.37%, siendo el incremento inferior al 1.5% en la mitad de las muestras. En dos de las muestras la varianza se mantuvo y en otra aumentó un 5.65%.

A la vista de lo expuesto, y teniendo en cuenta que los resultados obtenidos para la difusividad efectiva sin considerar la contracción y considerándola son estadísticamente similares, parece que ésta no proporciona una mejor interpretación de los resultados obtenidos.

### 5.4.2.2.3. Modelo sin contracción y con resistencia externa

Al igual que en la modelización de las cinéticas de deshidratación de cilindros infinitos, parece que a velocidad 0.6 m/s la resistencia externa a la transferencia de materia es importante. Por ello se modelizaron los datos experimentales considerando la resistencia externa a la transferencia de materia, para lo cual, tal y como se expone en el apartado 4.5.2., las condiciones de contorno en la superficie del cilindro serán las descritas por las Ecuaciones 4.5.15. y 4.5.16.

$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(R, x, t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.15.}$$

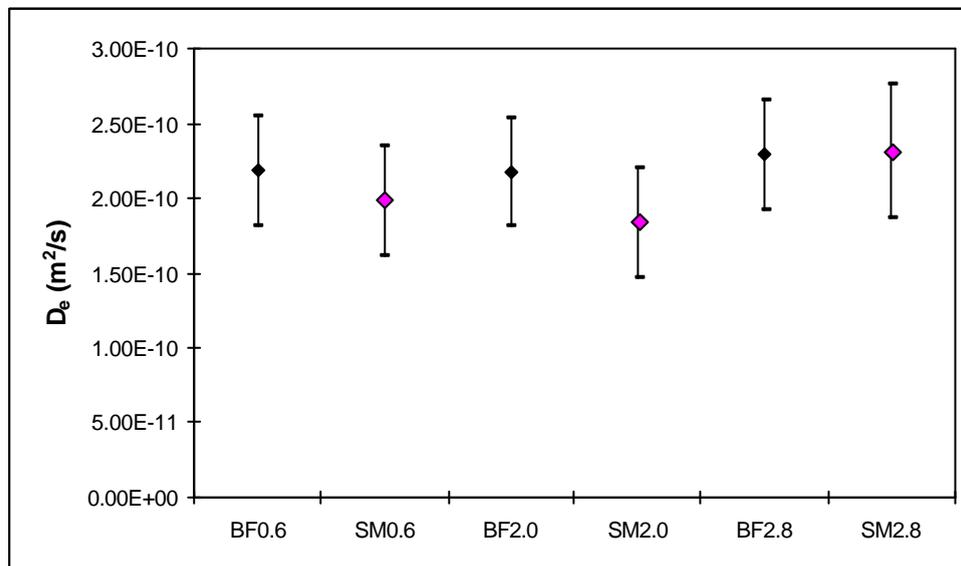
$$-D_e \rho_{ss} \frac{\partial W}{\partial r}(r, L, t) = k(C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 4.5.16.}$$

El modelo fue resuelto numéricamente utilizando el método de las diferencias finitas. Los resultados obtenidos para los dos músculos estudiados se muestran en la Tabla 5.4.6.

**Tabla 5.4.6.** Difusividad efectiva para el secado de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* a distintas velocidades de aire. Modelo sin contracción y con resistencia externa.

MUSCULO	VELOCIDAD (m/s)	$D_e \cdot 10^{10}$ ( $m^2/s$ )
<i>Bíceps femoris</i>	0.6	$2.19 \pm 0.40$
<i>Bíceps femoris</i>	2.0	$2.18 \pm 0.26$
<i>Bíceps femoris</i>	2.8	$2.30 \pm 0.35$
<i>Semimembranosus</i>	0.6	$1.99 \pm 0.39$
<i>Semimembranosus</i>	2.0	$1.84 \pm 0.30$
<i>Semimembranosus</i>	2.8	$2.32 \pm 0.10$

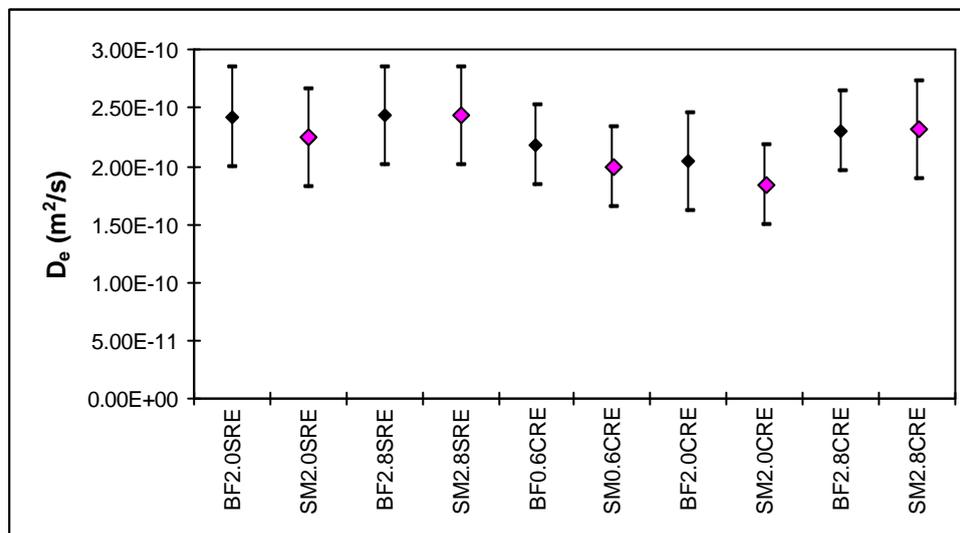
Los intervalos LSD (95% de nivel de confianza) fueron determinados para establecer las diferencias existentes entre los valores de difusividad obtenidos para los dos músculos estudiados y para las tres velocidades de secado a las cuales se determinaron las cinéticas de deshidratación (Figura 5.4.11.).



**Figura 5.4.11.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y con resistencia externa. BF,  $\blacklozenge$  (*Bíceps femoris*). SM,  $\blacktriangledown$  (*Semimembranosus*). 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

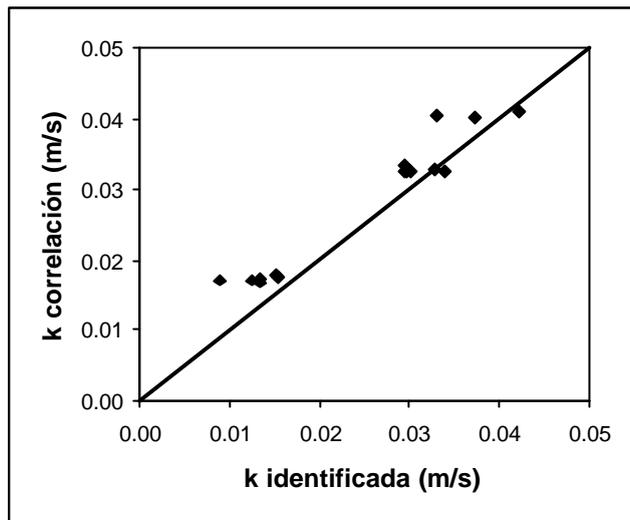
Al igual que ocurría al modelizar las cinéticas obtenidas para geometría cilíndrica infinita, los valores identificados de difusividad efectiva para las tres velocidades de secado estudiadas y para los dos músculos considerados resultaron ser estadísticamente similares. Además, estos valores no son significativamente diferentes a los obtenidos al no incluir la resistencia externa a la transferencia de materia para velocidades 2 y 2.8 m/s, tal y como se muestra en la Figura 5.4.12.



**Figura 5.4.12.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Comparación de modelos sin contracción. BF,  $\blacklozenge$  (*Biceps femoris*). SM,  $\blacktriangle$  (*Semimembranosus*). 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). SRE (sin resistencia externa). CRE (con resistencia externa).

Al incluir la resistencia externa en el modelo, además de calcular el valor de la difusividad efectiva, para cada una de las 18 muestras analizadas, también se identificó el valor del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ) utilizando la función “fmincon” del programa Matlab 6.1, que permite optimizar ajustando el valor de varias variables, tal y como se explica en el apartado 4.5.2 Los valores del coeficiente de transferencia de materia así obtenidos, se compararon con aquéllos calculados a partir de una correlación semiempírica obtenida en la bibliografía

para convección forzada (Anejo 10.6.). En la Figura 5.4.13. se representan los valores del coeficiente de transferencia de materia calculados con la correlación mencionada frente a los estimados tras la optimización a partir de las experiencias realizadas.



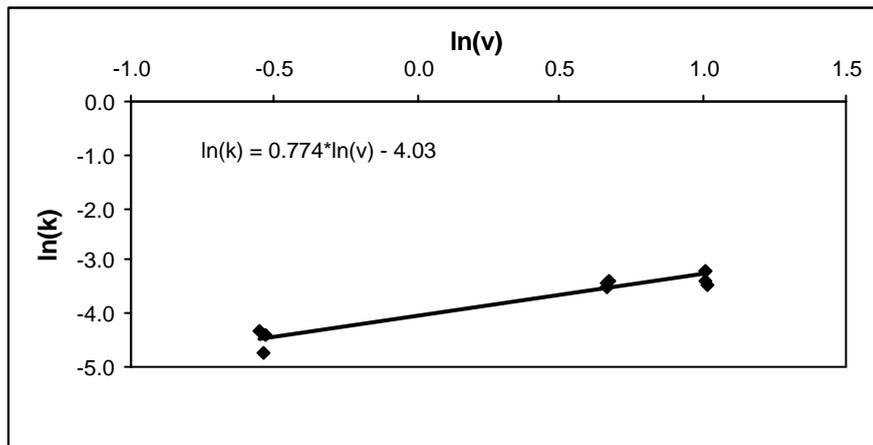
**Figura 5.4.13.** Representación de los coeficientes de transferencia de materia calculados mediante la correlación semiempírica frente a los identificados mediante un método de optimización para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*. Modelo sin contracción y con resistencia externa.

En la Figura 5.4.13. puede observarse que los resultados obtenidos para el coeficiente de transferencia de materia a partir del ajuste de los resultados experimentales son similares a los calculados mediante la ecuación semiempírica descrita en el Anejo 10.6. siendo el coeficiente de correlación entre ellos,  $R^2 = 0.95$ . Se observa que a partir de la correlación se obtienen valores ligeramente superiores

Al igual que en el análisis de las cinéticas obtenidas para geometría cilíndrica infinita, se representó el logaritmo neperiano del coeficiente de transferencia de materia frente al logaritmo neperiano de la velocidad del aire de secado calculado a partir del ajuste de los datos experimentales. Esta

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

representación se muestra en la Figura 5.4.14. Cabe señalar también, como se hizo anteriormente, que la distribución no uniforme de las experiencias respecto a la velocidad no permite extraer conclusiones definitivas sobre la linealidad del ajuste. Sin embargo, los resultados sí que se pueden considerar como una buena primera aproximación al problema.



**Figura 5.4.14.** Representación de  $\ln(k)$  frente a  $\ln(v)$ . Secado de cilindros finitos en secadero convectivo. Modelo sin contracción y con resistencia externa.

Los valores de los coeficientes  $a'$  y  $n'$  se dedujeron a partir de los valores de la ordenada en el origen y de la pendiente de la recta de ajuste, obteniéndose  $a' = 0.06$  y  $n' = -0.23$ . Al igual que en el caso estudiado de geometría cilíndrica infinita, los valores son similares a los obtenidos por Krokida et al. (2001).

### 5.4.2.2.4. Modelo con contracción y con resistencia externa

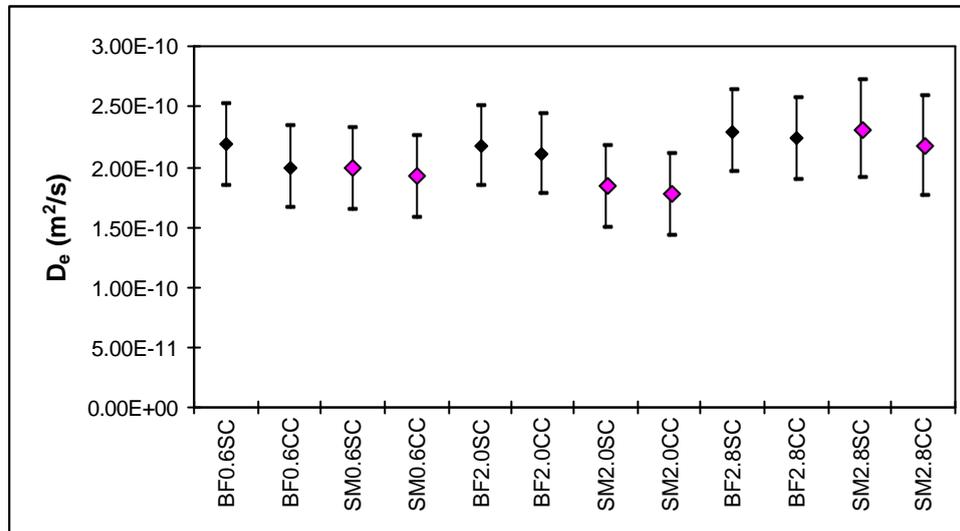
Por último, las cinéticas de deshidratación obtenidas experimentalmente se modelizaron teniendo en cuenta tanto el efecto de la contracción como el de la resistencia externa a la transferencia de materia, con el fin de determinar el efecto de ambos factores considerados de manera conjunta. El modelo, debido a sus características, fue resuelto numéricamente utilizando el método de las diferencias

finitas. En la Tabla 5.4.7. se muestran los resultados obtenidos para los dos músculos estudiados.

**Tabla 5.4.7.** Difusividad efectiva para el secado de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* a distintas velocidades de aire. Modelo con contracción y con resistencia externa.

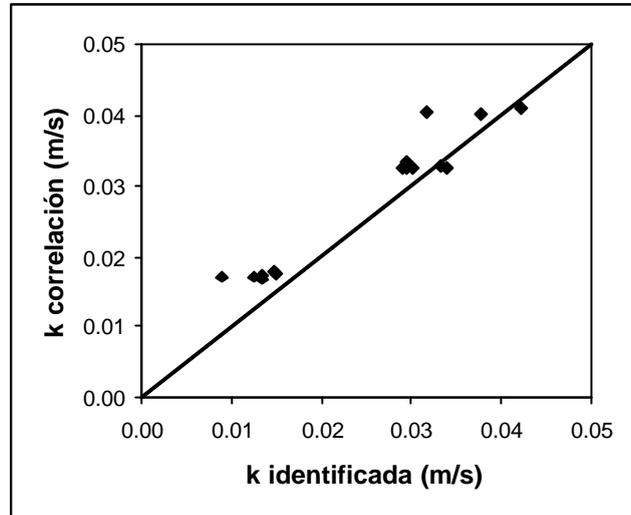
MÚSCULO	VELOCIDAD (m/s)	$D_e \cdot 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)
<i>Bíceps femoris</i>	0.6	2.00 ± 0.24
<i>Bíceps femoris</i>	2.0	2.11 ± 0.25
<i>Bíceps femoris</i>	2.8	2.24 ± 0.41
<i>Semimembranosus</i>	0.6	1.92 ± 0.39
<i>Semimembranosus</i>	2.0	1.77 ± 0.27
<i>Semimembranosus</i>	2.8	2.18 ± 0.18

En la Tabla 5.4.7. puede observarse que se obtuvieron valores de difusividad efectiva similares para ambos músculos para todas las velocidades estudiadas. Con el fin de analizar el efecto de la contracción al considerar la resistencia externa, se pueden comparar los resultados obtenidos con los dos modelos implicados y sus correspondientes valores LSD (Figura 5.4.15.).



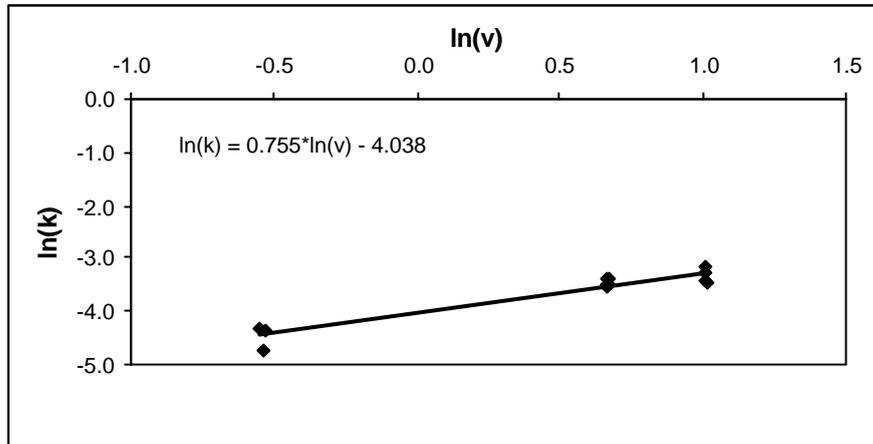
**Figura 5.4.15.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Comparación de modelos con resistencia externa. BF,  $\blacklozenge$  (*Biceps femoris*). SM,  $\blacklozenge$  (*Semimembranosus*). 0.6 ( $v = 0.6$  m/s). 2.0 ( $v = 2$  m/s). 2.8 ( $v = 2.8$  m/s). SC (sin contracción). CC (con contracción).

En la Figura 5.4.15. se observa que no existen diferencias significativas entre los valores de difusividad efectiva identificados incluyendo o no incluyendo el efecto de la contracción en las cinéticas de deshidratación. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en los análisis realizados para geometría cilíndrica infinita. Además, vuelve a confirmarse que al incluir la resistencia externa a la transferencia de materia, la difusividad efectiva identificada es independiente de la velocidad del aire de secado. Parece por tanto, que es adecuada la descripción de la realidad que ofrece la inclusión de la resistencia externa a la transferencia de materia en la modelización de las cinéticas de secado. Además de la difusividad efectiva, también fue identificado el coeficiente de transferencia de materia,  $k$  (Anejo 10.17). Los valores identificados se compararon con los obtenidos a partir de la correlación semiempírica, descrita en el Anejo 10.6. Los resultados obtenidos (Figura 5.4.16.) muestran una buena concordancia entre los valores identificados y los calculados a partir de la correlación semiempírica ( $R^2 = 0.94$ ). Igual que anteriormente, los valores obtenidos a partir de la correlación son ligeramente superiores a los identificados.



**Figura 5.4.16.** Representación de los coeficientes de transferencia de materia calculados mediante la correlación semiempírica frente a los identificados mediante un método de optimización para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*. Modelo con contracción y con resistencia externa.

Al representar el logaritmo neperiano del coeficiente de transferencia de materia frente al logaritmo neperiano de la velocidad del aire de secado se obtuvo una relación lineal entre ambos, tal y como se muestra en la Figura 5.4.17. Nuevamente cabría señalar que sería necesaria experimentación a distintas velocidades del aire de secado para poder establecer conclusiones definitivas sobre la linealidad del ajuste obtenido.



**Figura 5.4.17.** Representación de  $\ln(k)$  frente a  $\ln(v)$ . Secado de cilindros finitos en secadero convectivo. Modelo con contracción y con resistencia externa.

A partir de la relación lineal entre el  $\ln$  del coeficiente de transferencia de materia y el  $\ln$  de la velocidad del aire de secado se calcularon los valores de  $a'$  y  $n'$ , que tomaron los valores 0.07 y -0.24 respectivamente. Estos valores concuerdan con los obtenidos por Krokida et al. (2001), al igual que en el caso de la modelización, sin tener en cuenta la contracción, de las cinéticas de deshidratación obtenidas para muestras de geometría cilíndrica infinita y de muestras de geometría cilíndrica finita.

### 5.4.3. Comparación de resultados. Geometría finita e infinita

En el siguiente apartado se compararán los resultados obtenidos con cada uno de los modelos utilizados para cada una de las geometrías estudiadas. Además se contrastarán con resultados obtenidos por otros autores en la bibliografía.

#### 5.4.3.1. Identificación de la difusividad efectiva

En la Tabla 5.4.8. se muestra un resumen de los valores de difusividad efectiva identificada a partir de las cinéticas determinadas en el secadero convectivo.

**Tabla 5.4.8.** Resumen de los valores de difusividad efectiva identificados a partir de las cinéticas de secado determinadas en el secadero convectivo.

GEOMETRÍA	MÚSCULO	v (m/s)	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s) SC. SRE	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s) CC. SRE	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s) SC. CRE	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s) CC. CRE
INFINITA	BF	0.6	1.22 ± 0.32	1.26 ± 0.33	1.79 ± 0.50	-
FINITA	BF	0.6	1.12 ± 0.23	1.05 ± 0.16	2.19 ± 0.40	2.00 ± 0.24
FINITA	SM	0.6	1.32 ± 0.17	1.20 ± 0.17	1.99 ± 0.39	1.92 ± 0.39
INFINITA	BF	2.0	2.36 ± 0.49	2.37 ± 0.46	2.19 ± 0.47	-
FINITA	BF	2.0	2.42 ± 0.17	2.19 ± 0.22	2.18 ± 0.26	2.11 ± 0.25
FINITA	SM	2.0	2.24 ± 0.20	2.00 ± 0.20	1.84 ± 0.30	1.77 ± 0.27
INFINITA	BF	2.8	2.45 ± 0.37	2.39 ± 0.37	1.89 ± 0.57	-
FINITA	BF	2.8	2.43 ± 0.31	2.31 ± 0.23	2.30 ± 0.35	2.24 ± 0.41
FINITA	SM	2.8	2.43 ± 0.38	2.12 ± 0.24	2.32 ± 0.08	2.18 ± 0.18

A lo largo de los apartados anteriores se ha puesto de manifiesto que los valores de difusividad efectiva identificados para los dos músculos estudiados no son significativamente diferentes. La difusividad efectiva es una propiedad del material y por lo tanto puede considerarse que los dos músculos presentan prácticamente la misma. Gou et al. (2002) obtuvieron resultados similares. Estos autores, en un estudio realizado sobre secado de distintos músculos de jamón salados (*Gluteus medius*, *Semimembranosus* y *Bíceps femoris*) a temperatura 5°C y humedad relativa del 80%, no observaron diferencias significativas entre los valores de difusividad efectiva identificados para los tres músculos, utilizando un modelo que no incluía ni la contracción ni la resistencia externa a la transferencia de materia. Según estos autores, aunque ambos músculos tienen un contenido en grasa diferente, teniendo el *Semimembranosus* alrededor de la cuarta parte de grasa que el *Bíceps femoris* (Tabla 5.1.1.), estas diferencias no son lo suficientemente elevadas para influir en el valor de la difusividad. Por ello consideraron que la modelización de la transferencia de materia durante el secado de un jamón entero podría realizarse asumiendo que todos los músculos se comportaban de manera similar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

En la bibliografía se encuentran trabajos en los que se pone de manifiesto cómo influye la velocidad del aire de secado en el valor de difusividad efectiva según la resistencia controlante en el proceso de transferencia de materia (Rosselló et al., 1992; Mulet, 1994; García-Reverter, 1996; Mulet et al., 1999a). Al observar los valores de difusividad efectiva obtenidos para las distintas velocidades de secado, en aquellos modelos que no incluyeron la resistencia externa a la transferencia de materia, puede deducirse que la resistencia externa es muy importante o controlante a velocidad 0.6 m/s. En cambio para velocidades 2 y 2.8 es la resistencia interna la que controla el proceso de transferencia de materia. Esto queda puesto de manifiesto por el hecho de que al modelizar las cinéticas de secado sin tener en cuenta la resistencia externa, se encontraron diferencias significativas entre los valores de difusividad efectiva identificados a velocidad 0.6 m/s y velocidades 2 y 2.8 m/s, siendo los valores correspondientes a estas dos últimas velocidades estadísticamente similares. En cambio, al modelizar las cinéticas teniendo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia, no se encontraron diferencias significativas entre los valores obtenidos para las tres velocidades de secado. Por ello y dado que la difusividad efectiva es una propiedad del material independiente de la velocidad del aire utilizado, se deduce que al aplicar el modelo sin resistencia externa para cinéticas determinadas a velocidad 0.6 m/s, el valor de difusividad efectiva queda infraestimado debido a que para compensar el efecto de la resistencia externa, que no se tiene en cuenta, la resistencia interna debe aumentar y en consecuencia el valor de difusividad identificado es menor de lo que cabría esperar. En este caso, la difusividad efectiva identificada al depender de la velocidad del aire no puede ser considerada “sólo” una propiedad del material, lo sería si el modelo incluyera todas las variables importantes que influyen en la transferencia de materia. Con respecto a la contracción, cabe destacar que los valores de difusividad efectiva identificados considerándola o no son estadísticamente similares para todas las geometrías y velocidades de aire de secado utilizadas. De ello, puede deducirse que su efecto no es importante en las condiciones de secado empleadas en el presente estudio ( $T = 25^{\circ}\text{C}$  y  $v = 0.6, 2, 2.8$  m/s).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Con el fin de comparar los resultados del presente estudio con los de la bibliografía, en la Tabla 5.4.9. se muestran valores de difusividad efectiva obtenidos por otros autores en diferentes productos cárnicos.

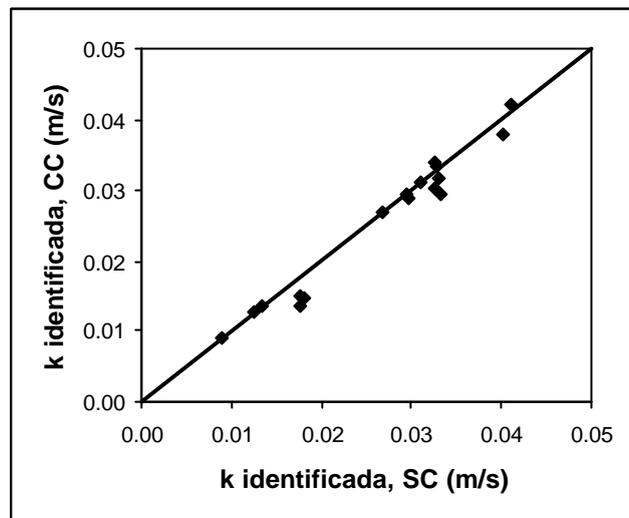
**Tabla 5.4.9.** Difusividad efectiva de diversos productos cárnicos. SC.SRE. (sin contracción, sin resistencia externa). CC.SRE (con contracción, sin resistencia externa). SC.CRE (sin contracción, con resistencia externa). RMN (resonancia magnética nuclear). CN (convección natural).

PRODUCTO	T (°C)	v (m/s)	$D_e * 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s)	MODELO	REFERENCIA
Lomo de cerdo salado	10 – 30	0.4	0.10 – 0.30	SC.SRE	Palmia et al., 1993
Tiburón salado	20 – 40	0.5 y 3.0	1.50 – 2.85	SC.SRE	Park, 1998
Tiburón salado	20 – 40	0.5 y 3.0	0.87 – 1.61	CC.SRE	Park, 1998
Ternera fresca	30 – 60	2.0	0.50 – 1.80	-	Mittal, 1999
Ternera cocida	30 – 75	2.0	0.50 – 2.30	-	Mittal, 1999
Carne de cerdo fresca	26	1.3	0.63 – 0.76	SC.SRE	Comaposada, 1999
Carne de cerdo fresca	26	1.3	0.70 – 1.08	SC.CRE	Comaposada, 1999
Lomo de cerdo salado	6 - 16	CN	0.25 – 1.26	SC.SRE	Gisbert, 2001
Carne de cerdo salada	5	CN	0.20 – 0.25	SC.SRE	Gou et al., 2002
Carne de cerdo salada	5 – 26	CN	0.12 – 1.11	SC.SRE	Gou et al., 2003
Carne de cerdo salada	1 - 33	CN	0.12 – 1.5	SC.SRE	Gou et al., 2004
Carne de cerdo fresca	12 – 20	-	0.20 – 1.20	RMN	Ruiz-Cabrera et al., 2004

Tras las observación de la Tabla 5.4.9. y su comparación con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se deduce que los valores de difusividad efectiva identificados en el presente estudio son del mismo orden de magnitud que los obtenidos por otros autores en diferentes productos cárnicos.

**5.4.3.2. Identificación del coeficiente de transferencia de materia**

En la Figura 5.4.18. se comparan los valores de k obtenidos con los modelos que incluyeron la resistencia externa a la transferencia de materia, considerando o no la contracción.



**Figura 5.4.18.** Representación de los coeficientes de transferencia de materia identificados considerando la contracción frente a los identificados sin considerarla para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

En la Figura 5.4.18. se observa que los valores de k identificados considerando o no la contracción son muy similares. El coeficiente de correlación  $R^2$  obtenido fue de 0.97.

Con las precauciones relativas a la experimentación realizada y teniendo en cuenta que para establecer conclusiones definitivas sería necesaria la obtención de cinéticas de secado a un mayor número de velocidades de aire, puede afirmarse que la Ecuación 5.4.1. representa adecuadamente la influencia de la velocidad. Los parámetros de dicha ecuación se calculan a partir de su forma linealizada. Es decir, la representación del  $\ln(k)$  frente al  $\ln(v)$  proporciona la relación existente entre el coeficiente de transferencia de materia (k) y la velocidad

del aire de secado ( $v$ ). En la Tabla 5.4.10. se muestran los resultados obtenidos en los ajustes del  $\ln(k)$  frente a  $\ln(v)$ .

**Tabla 5.4.10.** Resumen de los resultados obtenidos al ajustar  $\ln(k)$  frente al  $\ln(v)$ .

<b>GEOMETRÍA</b>	<b>MODELO</b>	<b>PENDIENTE</b>	<b>n'</b>	<b>ORD. ORIGEN</b>	<b>a'</b>
INFINITA	SC	0.79	-0.21	-4.37	0.05
FINITA	SC	0.77	-0.23	-4.03	0.06
FINITA	CC	0.75	-0.24	-4.04	0.07

En la Tabla 5.4.10. se muestran los resultados obtenidos, observándose que en todos los casos son muy similares. Así pues, el factor de transferencia de materia ( $j_D$ ) se relaciona exponencialmente con el número de Reynolds tal y como se muestra en la Ecuación 5.4.1. Por otra parte, Krokida et al., 2001, a partir de una revisión bibliográfica realizada sobre coeficientes de materia en Tecnología de Alimentos, dedujeron para el secado convectivo de distintos productos agroalimentarios valores de  $a'$  comprendidos entre 0.004 y 5.15 y de  $n'$  comprendidos entre -0.575 y -0.430. Por lo tanto, la relación obtenida en el presente estudio entre la velocidad del aire de secado y el coeficiente de transferencia de materia es concordante con la propuesta por Krokida et al. (2001), aunque los valores de  $n'$  son inferiores a los que cabría esperar. Es decir, la influencia de la velocidad del aire se describe dentro de los rangos obtenidos por estos autores, aunque los valores están desplazados debido a la ordenada en el origen. Por ello, sería necesaria experimentación adicional para velocidades del aire diferentes a las consideradas en el presente estudio, con el fin de validar los resultados obtenidos.

## 5.5. Secado de cilindros en cámara de secado

El proceso de elaboración del jamón curado se lleva a cabo en cámaras de secado con aire prácticamente estacionario y con temperatura y humedad relativa controlada. Además, los jamones son salados como paso previo al proceso de secado. Por ello una vez identificados los valores de difusividad efectiva para carne fresca sin adición de sal, se procedió a identificar estos valores en carne salada. Además, las experiencias se llevaron a cabo en cámaras de secado a escala de laboratorio, con el fin de imitar en la medida de lo posible el proceso que se lleva a cabo a escala industrial, tal y como se describe en el apartado 4.4.3.

### 5.5.1. Determinación de la difusividad de sal

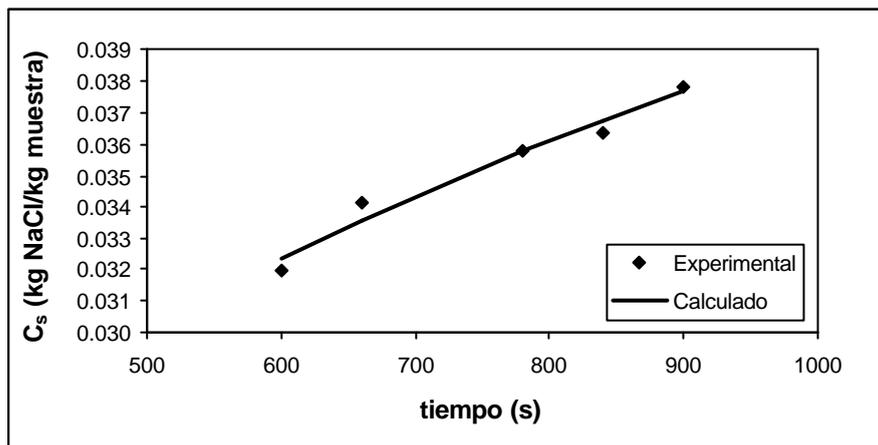
En primer lugar, se procedió al salado de las muestras de carne. Para establecer los tiempos de salado, es necesario disponer de medidas experimentales previas de concentraciones de sal alcanzadas para diversos tiempos de salado. Con este fin se realizaron 5 experiencias de salados, con 3 repeticiones cada una. El proceso se llevó a cabo en una salmuera saturada de NaCl a una temperatura controlada de 2°C (apartado 4.4.3.1.2.). En la Tabla 5.5.1. se muestran las concentraciones en sal alcanzadas por las muestras para los diferentes tiempos de salado.

**Tabla 5.5.1.** Ganancia de sal para los distintos tiempos de salado.

tiempo de salado (s)	$C_{sexp} \cdot 10^3$ (kg NaCl/kg muestra)
600	$31.98 \pm 0.22$
660	$34.14 \pm 0.76$
780	$35.79 \pm 0.81$
840	$36.36 \pm 0.49$
900	$37.82 \pm 1.07$

Con el fin de establecer el valor de la concentración de sal en el equilibrio se utilizó el modelo de Peleg obteniéndose un valor de  $C_{se}$  de 0.056 kg NaCl/kg muestra.

A partir de los datos experimentales y con la  $C_e$  anteriormente calculada, se obtuvo un valor de la difusividad de sal  $D_s = 1.07 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ . Se utilizó un modelo difusivo para un cilindro finito, tal y como se expone en el apartado 4.4.3.1.2. El porcentaje de varianza explicada obtenido fue del 95.8%. En la Figura 5.5.1. se representan los valores experimentales y los calculados utilizando el modelo. Tanto la representación gráfica como el valor obtenido para el porcentaje de varianza explicada, indican que el ajuste obtenido fue satisfactorio.



**Figura 5.5.1.** Ganancia de sal para los distintos tiempos de salado. Comparación de los resultados experimentales y los calculados.

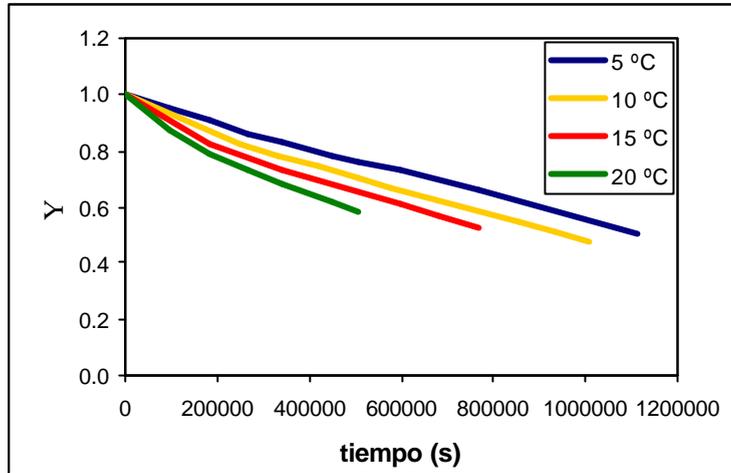
A partir del valor de difusividad de sal obtenido se calcularon los tiempos de salado necesarios (apartado 4.4.3.1.3.) para que las muestras alcanzasen un contenido en sal del 3%. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5.2.

**Tabla 5.5.2.** Tiempo de salado en función de las dimensiones de la muestra.

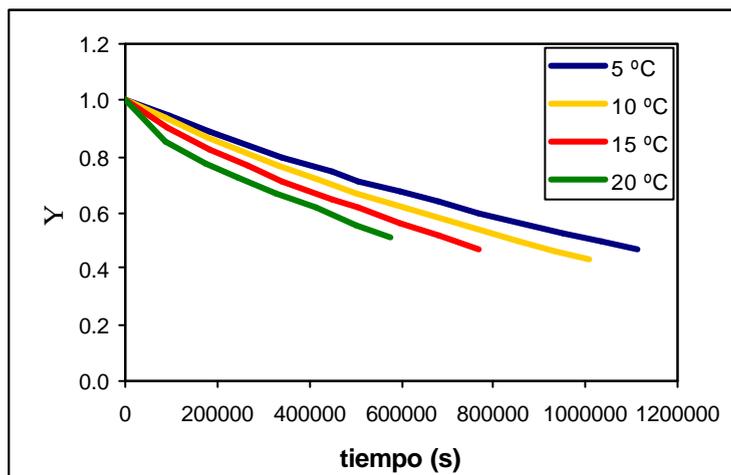
DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)	t salado (s)
4	3	1620
	2	1313
3	3	1020
	2	840
2	3	510
	2	450

### 5.5.2. Cinéticas de secado

Las cinéticas de secado de carne salada se determinaron a cuatro temperaturas, 5, 10, 15 y 20°C, con el fin de determinar la influencia de la misma. El movimiento del aire en el interior de la cámara de secado tuvo lugar por convección natural, pues se consideró la velocidad debida a la impulsión del aire para controlar la humedad como prácticamente nula. En las Figuras 5.5.2. y 5.5.3. se representan a modo de ejemplo 8 de las 144 cinéticas obtenidas. Las curvas de secado se expresan como humedad media adimensional,  $\Psi = (W - W_e)/(W_0 - W_e)$ . El valor de  $W_e$  se determinó a partir de la humedad del aire de secado. Para ello se utilizó la ecuación de GAB considerando la influencia de la temperatura y el contenido en sal en los parámetros, según establecieron Comaposada et al. (2000a).



**Figura 5.5.2.** Curvas de secado de cilindros salados del músculo *Bíceps femoris* de 3 cm de diámetro y 2 cm de altura. Influencia de la temperatura.



**Figura 5.5.3.** Curvas de secado de cilindros salados del músculo *Semimembranosus* de 3 cm de diámetro y 2 cm de altura. Influencia de la temperatura.

Como era de esperar se detectó para ambos músculos una influencia de la temperatura del aire de secado en las cinéticas de deshidratación, de manera que un aumento en ésta conllevaba una deshidratación más rápida de las muestras.

**5.5.3. Modelización de las cinéticas de secado**

Con el fin de analizar la influencia de la contracción y de la resistencia externa a la transferencia de materia en las experiencias realizadas a las condiciones de la cámara de secado, se consideraron cuatro modelos, según si se tuvo o no en cuenta la influencia de dichos fenómenos. Los modelos fueron resueltos analíticamente, por el método de separación de variables o numéricamente, por el método de las diferencias finitas, según sus características.

**5.5.3.1. Modelo sin contracción y sin resistencia externa**

El modelo más sencillo de todos los utilizados fue aquel en el cual no se tuvo en cuenta el efecto de la contracción ni de la resistencia externa en la cinética de secado. La resolución de este modelo se realizó de dos maneras: analítica (método de separación de variables) y numéricamente (método de las diferencias finitas).

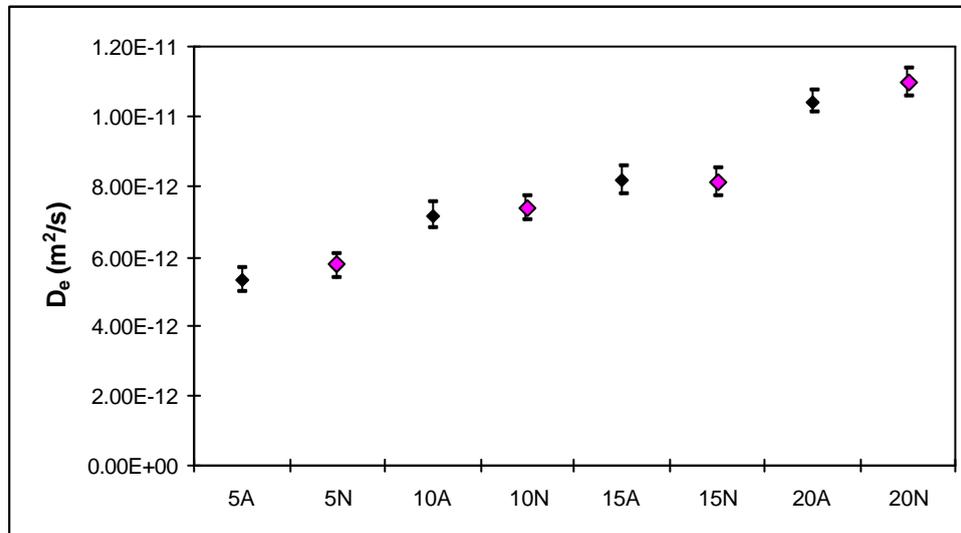
En la Tabla 5.5.3. se muestran los valores medios de difusividad efectiva identificados para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* utilizando la solución analítica y la numérica. En el Anejo 10.18. se muestran los resultados obtenidos para cada una de las cinéticas analizadas.

**Tabla 5.5.3.** Difusividad efectiva para el secado de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*. Modelo sin contracción y sin resistencia externa. (A) Solución analítica. (N) Solución numérica.

MUSCULO	T (K)	$D_e 10^{12} (m^2/s) (A)$	$D_e 10^{12} (m^2/s) (N)$
<i>Bíceps femoris</i>	278	$5.35 \pm 0.53$	$5.74 \pm 0.39$
<i>Bíceps femoris</i>	283	$7.19 \pm 0.57$	$7.37 \pm 0.66$
<i>Bíceps femoris</i>	288	$8.20 \pm 0.65$	$8.14 \pm 0.64$
<i>Bíceps femoris</i>	293	$10.43 \pm 1.05$	$10.97 \pm 1.17$
<i>Semimembranosus</i>	278	$5.04 \pm 0.48$	$5.32 \pm 0.49$
<i>Semimembranosus</i>	283	$6.90 \pm 0.62$	$7.15 \pm 0.54$
<i>Semimembranosus</i>	288	$8.12 \pm 0.63$	$7.97 \pm 0.44$
<i>Semimembranosus</i>	293	$11.04 \pm 1.00$	$10.18 \pm 1.58$

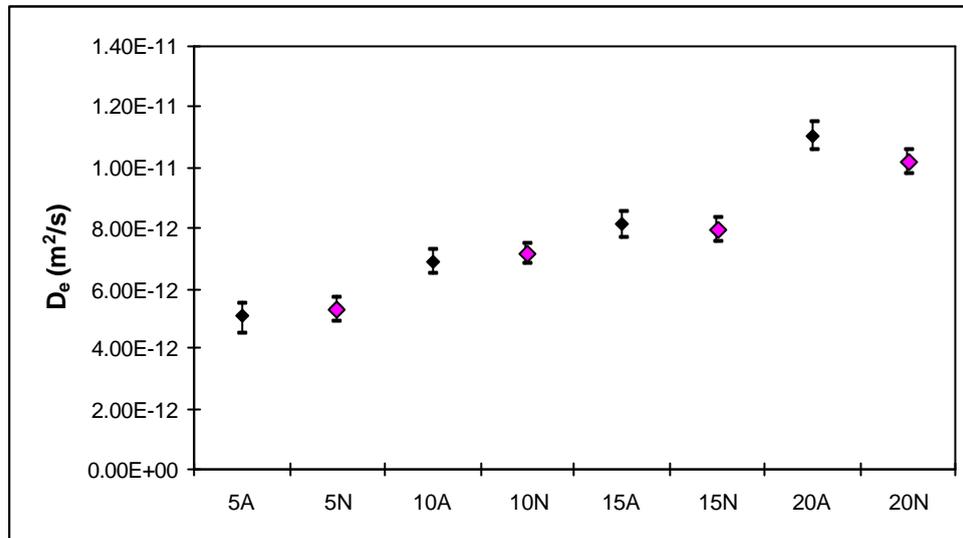
Al identificar los valores de difusividad para cada uno de los tamaños estudiados no se encontraron diferencias entre los valores (Anejo 10.18), calculándose un valor medio de difusividad para cada una de las temperaturas, al igual que en el caso de las cinéticas de secado determinadas en secadero convectivo. En la Tabla 5.5.3. se muestran los valores de difusividad efectiva obtenidos para cada músculo y para cada temperatura. Cabe destacar que cada uno de los valores de difusividad obtenidos se calculó como media de los 18 valores identificados (6 tamaños x 3 repeticiones) a cada temperatura y para cada músculo.

En las Figuras 5.5.4. y 5.5.5. se representan los intervalos LSD, calculados con un nivel de confianza del 95%. Mediante el cálculo de los intervalos LSD se pretende determinar si existen diferencias significativas entre las dos soluciones utilizadas (analítica y numérica) y entre las cuatro temperaturas de secado empleadas para determinar las cinéticas de deshidratación.



**Figura 5.5.4.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) calculados para el músculo *Biceps femoris*. Modelo sin contracción y sin resistencia externa. 5 (T = 5°C). 10 (T = 10°C). 15 (T = 15°C). 20 (T = 20°C). A, ◆ (solución analítica). N, ◆ (solución numérica).

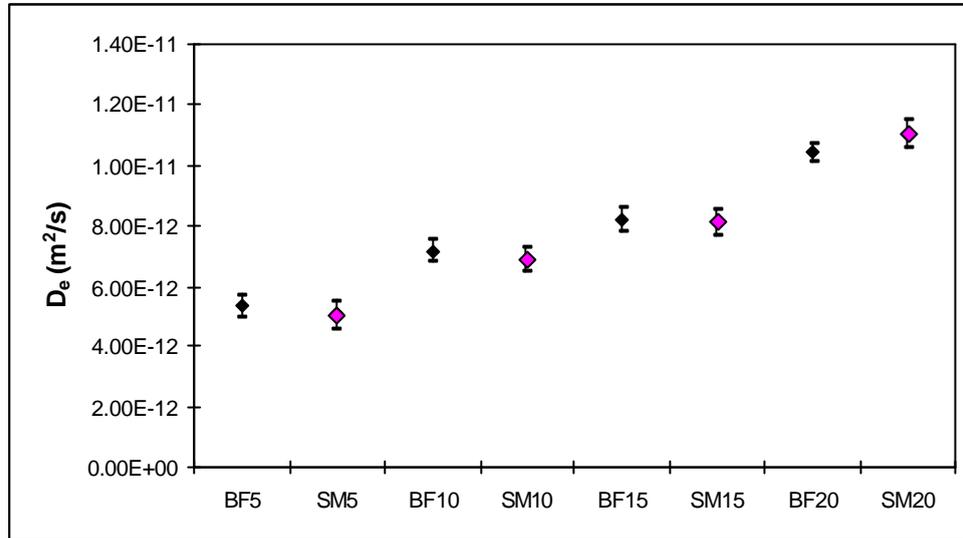
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN



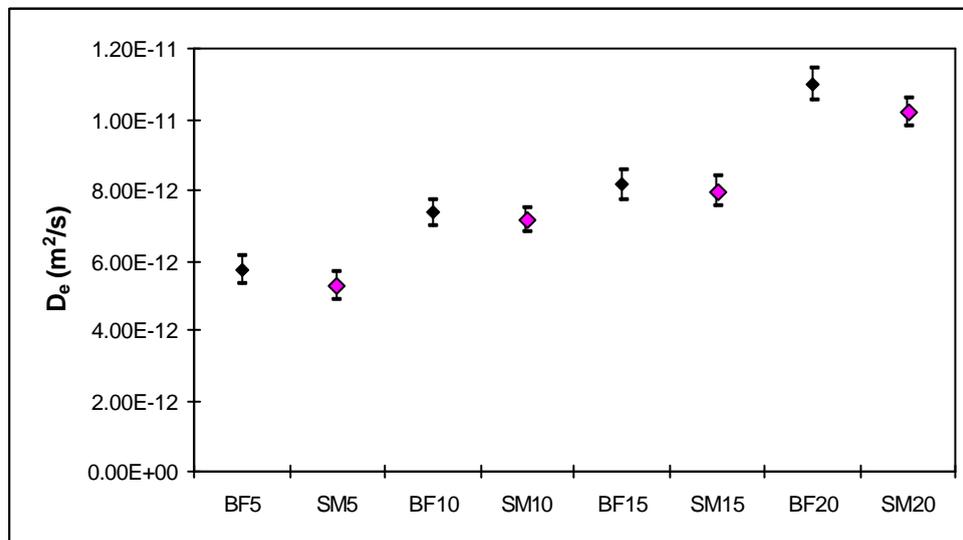
**Figura 5.5.5.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) calculados para el músculo *Semimembranosus*. Modelo sin contracción y sin resistencia externa. 5 (T = 5°C). 10 (T = 10°C). 15 (T = 15°C). 20 (T = 20°C). A,  $\blacklozenge$  (solución analítica). N,  $\blacklozenge$  (solución numérica).

Respecto a los resultados que se representan en las Figuras 5.5.4. y 5.5.5. cabe hacer algunos comentarios. En primer lugar, se muestra que para ambos músculos estudiados no existen diferencias significativas entre los valores de difusividad efectiva identificados utilizando la solución analítica o la solución numérica para resolver el modelo. Esto ya había sido puesto de manifiesto en el estudio de las cinéticas de deshidratación determinadas en secadero convectivo. Otro hecho a destacar es que los valores obtenidos para cada una de las temperaturas a las que se han determinado las cinéticas de deshidratación son significativamente diferentes entre sí.

Dado que en las cinéticas de deshidratación de carne fresca obtenidas en secadero convectivo se determinó que no existían diferencias significativas entre los valores de difusividad efectiva identificados para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus* sería interesante constatar si existen estas diferencias en el caso de músculos salados y en condiciones experimentales diferentes. Con este fin se calcularon los intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) para ambas soluciones estudiadas. Los resultados se representan en las Figuras 5.5.6. (solución analítica) y 5.5.7. (solución numérica).



**Figura 5.5.6.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Solución analítica. BF,  $\blacklozenge$  (*Biceps femoris*). SM,  $\blacklozenge$  (*Semimembranosus*). 5 (T = 5°C). 10 (T = 10°C). 15 (T = 15°C). 20 (T = 20°C).

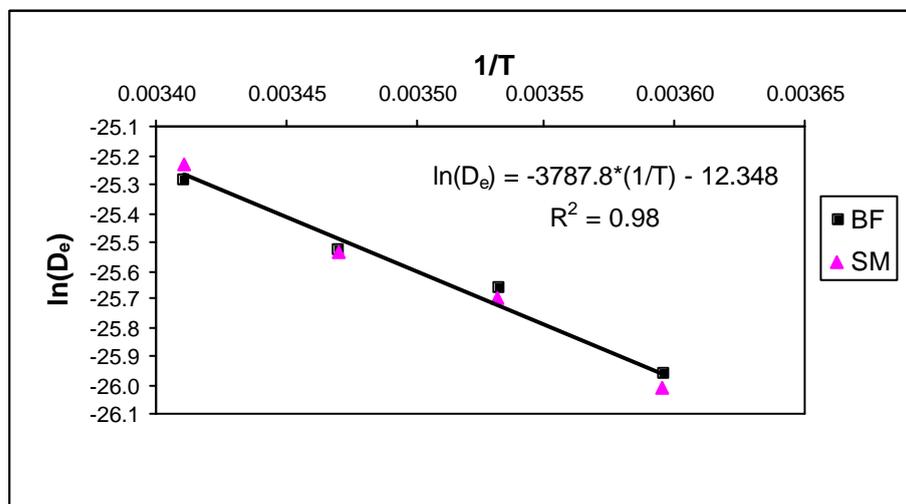


**Figura 5.5.7.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Solución numérica. BF,  $\blacklozenge$  (*Biceps femoris*). SM,  $\blacklozenge$  (*Semimembranosus*). 5 (T = 5°C). 10 (T = 10°C). 15 (T = 15°C). 20 (T = 20°C).

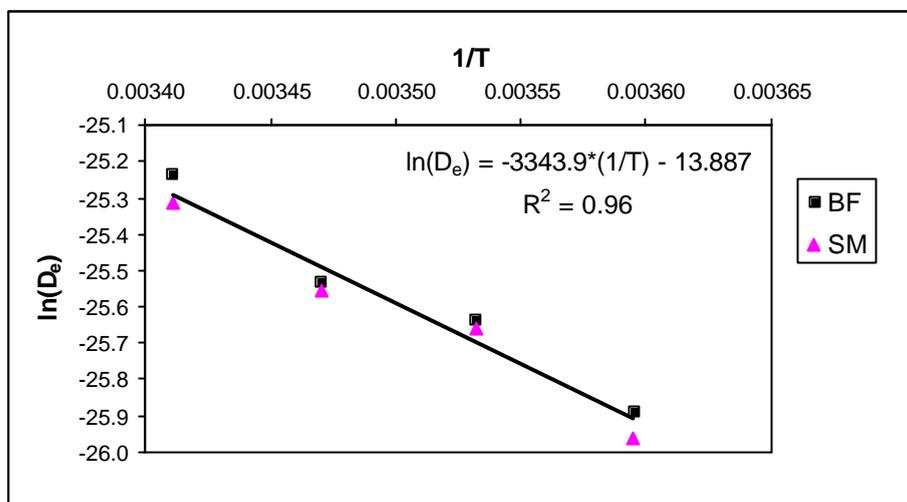
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 5.5.6. y 5.5.7. se observa, al igual que en el estudio de las cinéticas de deshidratación determinadas en el secadero convectivo, que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para ambos músculos estudiados.

El cálculo de los intervalos LSD (nivel de confianza 95%) mostró que existían diferencias significativas entre los valores de difusividad efectiva obtenidos para cada una de las temperaturas consideradas. Tal y como se observa en las Figuras 5.5.4., 5.5.5., 5.5.6. y 5.5.7., un aumento de la temperatura de deshidratación conlleva un aumento en el valor de difusividad efectiva identificado. La influencia de la temperatura en el valor de la difusividad efectiva se analizó utilizando la ecuación de Arrhenius. En las Figuras 5.5.8. y 5.5.9. se muestra la representación de  $\ln(D_e)$  frente a  $1/T$  para ambos músculos en estudio, tanto para los valores de difusividad efectiva identificados utilizando la solución analítica como la numérica.



**Figura 5.5.8.** Representación de los valores de  $\ln(D_e)$  frente a la inversa de la temperatura. Difusividades obtenidas utilizando la solución analítica. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.



**Figura 5.5.9.** Representación de los valores de  $\ln(D_e)$  frente a la inversa de la temperatura. Difusividades obtenidas utilizando la solución numérica. Modelo sin contracción y sin resistencia externa.

En las Figuras 5.5.8. y 5.5.9. se observa que los ajustes obtenidos son satisfactorios ( $R^2 = 0.98$  y  $R^2 = 0.96$ ) y muy similares para cada una de las soluciones utilizadas. A partir de los valores de las pendientes de las rectas obtenidas se calculó la energía de activación (Tabla 5.5.4.)

**Tabla 5.5.4.** Valor de la Energía de activación (kJ/mol). Modelo sin contracción y sin resistencia externa.

SOLUCIÓN	$E_a$ (kJ/mol)
Análítica	$31.48 \pm 4.07$
Numérica	$27.79 \pm 4.87$

Los valores de Energía de activación identificados son estadísticamente similares. Otros autores han encontrado valores parecidos para la energía de activación en distintos productos cárnicos. En la Tabla 5.5.5. se muestran algunos

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

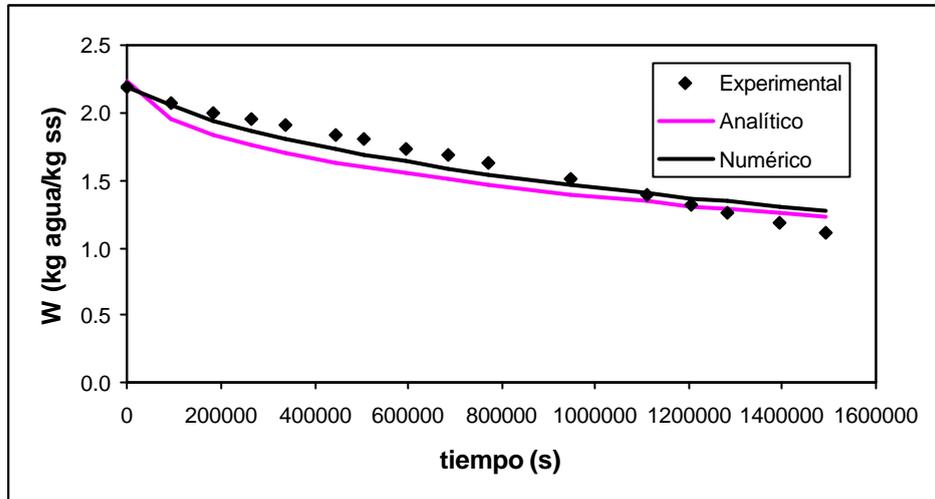
---

de estos resultados. En ella puede observarse que los resultados obtenidos en el presente estudio son concordantes con los obtenidos por otros autores.

**Tabla 5.5.5.** Energía de activación obtenida por varios autores en diversos productos cárnicos.

PRODUCTO	$E_a$ (kJ/mol)	REFERENCIA
Carne de cerdo fresca	22 - 28	Palmia et al., 1993
Tiburón	21.94	Park, 1998
Lomo de cerdo salado (dirección paralela a las fibras)	27.84	Gisbert, 1999
Ternera fresca	8 - 25	Mittal, 1999
Carne de cerdo fresca	25.94	Gou et al., 2003
Carne de cerdo salada	26.81	Gou et al., 2004

Respecto a la bondad de los ajustes, tal y como puede verse en el Anejo 10.18., en todos los casos se obtuvo un porcentaje de varianza explicada superior al utilizar la solución numérica. En la Figura 5.5.10. se muestra a modo de ejemplo los resultados obtenidos con la solución analítica y numérica para una muestra secada a 15°C, del músculo *Biceps femoris*, de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura. Tal y como puede observarse, los ajustes obtenidos no son satisfactorios, aunque se consigue una mejora de los mismos al utilizar el método de las diferencias finitas en la resolución del modelo. En ambos casos la tendencia del modelo no representa adecuadamente la tendencia de los puntos experimentales, por lo que cabe pensar que existen fenómenos que no se han descrito adecuadamente.



**Figura 5.5.10.** Resultados obtenidos utilizando una solución analítica y numérica del modelo sin contracción y sin resistencia externa. Cilindro de *Biceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura secado a temperatura de 15°C.

### 5.5.3.2. Modelo con contracción y sin resistencia externa

A la vista de los resultados obtenidos sin considerar la contracción en las cinéticas de secado, y dado que en ellos parecen existir fenómenos que deberían ser considerados en el modelo, se decidió incluir la contracción en la modelización, con el fin de intentar obtener un modelo que explicase mejor los resultados experimentales obtenidos.

Al incluir la contracción en el modelo, ya no era posible utilizar una solución analítica para su resolución, por lo que ésta se realizó aplicando el método de las diferencias finitas. En la Tabla 5.5.6. se muestran los resultados obtenidos para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

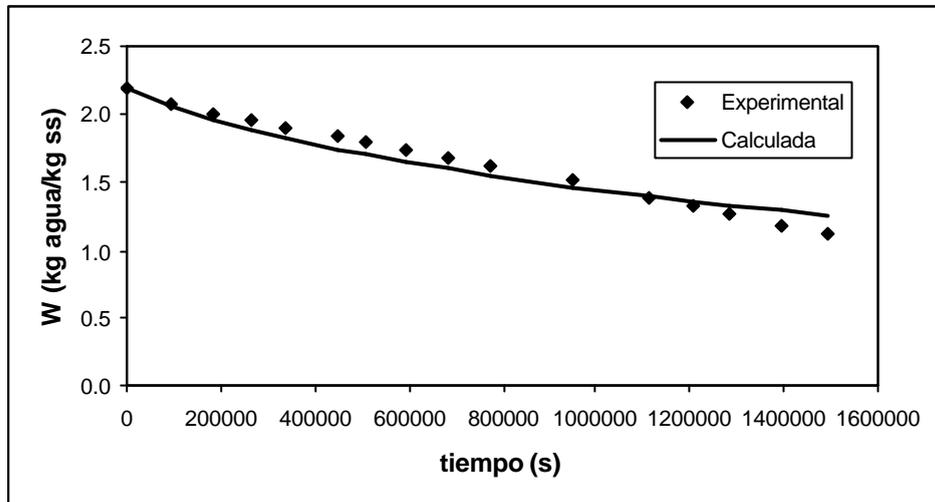
---

**Tabla 5.5.6.** Difusividad efectiva para el secado de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* a distintas temperaturas. Modelo con contracción y sin resistencia externa.

MUSCULO	TEMPERATURA (K)	$D_e 10^{12} \text{ (m}^2/\text{s)}$
<i>Bíceps femoris</i>	278	$5.44 \pm 0.56$
<i>Bíceps femoris</i>	283	$6.97 \pm 0.50$
<i>Bíceps femoris</i>	288	$7.72 \pm 0.55$
<i>Bíceps femoris</i>	293	$9.89 \pm 1.10$
<i>Semimembranosus</i>	278	$4.99 \pm 0.16$
<i>Semimembranosus</i>	283	$6.61 \pm 0.35$
<i>Semimembranosus</i>	288	$7.52 \pm 0.78$
<i>Semimembranosus</i>	293	$9.26 \pm 0.67$

Del mismo modo que en el modelo que no incluyó la contracción, no se encontraron diferencias en la difusividad para los distintos tamaños estudiados. Por ello, cada valor de difusividad efectiva mostrado en la Tabla 5.5.6. se calculó como media de los 18 valores (6 tamaños x 6 repeticiones) obtenidos para cada temperatura y cada músculo estudiado.

Al incluir la contracción en el modelo, se consiguieron porcentajes de varianza explicada superiores en todos los casos. Por lo tanto los ajustes mejoraron al incluir la contracción en el modelo. Los valores para cada una de las muestras estudiadas se muestran en el Anejo 10.18. En la Figura 5.5.11. se muestra el ajuste obtenido incluyendo la contracción en el modelo para un cilindro de *Bíceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura secado a una temperatura de 15 °C.

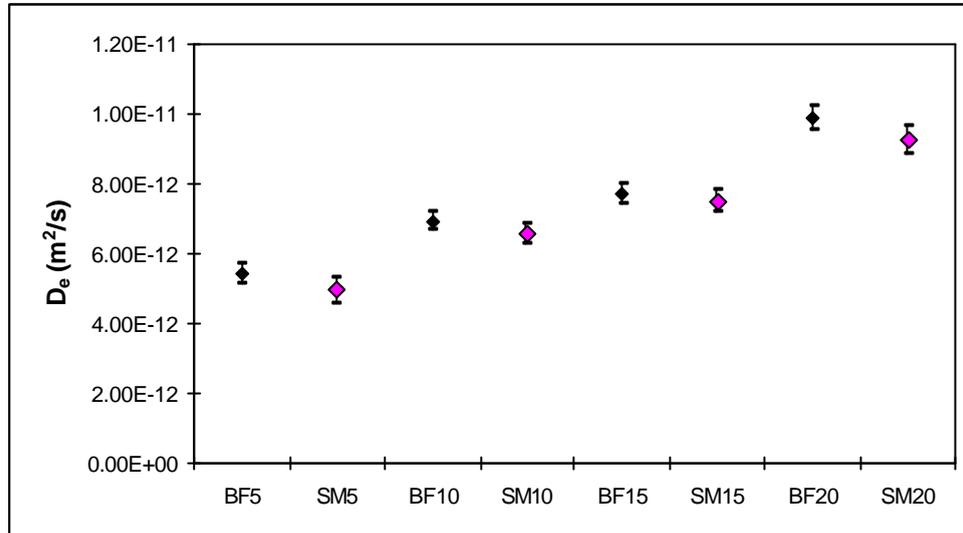


**Figura 5.5.11.** Resultados obtenidos utilizando el modelo con contracción y sin resistencia externa. Cilindro de *Biceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura, temperatura de secado 15°C.

Como puede observarse en la Figura 5.5.11., la solución obtenida se ajusta mejor al incluir la contracción en el modelo. Sin embargo, la tendencia observada continúa siendo diferente, por lo que cabe pensar en la existencia de otro parámetro que tuviera importancia.

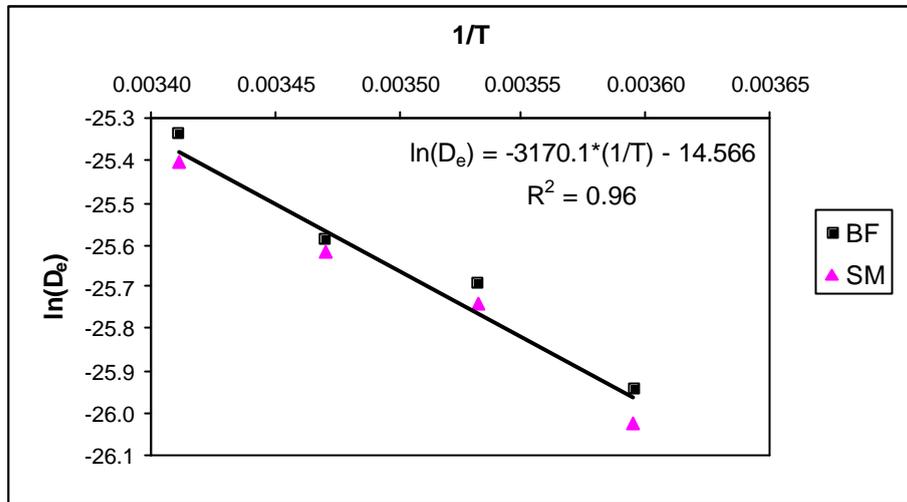
Tras la observación de la Tabla 5.5.6. parece que los valores de difusividad efectiva identificados para ambos músculos son muy similares. Además, como era de esperar, los valores de difusividad efectiva aumentaron al hacerlo la temperatura. Con el fin de determinar la importancia de la influencia de la temperatura y del músculo estudiado en los valores de difusividad efectiva identificados, se calcularon los intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.5.12.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN



**Figura 5.5.12.** Intervalos LSD (nivel de confianza del 95%). Modelo con contracción y sin resistencia externa. BF,  $\blacklozenge$  (*Biceps femoris*). SM,  $\blacklozenge$  (*Semimembranosus*). 5 (T = 5°C). 10 (T = 10°C). 15 (T = 15°C). 20 (T = 20°C).

En la Figura 5.5.12. se observa que los valores de difusividad efectiva identificados para ambos músculos no son estadísticamente diferentes. En cambio sí existen diferencias significativas entre los valores de difusividad identificados a cada temperatura de secado considerada. Con el fin de evaluar la influencia de la temperatura en los valores de difusividad efectiva se representó el  $\ln(D_e)$  frente a la inversa de la temperatura. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5.5.13.

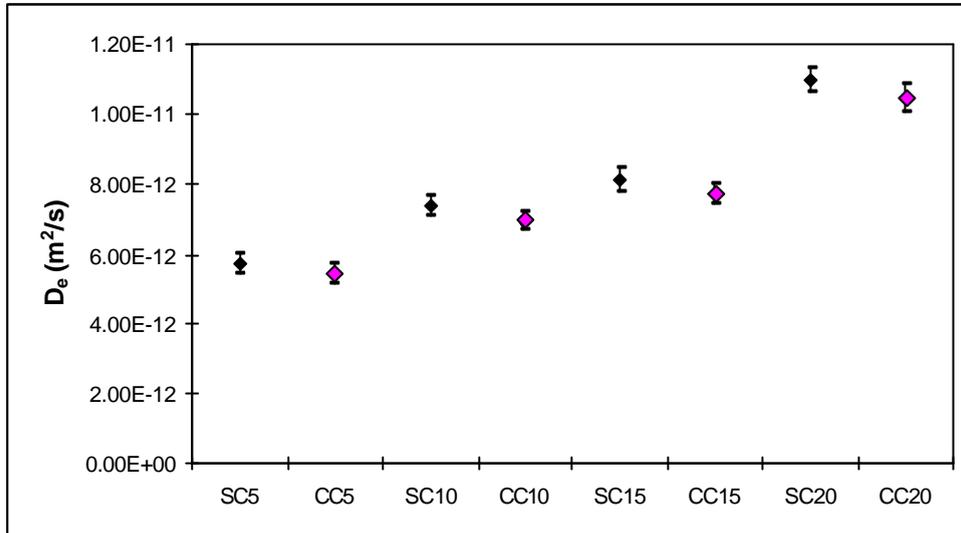


**Figura 5.5.13.** Representación de los valores de  $\ln(D_e)$  frente a la inversa de la temperatura. Modelo con contracción y sin resistencia externa.

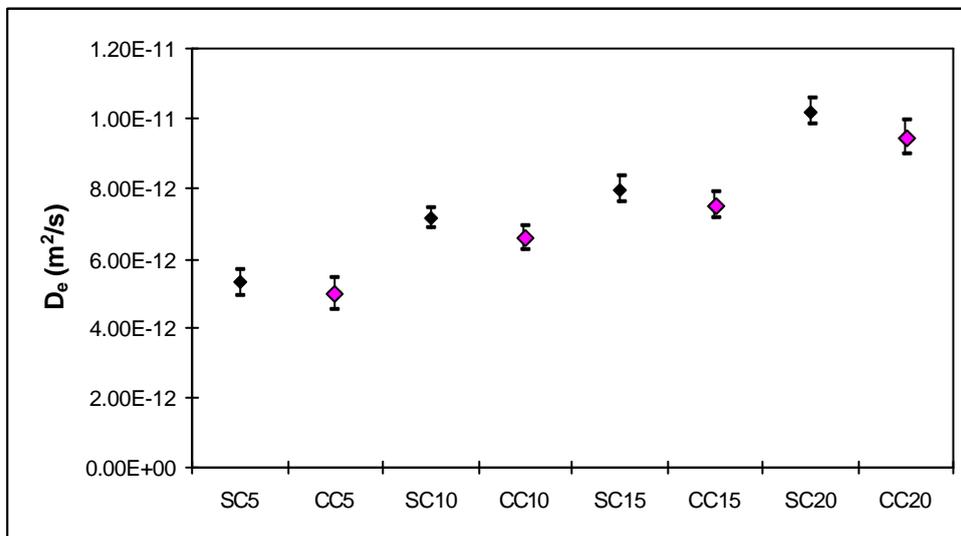
El ajuste obtenido utilizando la ecuación de Arrhenius fue satisfactorio ( $R^2 = 0.96$ ). A partir de la pendiente de la recta obtenida se determinó el valor de la energía de activación,  $E_a = 26.34 \pm 4.39$  kJ/mol. Este valor es estadísticamente similar al obtenido sin tener en cuenta la contracción en el modelo ( $E_a = 27.79 \pm 4.87$  kJ/mol) y además concuerda con los valores obtenidos por otros autores para diferentes productos cárnicos (Tabla 5.5.5).

A juzgar por el valor obtenido para la energía de activación a partir de los valores de difusividad efectiva identificados teniendo en cuenta y no teniendo en cuenta la contracción, ambos modelos proporcionan resultados estadísticamente similares. En las Figura 5.5.14. y 5.5.15. se muestran los intervalos LSD (nivel de confianza 95%) calculados para comparar los valores de difusividad efectiva identificados con cada uno de los modelos utilizados (sin contracción y con contracción).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

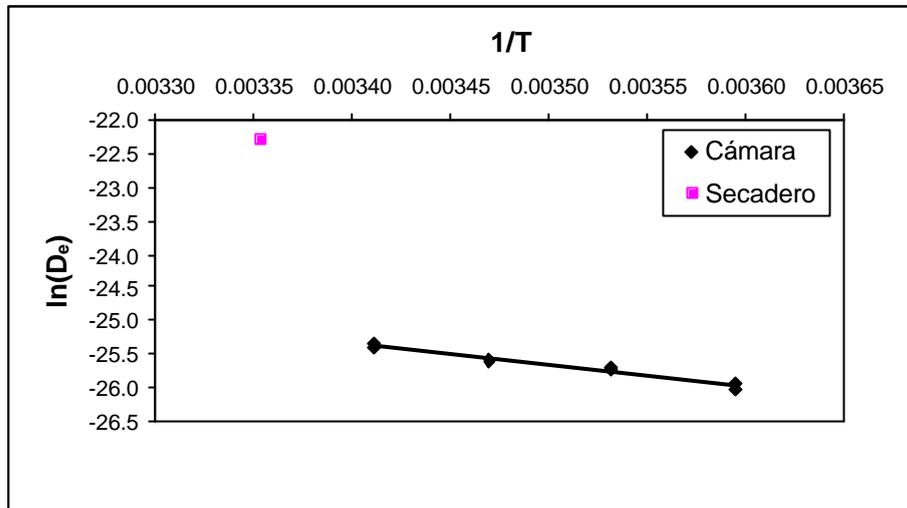


**Figura 5.5.14.** Comparación entre los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo sin contracción y sin resistencia externa (SC,  $\blacklozenge$ ) y con el modelo con contracción y sin resistencia externa (CC,  $\blacklozenge$ ). Músculo *Biceps femoris*.



**Figura 5.5.15.** Comparación entre los valores de difusividad efectiva identificados con el modelo sin contracción y sin resistencia externa (SC,  $\blacklozenge$ ) y con el modelo con contracción y sin resistencia externa (CC,  $\blacklozenge$ ). Músculo *Semimembranosus*.

En las Figuras 5.5.14. y 5.5.15. se puede observar que los valores de difusividad efectiva identificados teniendo en cuenta la contracción y sin tenerla son similares, no siendo estadísticamente diferentes. Por lo tanto, la contracción no introduce un elemento diferenciador en los valores de difusividad efectiva identificados cuando no se considera la resistencia externa a la transferencia de materia. Los intervalos LSD (nivel de confianza del 95%) calculados a partir de las difusividades identificadas con las experiencias realizadas en cámaras de secado a diferentes temperaturas, muestran que los valores de difusividad efectiva identificados a cada temperatura son significativamente diferentes. Además y como era de esperar se ha observado que conforme aumenta la temperatura a la que se realiza la deshidratación, se identifica un valor mayor de difusividad efectiva. Al comparar los valores de difusividad obtenidos a partir de las experiencias determinadas en cámaras de secado con los obtenidos a partir de las cinéticas determinadas en el secadero convectivo, se observa que los resultados no son concordantes. En este punto cabe destacar que la difusividad es una propiedad de transporte del material y por lo tanto es independiente de las condiciones del ambiente que lo rodea. Por ello, la difusividad obtenida a 25°C debería ser concordante con las obtenidas para 5, 10, 15 y 20°C, independientemente de la velocidad del aire utilizado. Por lo tanto cabría esperar que los valores de difusividad efectiva obtenidos se ajustasen a la ecuación de Arrhenius obtenida para las experiencias determinadas en las cámaras de secado. En la Figura 5.5.16. se muestra dicha representación (a partir de los valores obtenidos teniendo en cuenta la contracción) junto con el valor medio de difusividad efectiva obtenida para las muestras deshidratadas en secadero convectivo.



**Figura 5.5.16.** Representación de la Ecuación de Arrhenius calculada con los valores identificados a partir de las experiencias determinadas en las cámaras de secado. Comparación con los resultados obtenidos a partir de las cinéticas determinadas en el secadero convectivo. Modelización sin considerar la contracción.

En la Figura 5.5.16. se observa que los valores identificados a partir de unas experiencias de secado no concuerdan con los obtenidos a partir de otras. A partir de las cinéticas de secado obtenidas en el secadero convectivo se obtienen difusividades del orden de  $10^{-10}$ . En cambio, si el cálculo se realiza a partir de las cinéticas de deshidratación determinadas en cámara de secado se obtienen valores muchos menores, del orden de  $10^{-12}$ . Esta disminución no se justifica con la variación de temperatura, tal y como muestra la Figura 5.5.16. Además, en la bibliografía se encuentran valores del orden de los obtenidos a partir de las experiencias realizadas en el secadero (Tabla 5.4.9.)

Al observar los ajustes obtenidos en las cinéticas determinadas en cámara de secado, se observa que éstos son mejorables (Anejo 10.18.). Esto, unido a que las cinéticas se determinaron con el aire prácticamente en reposo, lleva a pensar que tal vez la resistencia externa sea predominante sobre la interna. En los dos modelos considerados para analizar las experiencias desarrolladas en cámara no se ha considerado la resistencia externa a la transferencia de materia. Esto conlleva que al identificar dos parámetros que determinan la resistencia total, si

uno de ellos tiene mucha más influencia (resistencia externa) que el otro, matemáticamente se produce un artificio al considerar que el otro también debe influir, de ese modo, la resistencia interna queda sobrevalorada y por lo tanto los valores de difusividad efectiva quedarían infraestimados. Así pues, es necesario realizar una aproximación diferente.

Por todo lo expuesto anteriormente, y dado que se han obtenido valores de energía de activación concordantes con los obtenidos por otros autores (Tabla 5.5.4.), a partir de la energía de activación y de la difusividad obtenida a 25°C (experiencias determinadas en secadero convectivo) se estimó según se indica a continuación la difusividad efectiva correspondiente a las temperaturas de deshidratación utilizadas en las cámaras de secado: 5, 10, 15 y 20°C. Como valor de difusividad efectiva a 25°C se tomó la media de los valores obtenidos a partir de las experiencias determinadas en el secadero convectivo a las tres velocidades de aire que fueron estudiadas (0.6, 2 y 2.8 m/s), tanto para geometría cilíndrica finita como infinita y considerando la resistencia externa en la modelización de las cinéticas de secado. Así, se obtuvo un valor de difusividad a 25°C sin tener en cuenta la contracción, a partir de la modelización de las experiencias obtenidas en el secadero convectivo sin considerar la contracción y considerando la resistencia externa a la transferencia de materia. También se obtuvo un valor de difusividad efectiva a 25°C considerando la contracción, a partir de los valores de difusividad identificados tras la modelización de las cinéticas obtenidas en el secadero considerando tanto la contracción como la resistencia externa a la transferencia de materia. Con estos valores de difusividad a 25°C y la energía de activación calculada sin considerar la contracción ( $27.79 \pm 4.87$  kJ/mol) y considerándola ( $26.34 \pm 4.39$  kJ/mol) mediante la ecuación de Arrhenius se calcularon los valores correspondientes de difusividad efectiva para las temperaturas a las que se llevó a cabo la deshidratación en las cámaras de secado. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5.7.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

**Tabla 5.5.7.** Valores de difusividad efectiva calculados para las experiencias determinadas en las cámaras de secado considerando resistencia externa.

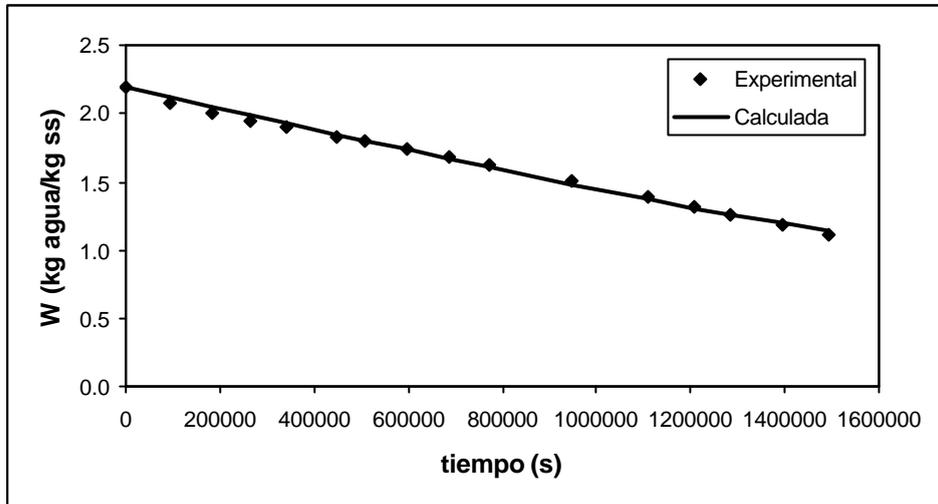
TEMPERATURA (K)	$D_e 10^{-10}$ (SIN CONTRACCIÓN)	$D_e 10^{-10}$ (CON CONTRACCIÓN)
278	0.96	0.95
283	1.19	1.16
288	1.47	1.42
293	1.79	1.72

### 5.5.3.3. Modelo sin contracción y con resistencia externa

A partir de los datos experimentales obtenidos en las cámaras de secado a las diferentes temperaturas estudiadas y utilizando los valores de difusividad efectiva calculados a cada temperatura sin tener en cuenta la contracción (Tabla 5.5.6.), se identificó el valor del coeficiente de transferencia de materia,  $k$  (m/s), para cada una de las experiencias analizadas. Para ello se utilizó la función "fminbnd" de Matlab 6.1, que optimiza funciones de una sola variable.

Tal y como puede observarse en el Anejo 10.18., al incluir la resistencia externa en el modelo, el porcentaje de varianza explicada obtenido aumentó sustancialmente, sobre todo en aquellas cinéticas en que se había obtenido un porcentaje de varianza explicada menor al no considerar la resistencia externa a la transferencia de materia. En algunos casos el aumento fue superior al 20%.

Como ejemplo, en la Figura 5.5.17. se muestra el ajuste obtenido para una de las 144 experiencias analizadas, incluyendo la resistencia externa en el modelo pero sin incluir la contracción. Concretamente se muestran los resultados correspondientes a un cilindro de *Biceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura, secado a una temperatura de 15 °C. En esta experiencia, el porcentaje de varianza explicada obtenido fue del 99.44%. Es importante señalar que la tendencia del modelo coincide con la de los puntos experimentales.



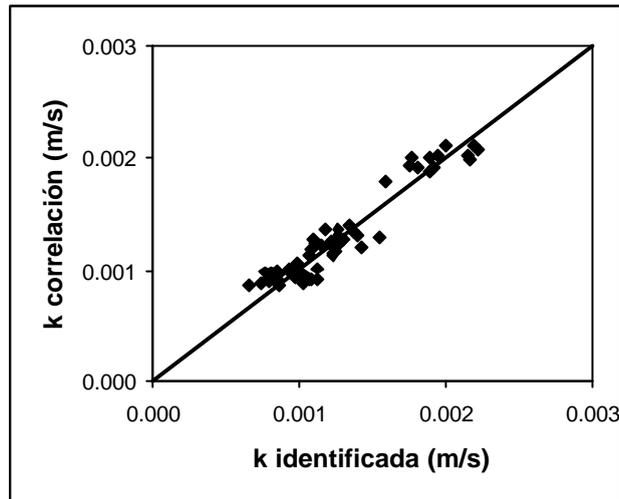
**Figura 5.5.17.** Modelización de la cinética de deshidratación de un cilindro de *Biceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura a 15°C. Modelo sin contracción y con resistencia externa.

Los valores del coeficiente de transferencia de materia identificados se compararon con los calculados a partir de una correlación semiempírica obtenida en la bibliografía para convección natural (Anejo 10.7.). Dado que no se encontraron en la bibliografía valores para los coeficientes  $a$  y  $n$  de la correlación que se adaptasen a las circunstancias en las que se determinaron las cinéticas de deshidratación, estos fueron identificados. Se obtuvieron a partir de los valores de  $k$  obtenidos para las muestras de *Biceps femoris* secadas a 20 °C. Mediante la herramienta Solver de la hoja de cálculo Microsoft Excel se minimizó la suma del cuadrado de las diferencias entre los valores de  $k$  obtenidos a partir de la correlación para convección natural (Anejo 10.7.) y los calculados con el ajuste del modelo sin considerar contracción y considerando resistencia externa a 20°C, tomando los parámetros  $a$  y  $n$  como variables decisorias. De esta manera se obtuvieron los parámetros  $a$  y  $n$ :  $a = 1.36$  y  $n = 0.001$ . El porcentaje de varianza explicada entre los valores de  $k$  calculados para cada una de las muestras y los obtenidos por el modelo fue del 91.68%. Con los coeficientes  $a$  y  $n$  así obtenidos se calculó un valor de  $k$  “semiempírico” para cada una de las muestras estudiadas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

En la Figura 5.5.18. se representan los valores de  $k$  calculados a partir de la correlación semiempírica frente a los identificados a partir de las experiencias mediante la función de optimización “fminbnd”.



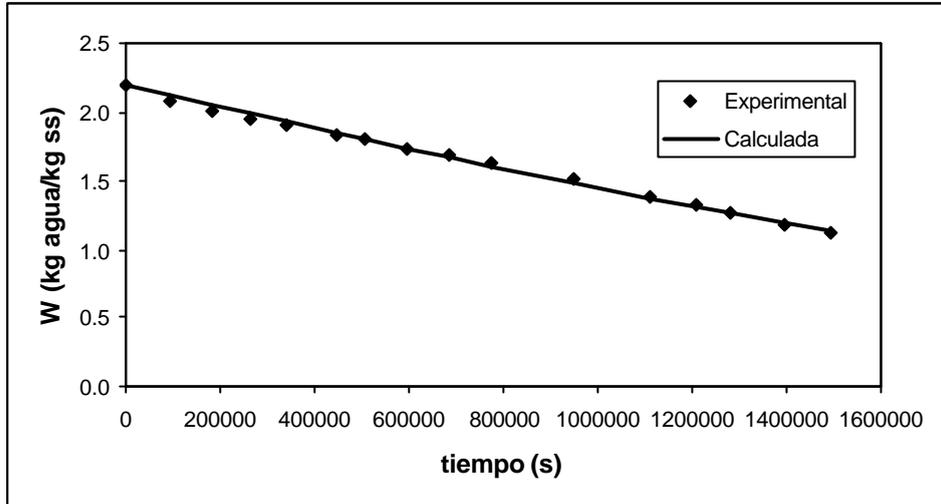
**Figura 5.5.18.** Comparación de las  $k$  identificadas con las calculadas mediante la correlación semiempírica. Modelo sin contracción y con resistencia externa.

En la Figura 5.5.18. se observa que los valores identificados son concordantes con los calculados tal y como se expone en el Anejo 10.7. El coeficiente de correlación obtenido entre ellos fue  $R^2 = 0.92$ , lo cual indicaría que los valores de  $k$  podrían ser identificados mediante optimización o bien calculados a partir de la correlación semiempírica obtenida en la bibliografía para convección natural.

#### 5.5.3.4. Modelo con contracción y con resistencia externa

En los apartados anteriores se ha observado que la inclusión de la contracción y de la resistencia externa a la transferencia de materia en los modelos mejora los porcentajes de varianza explicada obtenidos en los ajustes. Ambos efectos se han estudiado separadamente, por lo que en el presente apartado se estudiarán de manera conjunta. Para ello, los resultados experimentales se ajustaron al modelo que incluía tanto el efecto de la contracción como el de la resistencia externa a la transferencia de materia. Se utilizó el valor de la difusividad efectiva calculado, para cada una de las temperaturas utilizadas en cámara de secado (5, 10, 15 y 20°C), a partir de las experiencias realizadas a 25°C en el secadero convectivo (Tabla 5.5.6.). Con la función "fminbnd" de Matlab 6.1 se identificaron los valores correspondientes de  $k$  para cada una de las 144 experiencias analizadas. El modelo se resolvió de forma numérica, utilizando el método de las diferencias finitas.

El porcentaje de varianza explicada obtenido al incluir la contracción se mantuvo prácticamente constante en todas las muestras analizadas, con respecto a las varianzas obtenidas al modelizar las cinéticas sin considerar la contracción pero considerando la resistencia externa a la transferencia de materia (Anejo 10.18.). Es decir, en las cinéticas de secado determinadas en cámaras de secado, con convección natural, una vez considerado el efecto de la resistencia externa, la contracción prácticamente no influye en los resultados obtenidos. En la Figura 5.5.19. se muestra como ejemplo el ajuste obtenido para una muestra de *Bíceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura que se deshidrató a una temperatura de 15 °C.

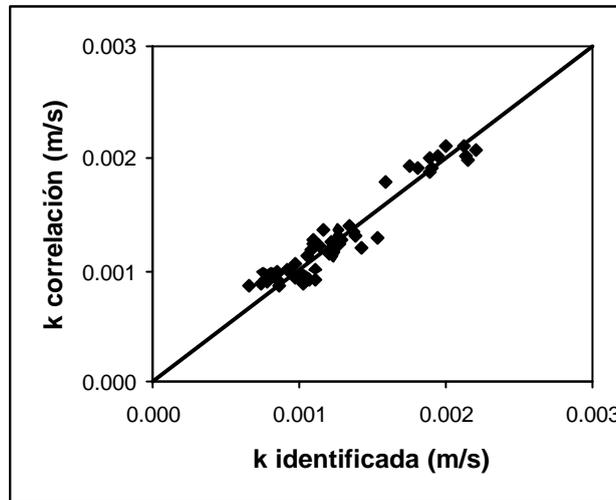


**Figura 5.5.19.** Modelización de la cinética de deshidratación de un cilindro de *Bíceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura a 15°C. Modelo con contracción y con resistencia externa.

En la cinética mostrada en la Figura 5.5.19. el porcentaje de varianza explicada obtenido fue del 99.44%, el mismo que al modelizar los datos experimentales teniendo en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia pero sin considerar la contracción. Cabe destacar que además tanto los valores calculados mediante el modelo, como los obtenidos experimentalmente siguen una misma tendencia.

Al comparar los resultados obtenidos con cada uno de los modelos propuestos, se puede afirmar que es la consideración de la resistencia externa en los modelos lo que conlleva una clara mejora en la explicación de los fenómenos que tienen lugar durante la deshidratación de muestras de carne saladas en cámara de secado, en las condiciones ensayadas en el presente estudio. En cambio, el efecto de la contracción es mucho menos importante a la hora de explicar los fenómenos que acontecen durante el proceso.

Con el fin de validar los valores de  $k$  identificados utilizando la función de optimización "fminbnd", se representaron estos valores (Figura 5.5.20.) frente a los valores calculados a partir de la correlación semiempírica obtenida en la bibliografía para convección natural (Anejo 10.7.).



**Figura 5.5.20.** Comparación de las  $k$  identificadas con las calculadas mediante la correlación semiempírica. Modelo con contracción y con resistencia externa.

En la Figura 5.5.20. se observa, al igual que al no incluir el efecto de la contracción en la modelización, que existe buena concordancia entre los valores identificados con el modelo y los calculados tal y como se explica en el Anejo 10.7. El coeficiente de correlación entre ellos fue  $R^2 = 0.92$ , exactamente igual que en el caso anterior.

#### 5.5.3.5. Comparación de resultados

Con objeto de analizar las diferencias existentes entre los resultados obtenidos, para cada uno de los modelos utilizados en el estudio de las cinéticas de deshidratación obtenidas en cámaras de secado, se analizarán conjuntamente respecto a varios aspectos: bondad de los ajustes, valores de  $D_e$  y valores de  $k$ .

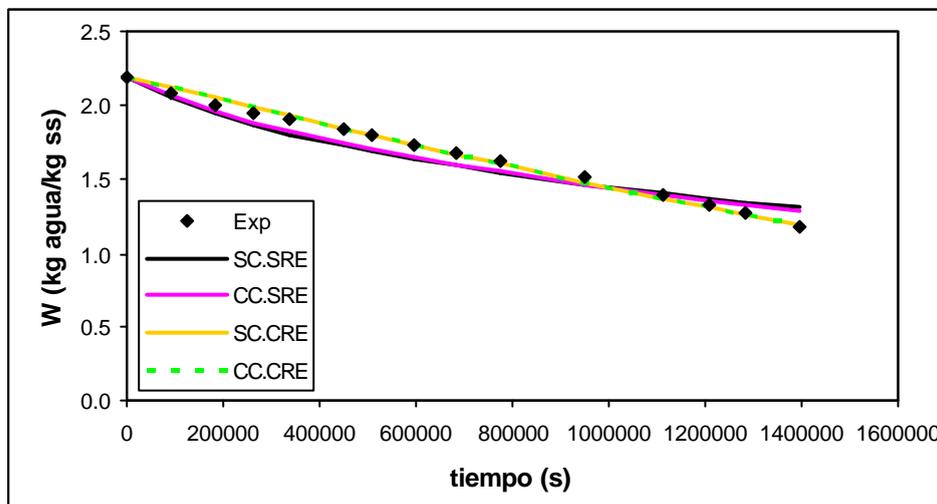
##### 5.5.3.5.1. Bondad de los ajustes

Tal y como se ha ido observando en los apartados anteriores, los porcentajes de varianza explicada aumentaron al incluir la contracción y la resistencia externa en los modelos. El aumento más importante se produjo al incluir la resistencia externa, hecho que era esperable, debido a que el secado se

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

realizó con aire prácticamente en reposo, por lo que cabía pensar que la resistencia externa a la transferencia de materia no fuera despreciable frente a la interna.

En la Figura 5.5.21. se muestra a modo de ejemplo, la cinética de secado correspondiente a un cilindro de *Biceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura y las soluciones obtenidas utilizando los cuatro modelos propuestos. Para el modelo sin contracción y sin resistencia externa se representa la solución numérica, al ser esta ligeramente mejor que la analítica.



**Figura 5.5.21.** Cinética de secado a 15 °C de un cilindro de *Biceps femoris* de 3 cm de diámetro y 3 cm de altura. Comparación entre los modelos utilizados.

Tal y como se muestra en la Figura 5.5.21., la inclusión de la contracción en el modelo, incluyendo o no la resistencia externa, no representó una mejora apreciable del ajuste obtenido. El cambio, el considerar la resistencia externa en el modelo supone una mejora importante de los resultados obtenidos para las condiciones de secado utilizadas. Concretamente, en la cinética que se muestra en la Figura 5.5.21. al utilizar el modelo en que no consideró ni la contracción ni la resistencia externa a la transferencia de materia, se obtuvo un porcentaje de varianza explicada del 87%. Este porcentaje aumentó al 91% al considerar la contracción. Pero fue la inclusión de la resistencia externa (tanto incluyendo como

despreciando la contracción) la que supuso una mejora sustancial en el ajuste, obteniéndose un porcentaje de varianza explicada del 99.4%. Además, la tendencia de la evolución obtenida con el modelo y la observada experimentalmente coinciden, lo que mostraría que los fenómenos más importantes que tienen lugar en el proceso están bien descritos en el modelo.

#### **5.5.3.5.2. Identificación de la difusividad efectiva**

En primer lugar, al modelizar las cinéticas de deshidratación sin tener en cuenta la resistencia externa se obtuvieron valores de difusividad del orden de  $10^{-12}$ . Estos valores no concordaban ni con los obtenidos a partir de las cinéticas determinadas en el secadero convectivo, que eran del orden de  $10^{-10}$ , ni con los identificados por otros autores para diferentes productos cárnicos (dependiendo de la temperatura y velocidad utilizadas, del orden de  $10^{-10}$  y  $10^{-11}$ ). Además, la difusividad efectiva es una propiedad de transporte y por lo tanto depende del material considerado y de la temperatura, por lo que las identificadas a partir de las cinéticas determinadas en el secadero deberían ser del mismo orden que las obtenidas a partir de las experiencias realizadas en cámara de secado. Este hecho unido a que parece que la resistencia externa a la transferencia de materia es importante en estas cinéticas, lleva a pensar que aparece algún tipo de artificio en la identificación con los modelos utilizados. En aquéllos en que no se incluyó la resistencia externa a la transferencia de materia y dado que ésta era importante, para compensar la resistencia global los modelos identifican una resistencia interna mayor que la real. O lo que es lo mismo, la difusividad efectiva identificada está infravalorada. Por ello, se calculó una difusividad para las cuatro temperaturas utilizadas en las cámaras de secado (5, 10, 15 y 20°C) a partir del valor de difusividad identificado a 25°C tras el análisis de las experiencias realizadas en el secadero convectivo y de la energía de activación. El cálculo de las difusividades se llevó a cabo mediante la ecuación de Arrhenius. En la Tabla 5.5.8. se muestran los valores de difusividad efectiva calculados para cada una de las temperaturas consideradas en el presente estudio.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

**Tabla 5.5.8.** Valores de difusividad efectiva a las distintas temperaturas de secado consideradas. SC (sin contracción). CC (con contracción).

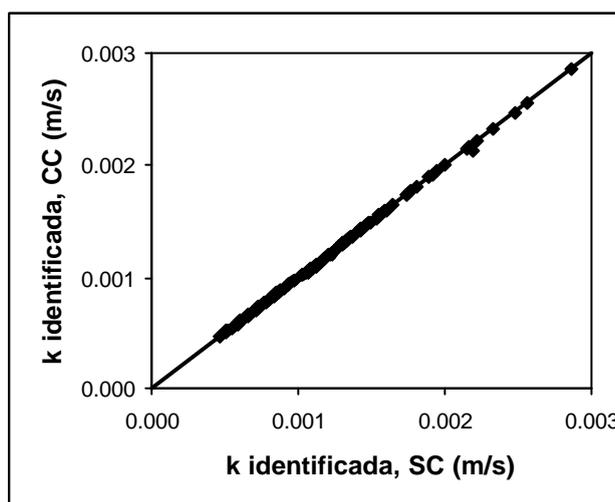
T (°C)	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s), SC	$D_e 10^{10}$ (m <sup>2</sup> /s), CC
5	0.96	0.95
10	1.19	1.16
15	1.47	1.42
20	1.79	1.72
25	2.08	2.04

En la Tabla 5.5.8. se observa que los valores calculados en el presente estudio, para un rango de temperaturas comprendido entre 5 y 25°C y considerando en la modelización la resistencia externa a la transferencia de materia, oscilan entre  $0.95 \cdot 10^{-10}$  y  $2.08 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Gou et al. (2002) realizaron un estudio en diferentes músculos de la pierna de cerdo salados (*Biceps femoris*, *Semimembranosus* y *Gluteus medius*) a 5°C, humedad relativa del 80% y velocidad del aire despreciable. Identificaron valores de difusividad entre  $0.20 \cdot 10^{-10}$  y  $0.26 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Estos valores son ligeramente inferiores a los obtenidos para temperatura 5°C en el presente estudio, aunque el orden de magnitud es el mismo en ambos casos. Estos mismos autores (Gou et al., 2003) obtuvieron para un rango de temperatura entre 5 y 26°C, humedad relativa del 80% y velocidad de aire prácticamente nula, valores de difusividad comprendidos entre  $0.12 \cdot 10^{-10}$  y  $1.11 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s en un estudio llevado a cabo en *Gluteus medius* salado. Nuevamente, se observa que los valores obtenidos en el presente estudio son ligeramente superiores, aunque del mismo orden de magnitud. Gisbert (2001) también identificó valores de difusividad inferiores a los identificados en el presente estudio, aunque del mismo orden de magnitud. Para un rango de temperatura entre 6 y 16°C y velocidad de aire muy pequeña determinó valores de difusividad comprendidos entre  $0.25 \cdot 10^{-10}$  y  $1.26 \cdot 10^{-10}$ . El hecho de que en el presente estudio se hayan identificado valores de difusividad ligeramente superiores a los obtenidos por los autores citados anteriormente, cuyas

condiciones experimentales son muy similares a las empleadas en el presente estudio, podría explicarse teniendo en cuenta que dichos autores modelizaron las cinéticas de deshidratación sin tener en cuenta la resistencia externa a la transferencia de materia, por lo que tal vez el valor de difusividad que identificaron estaría ligeramente infravalorado.

### 5.5.3.5.3. Identificación del coeficiente de transferencia de materia

En la Figura 5.5.22. se representan los valores de k identificados teniendo en cuenta la contracción frente a aquéllos que se identificaron sin tenerla en cuenta.



**Figura 5.5.22.** Representación de los coeficientes de transferencia de materia identificados teniendo en cuenta la contracción frente a los identificados sin tenerla en cuenta.

Se observa una buena concordancia entre los valores, ya que el coeficiente de correlación obtenido entre los valores de k identificados con ambos modelos que incluyeron la resistencia externa a la transferencia de materia (con contracción y sin contracción) fue  $R^2 = 0.99985$ . De este hecho se desprende que el valor de k identificado resulta prácticamente independiente de la contracción de las muestras deshidratadas, en las condiciones del presente estudio.

### 5.6. Secado de músculos enteros en cámaras de secado

Con el fin de validar los resultados obtenidos en muestras cilíndricas, se llevaron a cabo cinéticas de deshidratación de músculos enteros salados. En los apartados anteriores se ha observado que para la deshidratación de carne salada en cámaras a baja temperatura, la contracción era un aspecto que influía poco en las cinéticas de deshidratación, siendo la resistencia externa a la transferencia de materia el factor determinante. Por ello, los resultados experimentales obtenidos para el secado de músculos enteros se modelizaron sin considerar la contracción pero considerando la resistencia externa a la transferencia de materia.

Los valores de difusividad efectiva fueron los calculados para 5 y 15 °C sin incluir el efecto de la contracción pero sí el de la resistencia externa:  $D_e$  (5°C) =  $0.96 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s y  $D_e$  (15°C) =  $1.47 \cdot 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Como valores de k se utilizaron aquéllos calculados utilizando la correlación semiempírica para convección natural a partir de las propiedades físicas del aire y del espesor medio de cada uno de los músculos (Anejo 10.7.). En este caso, al tratarse de una superficie vertical se tomaron para a y n los valores 0.59 y 0.25 respectivamente, tal como se aconseja en la bibliografía para esta correlación (Sucec, 1975).

**Tabla 5.6.1.** Valores de k calculados para un músculo entero.

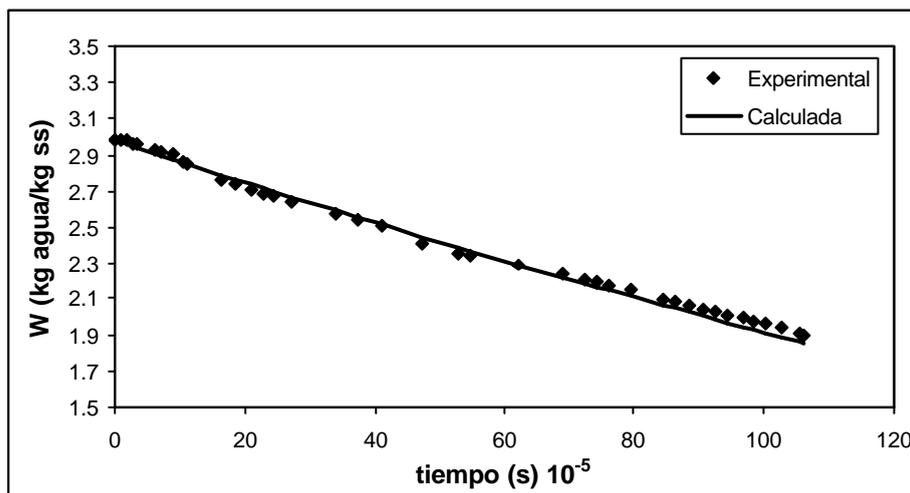
MÚSCULO	TEMPERATURA (°C)	k (m/s)
<i>Bíceps femoris</i>	5	$0.96 \cdot 10^{-3}$
<i>Bíceps femoris</i>	15	$1.11 \cdot 10^{-3}$
<i>Semimembranosus</i>	5	$1.00 \cdot 10^{-3}$
<i>Semimembranosus</i>	15	$1.28 \cdot 10^{-3}$

Se consideró una geometría de lámina infinita, al tener los músculos un espesor mucho más pequeño que sus otras dos dimensiones. Con los valores de  $D_e$  y k mostrados anteriormente se calcularon las cinéticas de secado sin tener en cuenta la contracción, pero sí la resistencia externa a la transferencia de materia. El porcentaje de varianza explicada obtenida para cada una de las experiencias se muestra en la Tabla 5.6.2.

**Tabla 5.6.2.** Porcentaje de varianza explicada obtenido en función de la temperatura de secado y del músculo deshidratado.

MÚSCULO	TEMPERATURA (°C)	% var
<i>Bíceps femoris</i>	5	99.38
<i>Bíceps femoris</i>	15	99.11
<i>Semimembranosus</i>	5	99.55
<i>Semimembranosus</i>	15	99.04

Tal y como muestra la Tabla 5.6.2., se obtuvieron en todos los casos porcentajes de varianza explicada superiores al 99%, lo cual indica que los ajustes obtenidos son satisfactorios. En las Figuras 5.6.1., 5.6.2., 5.6.3.y 5.6.4. se muestran las cinéticas experimentales y calculadas obtenidas para cada una de las muestras estudiadas. En estas Figuras también se observa una buena concordancia entre los resultados experimentales y los calculados, siguiendo ambas series la misma tendencia, de lo que cabría deducir que los valores de difusividad efectiva determinados para cilindros de carne son extrapolables a otras geometrías y que el valor del coeficiente de transferencia de materia puede estimarse adecuadamente con las ecuaciones semiempíricas citadas.



**Figura 5.6.1.** Cinéticas experimental y calculada de *Bíceps femoris* salado deshidratado a 5°C.

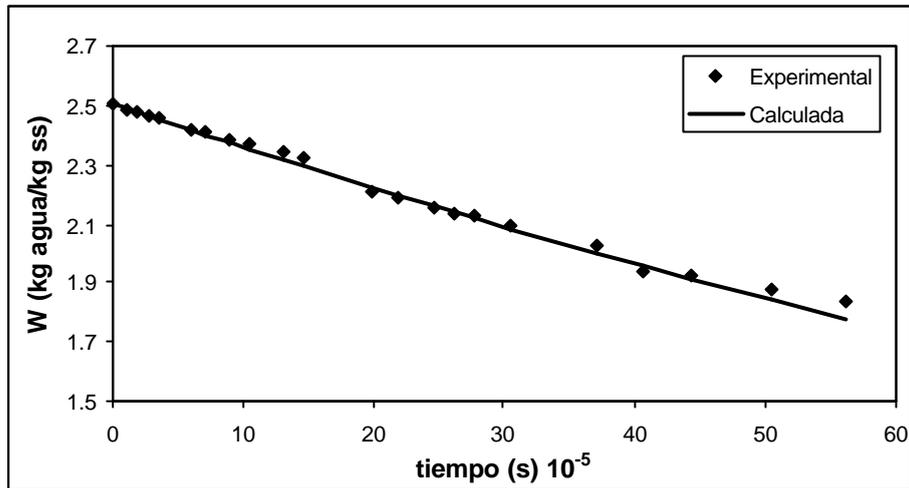


Figura 5.6.2. Cinéticas experimental y calculada de *Biceps femoris* salado deshidratado a 15°C.

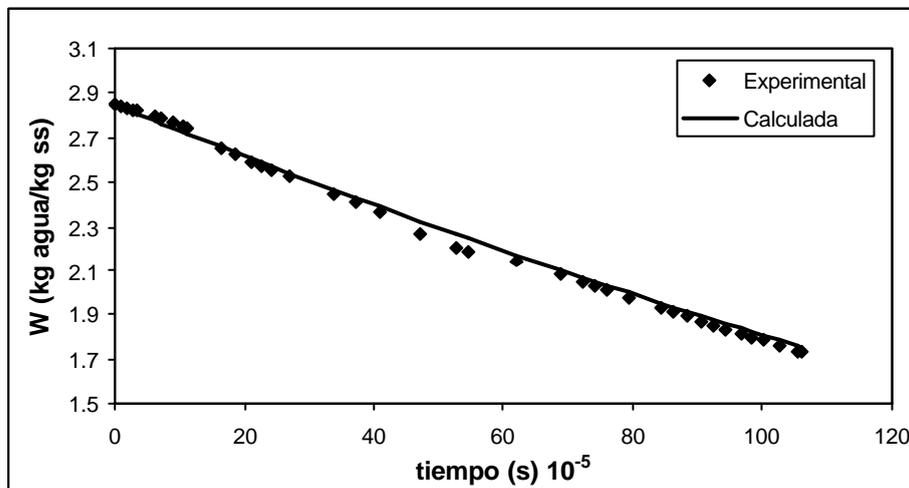


Figura 5.6.3. Cinéticas experimental y calculada de *Semimembranosus* salado deshidratado a 5°C.

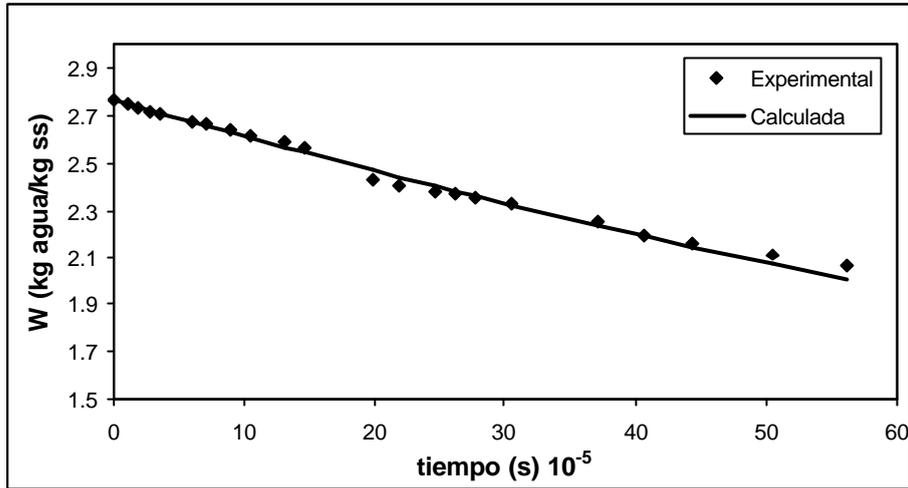


Figura 5.6.4. Cinéticas experimental y calculada de *Semimembranosus* salado deshidratado a 15°C.





## **6. CONCLUSIONES**



## 6. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se desprenden del presente trabajo pueden resumirse en los siguientes puntos:

1.- Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre el secado de alimentos en general, y en especial sobre aquellos trabajos que estudian la influencia de la contracción que se produce durante el proceso. Estos estudios en su mayor parte se realizaron sobre materiales porosos, siendo escasos los dedicados a productos cárnicos.

2.- Otros aspectos tratados en la revisión bibliográfica han sido el estudio del equilibrio aire – agua – alimento y de los métodos de resolución empleados para resolver los modelos de secado. Los métodos de resolución utilizados dependen de la complejidad del modelo a resolver. Por ello se utilizan métodos analíticos para modelos sencillos y métodos numéricos para modelos complejos. En deshidratación de alimentos los métodos numéricos más empleados son el método de los elementos finitos y el método de las diferencias finitas. Respecto a la determinación de isothermas de equilibrio, a los modelos matemáticos utilizados para describirlas, así como a la determinación del calor isostérico a partir de las isothermas de sorción, se puede indicar que tales temas han sido ampliamente estudiado en vegetales aunque los estudios en carne y productos cárnicos son más escasos.

3.- Las isothermas de desorción de los músculos del jamón del cerdo *Biceps femoris* y *Semimembranosus* se determinaron a 4 temperaturas diferentes, 25, 30, 35 y 40°C, obteniéndose resultados similares para todos los casos. Los resultados obtenidos tras el cálculo de los intervalos LSD con un nivel de confianza del 95% fueron similares en ambos músculos. Las diferencias de actividad de agua fueron significativas para las distintas temperaturas en la región de actividad de agua baja, al contrario que en las regiones de actividad media y alta.

## CONCLUSIONES

---

4.- La modelización de los datos experimentales se realizó utilizando cinco modelos: GAB, BET, Halsey modificado, Oswin y Henderson. Los ajustes obtenidos, teniendo en cuenta o no la influencia de la temperatura, fueron satisfactorios en todos los casos ( $EMR < 10\%$  y  $\%var > 96\%$ ), aunque fueron peores al tener en cuenta el efecto de la temperatura. Los mejores ajustes se obtuvieron con el modelo de GAB.

5.- Los calores isostéricos de desorción se calcularon a partir de las isotermas de desorción aplicando la ecuación de Clausius–Clapeyron. Para los dos músculos se observó una influencia de la humedad en el valor del calor isostérico. En la representación de éste frente a la humedad, se diferenciaron dos zonas. La primera desde que se inicia la desorción, con variaciones mínimas de calor isostérico cuando la humedad disminuye, y la segunda hacia el final de la desorción, con variaciones muy superiores. Los valores de calor isostérico obtenidos fueron similares para ambos músculos.

6.- Se determinaron las cinéticas de deshidratación de los músculos del jamón *Biceps femoris* y *Semimembranosus* para distintas geometrías, tamaños y condiciones de secado. Además se determinó la función de contracción para cada una de las condiciones de secado utilizadas. Las determinaciones experimentales de las cinéticas de secado se realizaron utilizando aire en movimiento y aire en reposo. En primer lugar se secaron muestras de geometría cilíndrica infinita y finita en un secadero convectivo a escala de laboratorio a temperatura  $25^{\circ}\text{C}$  y velocidad de aire de secado 0.6, 2 y 2.8 m/s. Además se determinaron las cinéticas de deshidratación de cilindros de carne salados en cámaras de secado a humedad relativa en torno al 85 % y a cuatro temperatura: 5, 10, 15 y  $20^{\circ}\text{C}$ . Por último se determinaron las cinéticas de deshidratación de músculos enteros salados a 5 y  $15^{\circ}\text{C}$ .

7.- Las determinaciones de radio y volumen en los cilindros de geometría cilíndrica finita secados en el secadero convectivo se realizaron utilizando tres métodos: medida directa con pie de rey, análisis de imagen y desplazamiento de un fluido. Al comparar los resultados obtenidos con cada uno de los métodos utilizados se vio que los valores que proporcionaba el método de análisis de

imagen eran similares a los obtenidos con el método de inmersión en un fluido. La medida directa con pie de rey proporcionó resultados más inexactos. El método de análisis de imagen presenta además la ventaja de que las medidas se toman a partir de fotografías de las muestras, por lo que pueden comprobarse y mejorar el análisis si procede en cualquier momento posterior.

8.- Para obtener las funciones de contracción se correlacionaron linealmente los cocientes  $R/R_0$  y  $V/V_0$  con el contenido en humedad de las muestras. Las medidas de radio y altura se obtuvieron utilizando el método de análisis de imagen, calculándose el volumen a partir de ellas. Para todas las condiciones de secado utilizadas, los valores obtenidos tanto para la pendiente como para la ordenada en el origen fueron estadísticamente similares. Además, se representó el volumen de agua perdida durante el proceso de secado frente al volumen perdido por las muestras. Los valores de ambos volúmenes fueron muy similares y por ello la representación se distribuyó alrededor de una recta de pendiente uno. Estos hechos indicarían que la contracción que sufrieron las muestras durante su deshidratación se debió principalmente a la pérdida de agua que experimentaron. Además, el hecho de que la contracción se relacionaba linealmente con la pérdida de agua indicaría que no se produjeron transiciones de fase durante el proceso.

9.- Los modelos utilizados para las cinéticas de secado obtenidas en secadero convectivo fueron tres para geometría cilíndrica infinita (sin contracción y sin resistencia externa, con contracción y sin resistencia externa, sin contracción y con resistencia externa) y cuatro para geometría cilíndrica finita (sin contracción y sin resistencia externa, con contracción y sin resistencia externa, sin contracción y con resistencia externa, con contracción y con resistencia externa). Los valores identificados para la difusividad efectiva, tanto para geometría cilíndrica finita como infinita, fueron estadísticamente similares. También se obtuvieron resultados estadísticamente similares para los músculos *Biceps femoris* y *Semimembranosus*.

## CONCLUSIONES

---

**10.-** Al modelizar sin considerar la resistencia externa a la transferencia de materia, se observó que un aumento en la velocidad del aire de secado provocaba un aumento en la difusividad efectiva, aunque los valores fueron similares para velocidades elevadas (2 y 2.8 m/s). Esto indicaría que para estas velocidades la resistencia interna predomina sobre la externa. Al considerar la resistencia externa en el modelo se obtuvieron valores estadísticamente similares para las tres velocidades de aire de secado. Por lo tanto y dado que la difusividad efectiva es una propiedad de transporte independiente de la velocidad del aire de secado, al no considerar la resistencia externa en el modelo en condiciones en que ésta predomina sobre la interna, el valor de difusividad efectiva quedaría infraestimado.

**11.-** Al considerar la resistencia externa se identificó el valor del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ). Los valores identificados fueron similares a los calculados a partir de ecuaciones semiempíricas obtenidas en la bibliografía.

**12.-** Al considerar o no la contracción se identificaron valores de difusividad efectiva y del coeficiente de transferencia de materia estadísticamente similares, por lo que puede afirmarse que el efecto de la contracción no es muy importante.

**13.-** Las cinéticas de secado de cilindros de carne salados obtenidos en cámara de secado se modelizaron utilizando cuatro modelos: sin contracción y sin resistencia externa, con contracción y sin resistencia externa, sin contracción y con resistencia externa, con contracción y con resistencia externa.

**14.-** Al modelizar sin considerar la resistencia externa en el modelo, los valores de la difusividad efectiva obtenidos fueron en torno a 100 veces inferiores a los obtenidos para la deshidratación en secadero convectivo. La influencia de la temperatura en la difusividad efectiva se explicó mediante la ecuación de Arrhenius, obteniéndose energía de activación entre 26.34 y 31.48 kJ/mol. Los valores de energía de activación fueron concordantes con los obtenidos por otros autores para diversos productos cárnicos.

**15.-** El hecho de que las difusividades identificadas a partir de las experiencias en la cámara fueran mucho menores que las obtenidas en secadero convectivo y que las obtenidas por otros autores, unido a que en las condiciones de secado presumiblemente la resistencia externa no era despreciable frente a la interna, indujo a pensar que a no tenerla en cuenta en la modelización, para compensar la resistencia global la resistencia interna debía aumentar y por lo tanto los valores de difusividad efectiva quedaban infraestimados.

**16.-** A partir de la energía de activación y del valor de los valores de difusividad identificados para cinéticas obtenidas en el secadero convectivo ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), se calcularon valores de difusividad efectiva para las temperaturas utilizadas en las cámaras de deshidratación (5, 10, 15 y  $20^{\circ}\text{C}$ ). Con esos valores, se modelizaron las cinéticas de deshidratación considerando la resistencia externa a la transferencia de materia (considerando y no considerando la contracción), y se identificaron los valores del coeficiente de transferencia de materia ( $k$ ). Éstos valores fueron concordantes con los obtenidos a partir de ecuaciones semiempíricas de la bibliografía.

**17.-** Los resultados obtenidos al utilizar los cuatro modelos fueron estadísticamente similares al incluir o no incluir la contracción en los modelos. También se obtuvieron resultados estadísticamente similares para los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

**18.-** El porcentaje de varianza explicada aumentó al incluir la contracción y la resistencia externa en los modelos. El aumento más importante se produjo al incluir la resistencia externa dado que el secado se realiza con aire prácticamente en reposo, lo que hace esperar que la resistencia externa a la transferencia de materia no sea despreciable frente a la interna.

**19.-** Las cinéticas experimentales para los músculos enteros salados se predijeron a partir de un modelo que no consideraba la contracción y sí la resistencia externa a la transferencia de materia y considerando una geometría de lámina infinita. Se utilizó el valor de la difusividad efectiva calculado para los cilindros de carne secados en las mismas condiciones. El valor del coeficiente de

## **CONCLUSIONES**

---

transferencia de materia se estimó a partir de la correlación de convección natural para transferencia de materia, considerando una superficie vertical. En todos los casos se obtuvo un valor de porcentaje de varianza explicada de las predicciones superior al 99%, de lo que cabría deducir que los resultados obtenidos son extrapolables a otras geometrías.

## **7. RECOMENDACIONES**



## 7. RECOMENDACIONES

A la vista de los resultados obtenidos se pueden sugerir varias vías para continuar este trabajo:

1.- Realizar experiencias de secado con otros músculos de la pierna de cerdo y determinar si los valores de  $D_e$ ,  $k$  y  $E_a$  para *Bíceps femoris* y *Semimembranosus* son aplicables a otros músculos.

2.- Desarrollar un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de una geometría irregular, como una pierna de cerdo entera, durante su deshidratación.

3.- Realizar experiencias de secado en cámaras con piernas de cerdo enteras a distintas condiciones de temperatura y humedad relativa del aire de secado y validar los modelos obtenidos.

4.- Estudiar parámetros de calidad (aroma, sabor, color y textura) de un jamón y relacionarlos con las condiciones a las que se lleva a cabo su deshidratación.

5.- Obtener un modelo capaz de simular el funcionamiento de una cámara de secado de jamones. Mediante este modelo junto con el obtenido para la cinética de secado de una pieza entera se podría intentar mejorar el diseño de las cámaras así como su funcionamiento y el rendimiento del proceso.





## **8. NOMENCLATURA**



## 8. NOMENCLATURA

$a$	Coficiente en la ecuación de convección natural.
$a_w$	Actividad de agua.
$a_1$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en NaCl.
$a_2$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en NaCl.
$a'$	Coficiente en la Ecuación 5.4.1.
$A$	Constante característica en la ecuación de Riedel.
$A_B$	Constante en el modelo de BET con efecto de la temperatura.
$A_G$	Constante en el modelo de GAB con efecto de la temperatura.
$A_H$	Constante en el modelo de Henderson con efecto de la temperatura.
$A_{Hmod}$	Constante en el modelo de Hasley modificado con efecto de la temperatura.
$A_O$	Constante en el modelo de Oswin con efecto de la temperatura.
$A'$	Área de evaporación ( $m^2$ ).
$b$	Constante característica en la ecuación de Riedel.
$b_1$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$b_2$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$B_B$	Constante en el modelo de BET con efecto de la temperatura.
$B_G$	Constante en el modelo de GAB con efecto de la temperatura.
$B_H$	Constante en el modelo de Henderson con efecto de la temperatura.
$B_{Hmod}$	Constante en el modelo de Hasley modificado con efecto de la temperatura.
$B_O$	Constante en el modelo de Oswin con efecto de la temperatura.

## NOMENCLATURA

---

$B_1$	Constante en el modelo de Henderson .
$B_2$	Constante en el modelo de Henderson $(\text{kg ss/kg agua})^{-1/B_1}$ .
$c_1$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$c_2$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$C$	Contenido en humedad del aire $(\text{kg/m}^3)$ .
$C_a$	Concentración de vapor de agua en la capa límite $(\text{kg agua/m}^3)$ .
$C_e$	Humedad de equilibrio del aire en la superficie del sólido $(\text{kg/m}^3)$ .
$C_B$	Constante en el modelo de BET.
$C_{B'}$	Constante en el modelo de BET con efecto de la temperatura.
$C_G$	Constante en el modelo de GAB.
$C_{G'}$	Constante en el modelo de GAB con efecto de la temperatura.
$C_{H\text{mod}}$	Constante en el modelo de Hasley modificado con efecto de la temperatura.
$C_O$	Constante en el modelo de Oswin con efecto de la temperatura.
$C_s$	Contenido en sal $(\text{kg NaCl/kg muestra})$ .
$C_{\text{scalc}}$	Contenido en sal calculado $(\text{kg NaCl/kg muestra})$ .
$C_{\text{se}}$	Contenido de sal en el equilibrio $(\text{kg NaCl/kg muestra})$ .
$C_{\text{sexp}}$	Contenido en sal experimental $(\text{kg NaCl/kg muestra})$ .
$C_{s0}$	Contenido inicial de sal $(\text{kg NaCl/kg muestra})$ .
$C_0$	Factor preexponencial en el cálculo de $C_G$ .
$C_\infty$	Concentración de vapor de agua fuera de la capa límite $(\text{kg agua/m}^3)$ .
$d_1$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$d_2$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$D$	Diámetro $(\text{m})$ .

$D_{AB}$	Difusividad del agua en el aire ( $m^2/s$ ).
$D_B$	Constante en el modelo de BET con efecto de la temperatura.
$D_e$	Difusividad efectiva ( $m^2/s$ ).
$D_G$	Constante en el modelo de GAB con efecto de la temperatura.
$D_O$	Constante en el modelo de Oswin con efecto de la temperatura.
$D_s$	Difusividad de la sal ( $m^2/s$ ).
$D_0$	Factor preexponencial en la ecuación de Arrhenius ( $m^2/s$ ).
$e_1$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$e_2$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$E_a$	Energía de activación (kJ/kg).
$E_{ci}$	Entalpía media acumulada (kJ/kg).
$E_G$	Constante en el modelo de GAB con efecto de la temperatura.
$f_1$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$f_2$	Constante en el modelo de GAB con influencia del contenido en sal.
$F_G$	Constante en el modelo de GAB con efecto de la temperatura.
$g$	Aceleración de la gravedad ( $9.81 m/s^2$ ).
$Gr$	Módulo de Grassof.
$H_m$	Calor de la monocapa de agua (kJ/mol).
$H_n$	Calor de la multicapa de agua (kJ/mol).
$H_1$	Calor de condensación del vapor de agua (kJ/mol).
$l$	Número de parámetros del modelo.
$j$	Densidad de flujo constante de sustancia que difunde ( $kg/m^2s$ ).
$j_D$	Factor de transferencia de materia.
$k$	Coefficiente de transferencia de materia (m/s).

## NOMENCLATURA

---

$k_B$	Factor preexponencial en el cálculo de $C_B$ .
$k_Y$	Coeficiente de transferencia de materia ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ).
$k_P$	Coeficiente de transferencia de materia ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{sPa}$ ).
$k_1$	Constante en el modelo empírico de Peleg.
$k_2$	Constante en el modelo empírico de Peleg.
$K_G$	Constante en el modelo de GAB.
$K_{H1}$	Constante en el modelo de Hasley modificado ( $\text{kg agua}/\text{kg ss}$ ) <sup>KH2</sup> .
$K_{H2}$	Constante en el modelo de Hasley modificado.
$K_{O1}$	Constante en el modelo de Oswin.
$K_{O2}$	Constante en el modelo de Oswin ( $\text{kg agua}/\text{kg ss}$ ).
$K_0$	Factor preexponencial en el cálculo de $K_G$ .
$L$	Semilongitud de un cilindro. Semiespesor de una lámina infinita (m).
$L_r$	Calor latente de vaporización del agua pura ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ).
$L_0$	Semilongitud inicial del cilindro (m).
$m$	Masa (kg).
$m_s$	Contenido en materia seca (kg ss).
$n$	Coeficiente en la ecuación de convección natural.
$n'$	Coeficiente en la Ecuación 5.4.1.
$N$	Número de medidas experimentales .
$N_i^e$	Funciones de forma en los elementos.
$N_i$	Funciones de forma globales.
$p_f$	Presión de vapor ejercida por el alimento (Pa).
$p_o$	Presión de vapor saturado de agua a la misma temperatura (Pa).
$P$	Presión parcial de vapor de agua (Pa).

## NOMENCLATURA

$P_b$	Peso registrado por la balanza durante la inmersión en aceite (kg).
$Pe$	Módulo de Pécelet.
$P_s$	Presión de saturación (Pa).
$Q^{st}$	Calor isostérico de sorción (kJ/kg).
$Q_n^{st}$	Calor isostérico neto de sorción (kJ/kg).
$r$	Distancia sobre el eje r (m).
$R$	Radio (m).
$\mathfrak{R}$	Constante de los gases perfectos (8.31441 kJ/kmol K).
$Re$	Módulo de Reynolds.
$R_0$	Radio inicial (m).
$Sc$	Módulo de Schmidt.
$Sh$	Módulo de Sherwood.
$St$	Módulo de Stanton.
$t$	Tiempo (s).
$T$	Temperatura absoluta ( $^{\circ}C$ , K).
$T_g$	Temperatura de transición vítrea ( $^{\circ}C$ , K).
$v$	Velocidad del aire de secado (m/s).
$V$	Volumen ( $m^3$ ).
$V_0$	Volumen inicial ( $m^3$ ).
$w_s$	Contenido en sal (kg NaCl/kg ss)
$W$	Contenido en humedad (kg agua/kg ss).
$W_B$	Humedad en la monocapa (kg agua/kg ss) en el modelo de BET.
$W_e$	Humedad media en el equilibrio (kg agua/kg ss).
$\overline{W}_{exp}$	Media de las humedades medias experimentales (kg agua/kg ss).

## NOMENCLATURA

---

$W_{i\text{calc}}$	Humedad media calculada mediante el modelo (kg agua/kg ss).
$W_{i\text{exp}}$	Humedad media experimental (kg agua/kg ss).
$W_G$	Humedad en la monocapa (kg agua/kg ss) en el modelo de GAB.
$W_0$	Humedad media inicial(kg agua/kg ss).
$x$	Distancia sobre el eje x (m).
$y$	Distancia sobre el eje y (m).
$z$	Distancia sobre el eje z (m).
$\alpha$	Factor de ponderación (MEF).
$\beta_n$	Valores característicos.
$\delta$	Constante características de un producto.
$\phi_0$	Humedad relativa en la película de evaporación.
$\phi_a$	Humedad relativa ambiente.
$\lambda$	Dimensión característica (m).
$\lambda_n$	Valores característicos (m).
$\mu$	Viscosidad del aire de secado ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ).
$\rho$	Densidad del aire de secado ( $\text{kg/m}^3$ ).
$\rho_a$	Densidad del aceite ( $\text{kg/m}^3$ ).
$\rho_{\text{int}}$	Densidad en la interfase ( $\text{kg/m}^3$ ).
$\rho_{\text{ss}}$	Densidad de sólido seco ( $\text{kg ss/m}^3$ ).
$\rho_g$	Densidad del aire de secado ( $\text{kg/m}^3$ ).
$\Psi$	Humedad media adimensional.
$\Psi_s$	Concentración de sal adimensional.
$\Delta C$	Diferencia de concentración ( $\text{kg/m}^3$ ).
$\Delta P$	Diferencia de presión (Pa).

$\Delta Y$  Diferencia de fracción másica (kg agua/kg total).

## **9. BIBLIOGRAFÍA**



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Abhijit, K.; Gupta, D. K. (2003). Air drying of osmosed button mushrooms. *Journal of Food Science and Technology*, 40(1), 23 – 27.
- Achanta, S.; Okos, M. R.; Cushman, J. H.; Kessler, D. P. (1997). Moisture transport in shrinking gels during saturated drying. *Association of International Chemical Engineers Journal*, 43(8), 2112 – 2122.
- Adam, E.; Mühlbauer, W.; Esper, A.; Wolf, W.; Spieb, W. (2000). Effect of temperature on water sorption equilibrium of onion (*Allium Cepa L.*). *Drying Technology*, 18(9), 2117 – 2129.
- Ade-Omowaye, B. I. O.; Rastogi, N. K.; Angersbach, A.; Knorr, D. (2002). Osmotic dehydration behaviour of red paprika (*Capsicum annuum L.*). *Journal of Food Science*, 67(5), 1790 – 1796.
- Adhikari, B.; Howes, T.; Bhandari, B. R.; Yamamoto, S.; Truong, V. (2002). Application of a simplified method based on regular regime approach to determine the effective moisture diffusivity of mixture of low molecular weight sugars and maltodextrin during desorption. *Journal of food Engineering*, 54(2), 157 – 165.
- Aguilera, J. M.; Stanley, D. W. (1999). *Microstructural Principles of Food Processing and Engineering*. Kluwer Academic Publishers, Aspen, United States of America.
- A.O.A.C. (1997). *Official method of analysis of the Association of Official Analytical Chemists International*. 16<sup>th</sup> edition, 3<sup>rd</sup> revision, March.
- Arnau, J.; Guerrero, L.; Casademont, G.; Gou, P. (1995). Physical and chemical changes in different zones of normal and PSE dry cured ham during processing. *Food Chemistry*, 52(1), 63 – 69.
- Arnau, J.; Guerrero, L.; Gou, P. (1997). Effects of temperature during the last month of ageing and of salting time on dry-cured ham aged for six months. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 74(2), 193 – 198.
- Arnau, J.; Guerrero, L.; Sárraga, C. (1998). The effect of green ham pH and NaCl concentration on cathepsin activities and the sensory characteristics of dry cured hams. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77(3), 387 – 392.
- Arnau, J. (2000). Aspectos tecnológicos que afectan al desarrollo de la textura y del flavor. En: *II Symposium Internacional del Jamón Curado*, Barcelona, España, 27 – 40.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Azzouz, S.; Guizani, A.; Jomaa, W.; Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55(4), 323 – 330.
- Bala, B.K. (1997). *Drying and Storage of Cereal Grains*. Science Publishers Inc, New Delhi, Calcutta.
- Barton-Gade, P. A. (1988). The effect of breed on meat quality characteristics in pigs. In: *Proceedings of the 34<sup>th</sup> International Congress Meat Science and Technology*, Brisbane, Australia, 568 – 570.
- Bassal, A.; Vasseur, J. (1992). Measurement of water activity at high temperature. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'92)*, Montreal, Canada, 313 – 321.
- Belghit, A.; Kouhila, M.; Boutaleb, B.C. (1999). Etude expérimentale de la cinétique de séchage de la verveine *Lippia citriodora*. *Revue des Energies Renouvelables*, 2(1), 17 – 26.
- Belitz, H. D.; Grosch, W. (1997). *Química de los alimentos*. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
- Bimbenet, J. J.; Daudin, J. D.; Wolf, E. (1986). Air drying kinetics of biological materials. In: *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'86)*, Cambridge, United States of America, 178 – 185.
- Boki, K.; Ohno, S.; Shinoda, S. (1990). Moisture sorption characteristics of kudzu starch and sweet potato starch. *Journal of Food Science*, 55(1), 232 – 235.
- Boki, K.; Ohno, S. (1991). Equilibrium isotherm equations to represent moisture sorption on starch. *Journal of Food Science*, 56(1), 1106 – 1107, 1110.
- Bon, J.; Sanjuán, N.; Tarrazó, J.; Mulet, A. (1994). Drying kinetics of broccoli. In: *Proceedings of the Poster Session. ISOPOW Practicum II*, Universidad de las Américas, Puebla, México 26 – 29.
- Boudhrioua, N.; Bonazzi, C.; Daudin, J. D. (2003). Estimation of moisture diffusivity in gelatin-starch gels using time-dependent concentration-distance curves at constant temperature. *Food Chemistry*, 82 (1), 139 – 149.
- Bouraoui, M.; Richard, P.; Durance, T. (1994). Microwave and convective drying of potato slices. *Journal of Food Process Engineering*, 17(3), 353 – 363.
- Bowser, T. J.; Wilhelm, L. R. (1995). Modelling simultaneous shrinkage and heat and mass transfer of a thin, nonporous film during drying. *Journal of Food Science*, 60(4), 753 – 757.

- Brunauer, S.; Emmett, P.H.; Teller, E. (1940). Adsorption of gases on multimolecular layer. *Journal of the American Chemistry Society*, 60, 309 – 319.
- Cadden, A. M. (1988). Moisture sorption characteristics of several food fibers. *Journal of Food Science*, 53(4), 1150 – 1155.
- Cárcel, J. A. (2003). Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de material. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Cepeda, E.; Ortiz-de-Latierro, R.; San-Jose, M. J.; Olazar, M. (1999). Water sorption isotherms of roasted coffee and coffee roasted with sugar. *International Journal of Food Science and Technology*, 34(3), 287 – 290.
- Clemente, G.; Bon, J.; Monleón, A.; Girona, M. A. (2001). Isotermas de sorción del músculo *Biceps femoris* a 25° C. En: *Ingeniería de Alimentos. Nuevas Fronteras en el Siglo XXI. Tomo II: Deshidratación de Alimentos y Propiedades Relacionadas*, Valencia, España, 41 – 46.
- Comaposada, J. (1999). Sorption isotherms and water diffusivity in muscles of pork ham at different NaCl contents. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya.
- Comaposada, J.; Gou, P.; Pakowski, Z.; Arnau, J. (2000a). Desorption isotherms for pork meat at different NaCl contents and temperatures. *Drying Technology*, 18(3), 723 – 746.
- Comaposada, J.; Gou, P.; Arnau, J. (2000b). The effect of sodium chloride content and temperature on pork meat isotherms. *Meat Science*, 55(3), 291 – 295.
- Comini, G.; Del Giudice, S.; Nonino, C. (1994). Finite element análisis in heat transfer. Basic formulation and linear problems. Taylor and Francis, Washington, United States of America.
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion*. Oxford University Press, Bristol, England.
- Chirife, J. (1979). Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: *Advances in Drying*. Hemisphere Pub. Co., New York, United States of America, 73
- Chirife, J.; Iglesias, H.A. (1992). Estimation of the precision of isosteric heats of sorption determined from the temperature dependence of food isotherms. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 25(1), 83 – 84.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Delgado, A. E.; Sun, D. W. (2002a). Desorption isotherms for cooked and cured beef and pork. *Journal of Food Engineering*, 51(2), 163 – 170.
- Delgado, A. E.; Sun, D. W. (2002b). Desorption isotherms and glass transition temperatura for chicken meat. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 1 – 8.
- Del Valle, F. R.; Nickerson, J. T. R. (1968). Salting and drying of fish. Diffusion of water. *Journal of Food Science*, 33, 499 – 503.
- Del Valle, J. M.; Cuadros, T. R. M.; Aguilera, J. M. (1998). Glass transitions and shrinkage during drying and storage of osmosed apple pieces. *Food Research International*, 31(3), 191 – 204.
- Diaferia, C.; Busolli, C.; Zanardi, S.; Palmia, F. (1998). Sorption isotherms and difusión coefficient of water in salami. In: *Proceedings of 44<sup>th</sup> International Congress of Meat Science and Technology*, Barcelona, Spain, 878 – 879.
- Diamante, L.M.; Munro, P.A. (1990). Water sorption isotherms of two varieties of sweet potato. *International Journal of Food Science and Technology*, 25(2), 140 – 147.
- Duras, N. H.; Hiver, H. L. (1993). Adsorption of water on cereal bread type dietary fibbers. *Journal of Food Engineering*, 20(1), 17 – 43.
- Ertugay, M. F.; Certel, M.; Gürses, A. (2000). Moisture adsorption isotherms of Tarhana at 25°C y 35°C and the investigation of fitness of various isotherm equations to moisture sorption data of Tarhana. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(14), 2001 – 2004.
- Faria, L. J. G.; Rocha, S. C. S.; Costa, C. M. L. (1998). Determination and analysis of adsorptions isotherms and isosteric heats of annatto (*Bixa Orellana L.*) seeds. In: *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS '98)*, Vol. C, Thessaloniki, Greece, 2041 – 2048.
- Flores, J. (1987). *Química de la carne y de los productos cárnicos*. En: *Química Agrícola II. Alimentos*. Editorial Alhambra, Madrid, España.
- Forrest, J. C.; Aberle, E. D.; Hedrick, H. B.; Judge, M. B.; Merkel, R. A. (1979). *Propiedades de la carne: Fundamentos de ciencia de la carne*. Editorial Acribia, Zaragoza, España.
- Frías, A.; Clemente, G.; Rosselló, C.; Mulet, A. (2003). Kinetics of fluidized bed drying of potato. In: *Proceedings of the Symposium EUDrying 03*, Heraklion, Creta, 224 – 230.

- García-Reverter, J.; Berna, A.; Chinesca, F.; Girona, M. A.; Mulet, A. (1996). Drying kinetics of cauliflower florets. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Internacional Drying Symposium (IDS'96), Vol B, Lodz, Poland, 913 – 920.
- García, L. H.; Kobylansky, J. R.; Pilosof, A. M. R. (2000). Modelling water sorption in okara soy milk. *Drying Technology*, 18(9), 2091 – 2103.
- Gekas, V.; Lamberg, I. (1991). Determination of diffusion coefficients in volume-changing systems. Application in the case of potato drying. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 317 – 326.
- Gil, M.; Guerrero, L.; Sárraga, C. (1999). The effect of meat quality, salt and ageing time on biochemical parameters of dry-cured *Longissimus dorsi* muscle. *Meat Science*, 51(4), 329 – 337.
- Gisbert, M.; Gou, P.; Pascual, A.; López, N. (2000). Water diffusion in dry-cured loin. In: Proceedings of 12<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'2000), Noordwijkerhout, The Netherlands.
- Gisbert, M. (2001). Influencia de las variables de proceso en la evolución físico-química y bioquímica del lomo embuchado. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Gou, P.; Mulet, A.; Comaposada, J.; Benedito, J.; Arnau, J. (1996). Water difusión in dry cured ham. In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> Internacional Drying Symposium (IDS'96), Vol B, Lodz, Poland, 778 – 784.
- Gou, P.; Comaposada, J.; Arnau, J. (2002). Meat pH and meat fibre direction effects on moisture diffusivity in salted ham muscles dries at 5°C. *Meat Science*, 61(1), 25 – 31.
- Gou, P.; Comaposada, J.; Arnau, J. (2003). NaCl content and temperature effects on moisture diffusivity in the *Gluteus medius* muscle of pork ham. *Meat Science*, 63(1), 29 – 34.
- Gou, P.; Comaposada, J.; Arnau, J. (2004). Moisture diffusivity in the lean tissue of dry-cured ham at different process times. *Meat Science*, 67(2), 203 – 209.
- Guerrero, L.; Gou, P.; Arnau, J. (1999). The influence of meat pH on mechanical and sensory textural properties of dry cured ham. *Meat Science*, 52(3), 267 – 273.
- Gummerson, R. J.; Hall, C.; Hoff, W. D.; Hawkes, R.; Holland, G. N.; Moore, W. S. (1979). Unsaturated water flow within porous materials observed by NMR imaging. *Nature*, 281, 56 – 57.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Hatamipour, M. S.; Mowla, D. (2002). Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 55(3), 247 – 252.
- Hatamipour, M. S.; Mowla, D. (2003). Correlations for shrinkage, density and diffusivity for drying of maize and green peas in a fluidized bed with energy carrier. *Journal of Food Engineering*, 59(2-3), 221 – 227.
- Hernández, P.; Navarro, J. L.; Toldrá, F. (1999). Lipolytic and oxidative changes in two Spanish pork loin products: dry-cured loin and pickled-cured loin. *Meat Science*, 51(2), 123 – 128.
- Hill, P. E.; Rizvi, S. S. H. (1982). Thermodynamic parameters and storage stability of drum dried peanuts flakes. *Food Science and Technology*, 15(4), 185 – 190.
- Hills, B. P.; Godward, J.; Wright, K. M. (1997). Fast radial NMR microimaging studies of pasta drying. *Journal of Food Engineering*, 33(3-4), 321 – 335.
- Honikel, K. O. (1992). The biochemical basis of meat conditioning. *New technologies for meat and meat products*. Ed.: Smulders, F.; Toldrá, F.; Flores, J.; Prieto, M. 135 – 161.
- Hossain, M. A.; Bala, B. K. (2000a). Moisture isotherm characteristics for red chilli. *Drying Technology*, 18(1-2), 503 – 515.
- Hossain, M. A.; Bala, B. K. (2000b). Moisture isotherm characteristics of green chilli. *International Journal of Food Properties*, 3(1), 93 – 104.
- Iguaz, A.; Esnoz, A.; Martínez, G.; López, A.; Vírveda, P. (2003). Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotatory dryer. *Journal of Food Engineering*, 59(2-3), 151 – 160.
- Inazu, T.; Iwasaki, K. (2000). Mathematical evaluation on effective moisture diffusivity in fresh Japanese noodles (Udon) by regular regime theory. *Journal of Food Science*, 65(3), 440 – 444.
- INE (2003). Anuario Estadístico de España 2002 – 2003. <http://www.ine.es/anuario0203/0203industria.pdf> Fecha de consulta: 17 – diciembre – 2003.
- Irudayaraj, J.; Wu, Y. (1997). Modelling heat and mass transfer in coupled systems during absorption and desorption. En: *Mathematical Modelling and Numerical Techniques in Drying Technology*, Marcel Dekker, Inc., New York, United States of America

- Irzyniec, Z.; Klimczak, J. (2003). Effect of temperature on sorption isotherms of Brussels sprout. *Food*, 47(1), 24 – 27.
- Jason, A. C. (1958). A study of evaporation and diffusion processes in the drying of fish muscle. In: *Fundamental Aspects of Dehydration of Foodstuffs*, Soc. Chem. Ind., London, United Kingdom, 103 – 135.
- Johnson, P. N. T.; Brennan, J. G.; Addo-Yobo, F. Y. (1998). Air drying characteristics of plantain (*Musa AAB*). *Journal of Food Engineering*, 37(2), 233 – 242.
- Johnson, P. N. T.; Brennan, J. G. (2000). Moisture sorption isotherm characteristics of plantain (*Musa, AAB*). *Journal of Food Engineering*, 44(2), 79 – 84.
- Jowitt, R.; Escher, F.; Hallstroem, B.; Meffert, H. F. T.; Spiess, W. E. L.; Vos, G. (1983). *Physical properties of foods*. Barking Essex, UK. Applied science publishers, 18, 425.
- Karathanos, V.; Anglea, S.; Karel, M. (1993). Collapse of structure during drying of celery. *Drying Technology* 11(5), 1005 – 1023.
- Kaymak-Ertekin, F.; Sultanoglu, M. (2001). Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. *Journal of Food Engineering*, 47(3), 225 – 231.
- Kechau, N.; Maalej, M. (1994). Evaluation of diffusion coefficient in the case of banana drying. In: *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'94)*, 841 – 848.
- Kim, S. S.; Bhowmik, S. R. (1995). Effective moisture diffusivity of plain yogurt undergoing microwave vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 24(1), 137 – 148.
- Kim, M. H.; Okos, M. R. (1999). Some physical, mechanical and transport properties of crackers related to the checking phenomenon. *Journal of Food Engineering*, 40(3), 189 – 198.
- Kiranoudis, C. T.; Maroulis, Z. B.; Tsami, E.; Marinos-Kouris, D. (1993). Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables. *Journal of Food Engineering*, 20(1), 55 – 74.
- Kouhila, M.; Belghit, A.; Daguene, M.; Boutaleb, B.C. (2001). Experimental determination of the isotherms of mint (*Mentha viridis*), sage (*Salvia officinalis*) and verbena (*Lippia citriodora*). *Journal of Food Engineering*, 47(4), 281 – 287.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Kowalski, S. J. (1996). Mathematical modelling of shrinkage during drying. *Drying Technology*, 14(2), 307 – 331.
- Krokida, M. K.; Maroulis, Z. B. (1997). Effect of drying method on shrinkage and porosity. *Drying Technology*, 15(10), 2441 – 2458.
- Krokida, M. K.; Zogzas, N. P.; Maroulis, Z. B. (2001). Mass transfer coefficient in food processing: compilation of literature data. *International Journal of Food Properties*, 4(3), 373 – 382.
- Lagoudaki, M.; Demertzis, P. G.; Kontominas, M. G. (1993). Moisture adsorption behavior of pasta products. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 26(6), 512 – 516.
- Levi, G.; Karel, M. (1995). Volumetric shrinkage (collapse) in freeze-dried carbohydrates above their glass transition temperature. *Food Research International*, 28(2), 145 – 151.
- Lewicki, P.P. (1998). A three parameter equation for food moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 21(2), 127 – 144.
- Lewis, W. K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Industrial and Engineering Chemistry*, 13(5), 427 – 432.
- Lewis, D. F.; Jewell, G. G. (1975). Structural alterations produced on processing meat. Part II. The effect of heat and polyphosphate on meat structure. *Leatherhead Food Research. Association Research Report No. 212.*
- Lioutas T. S.; Betchel, P. J.; Steinberg, M. P. (1984). Desorption and adsorption isotherms of meat-salt mixtures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 32(6), 1382 – 1385.
- Lomauro, C. J.; Bakshi, A. S.; Labuza, T. P. (1985). Moisture transfer properties of dry and semimoist foods. *Journal of Food Science*, 50(2), 397 – 400.
- Lopes-Filho, J. F.; Romanelli, P. F.; Barboza, S. H. R.; Gabas, A. L.; Telis-Romero, J. (2002). Sorption isotherms of alligator's meat (*Caiman crocodilus yacare*). *Journal of Food Engineering*, 52 (2), 201 – 206.
- Lozano, J. E.; Rotstein, E.; Urbicain, M. J. (1980). Total porosity and open-pore porosity in the drying of fruits. *Journal of Food Science*, 45, 1403 – 1407.
- Lozano, J. E.; Rotstein, E.; Urbicain, M. J. (1983). Shrinkage, porosity and bulk density of foodstuffs at changing moisture contents. *Journal of Food Science*, 48(5), 1497 – 1502, 1553.

- Luikov, A. V. (1966). Heat and mass transfer in capillary porous bodies. Pergamon Press, New York, United States of America.
- Margaritas, A.; King, C. J. (1971). Measurement of rates of moisture transport in porous media. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 10(3), 510.
- Marinos-Kouris, D.; Maroulis, Z. B. (1995). Transport properties in the drying of solids. In: *Handbook of Industrial Drying Volume 1, Second Edition*, Marcel Dekker Inc., New York, United States of America, 113 – 159.
- Markowski, M. (1997). Air drying of vegetables: evaluation of mass transfer coefficient. *Journal of Food Engineering*, 34(1), 55 – 62.
- Maskan, M.; Gögüs, F. (1998). Sorption isotherms and drying characteristics of mulberry (*Morus alba*). *Journal of Food Engineering*, 37(4), 437 – 449.
- Mayor, L.; Sereno, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 373 – 386.
- McLaughlin, C. P.; Magee, T. R. A. (1998). The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering*, 35(3), 267 – 280.
- McMinn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (1997a). Moisture sorption characteristics of starch materials. *Drying Technology*, 15(5), 1527 – 1551.
- McMinn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (1997b). Physical characteristics of dehydrated products. Part I. *Journal of Food Engineering*, 33(1-2), 37 – 48.
- McMinn, W. A. M.; Magee, T. R. A. (1999). Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. *Foods and Bioproducts Processing*, 77(C3), 175 – 193.
- Miketinac, M. J.; Sokhansanj, S.; Tutek, Z. (1992). Determination of heat and mass transfer coefficients in thin layer drying of grain. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 35(6), 1853 – 1858.
- Mittal, G. S. (1999). Mass diffusivity of food products. *Food Review International*, 15(1), 19 – 66.
- Moreira, R.; Figueiredo, A.; Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, 18(1-2), 279 – 294.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Motarjemi, Y. (1988). A study of some physical properties of water in foodstuffs. Water activity, water binding and water diffusivity in minced products. PhD Thesis. Lund University, Lund, Sweden.
- Moya, V. J.; Flores, M.; Aristoy, M. C.; Foldrá, F. (2001). Pork meat quality affects peptide and amino acid profiles during ageing process. *Meat Science*, 58(2), 197 – 206.
- Mujica, F.; Martínez, E. J.; Bercovich, F. C.; Bonino, N. B.; Alzamora, S. M. (1989). Sorption properties of dry cured ham. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 22(3), 89 – 92.
- Mujumdar A. S.; Devahastin, S. (2000). Fundamentals principles of drying. In: Mujumdar's practical guide to industrial drying, Exergex Corporation, Quebec, Canada, 1 – 22.
- Mulet, A.; Berna, A.; Borrás, M.; Piñaga, F. (1987). Effect of air flow rate on carrot drying. *Drying Technology*, 5(2), 245 – 258.
- Mulet, A.; Berna, A.; Rosselló, C.; López, N. (1992). Influence of fat content on the drying of meat products. In: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'92), Montreal, Canada, 844 – 853.
- Mulet, A. (1994). Drying modelling and water diffusivity in carrots and potatoes. *Journal of Food Engineering*, 22(1-4), 329 – 348.
- Mulet, A.; Sanjuán, N.; Bon, J.; Simal, S. (1999a). Drying model for highly porous hemispherical bodies. *European Food Research and Technology*, 210(2), 80 – 83.
- Mulet, A.; García-Reverter, J.; Sanjuán, R.; Bon, J. (1999b). Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. *Journal of Food Science*, 64(1), 64 – 68.
- Mulet, A.; García-Reverter, J.; Bon, J.; Berna, A. (2000). Effect of shape on potato and cauliflower shrinkage during drying. *Drying Technology*, 18(6), 1201 – 1219.
- Mulet, A.; García-Pascual, P.; Sanjuán, N.; García-Reverter, J. (2002). Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). *Journal of Food Engineering*, 53(1), 75 – 81.
- Mulet, A.; Rosselló, C.; Gou, P.; López, N. ; Clemente, G. (2004). Drying of meat and meat products. In: Dehydration of Products of Biological Origin, In Press, 223 – 250.

- Nozacki, Y.; Ichikawa, H.; Tabata, Y. (1993). Effect of amino acid addition on the isosteric sorption heat during dehydration of fish myofibrils. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries*, 59(7), 1209 – 1211.
- Okos, M. R.; Narsimham, G.; Singh, R. K.; Weitnauer, A. C. (1992). Food dehydration. *Handbook of engineering*, Marcel Dekker, New York, United States of America.
- O'Neill, D. J.; Lynch, P. B.; Troy, D. J.; Buckley, D. J.; Kerry, J. P. (2003). Influence of the time of year on the incidence of PSE and DFD in Irish pigmeat. *Meat Science*, 64(2), 105 – 111.
- Pakowski, Z.; Comaposada, J.; Gou, P.; Arnau, J. (2003). Experimental water diffusivity identification in raw meat based on Fickian diffusion model with and without shrinkage. In: *Proceedings of the Symposium EUDrying 03*, Heraklion, Crete, 181 – 187.
- Palmia, F.; Pecoraro, M.; Ferri, S. (1993). Essiccazione di prodotti carnei: calcolo del coefficiente di diffusione effettivo ( $D_e$ ) dell'acqua in fette di lombo suino. *Industria Conserve*, 68, 238 – 242.
- Palumbo, S. A.; Komanowsky, M.; Metzger, V.; Smith, J. L. (1977). Kinetics of pepperoni drying. *Journal of Food Science*, 42(4), 1029 – 1033.
- Paniagua, R.; Nistal, M.; Sesma, P.; Álvarez-Uría, M.; Fraile, B.; Anadón, R.; Sáez, F. J.; de Miguel, M. P. (1998). *Citología e histología vegetal y animal*, McGraw-Hill Interamericana, Madrid, España.
- Park, K. J. (1998). Diffusional model with and without shrinkage during salted fish muscle drying. *Drying Technology*, 16(3-5), 889 – 905.
- Park, K. J.; Vohnikova, Z.; Reis-Brod, F. P. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). *Journal of Food Engineering*, 51(3), 193 – 199.
- Parolari, G.; Virgili, R.; Schizappa, C. (1994). Relationship between cathepsin B activity and compositional parameters in dry-cured hams of normal and defective texture. *Meat Science*, 38(1), 1 – 6.
- Payne, S. R.; Wilson, P. W. (1994). Comparison of the freeze/thaw characteristics of Antarctic cod (*Dissostichus mawsoni*) and black cod (*Paranotothenia augustata*). Possible effects of antifreeze glycoproteins. *Journal of Muscle Foods*, 5(3), 233 – 244.
- Pearson, A. M.; Young, R. B. (1989). *Muscle and meat biochemistry*. Food Science and Technology: A series of monographs, Academic Press, Inc., London, United Kingdom.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Peleg, M. (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216 – 1219.
- Peleg, M. (1993). Assessment of a semiempirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *Journal of Food Process Engineering*, 16(1), 21 – 37.
- Perry, R. H.; Green, D. W.; Maloney, J. O. (1992). Perry. Manual del Ingeniero Químico. Sexta Edición, McGraw Hill, Naucalpan de Juárez, México.
- Queiroz, M. R.; Nebra, S. A. (2001). Theoretical and experimental analysis of the drying kinetics of bananas. *Journal of Food Engineering*, 47(2), 127 – 132.
- Radford, R. D. (1975). Water transport in meat. *Bulletin de l'institut internationale du froid*, 1, 315 – 321.
- Rahman, M. S.; Potluri, P. L. (1990). Shrinkage and density of squid flesh during air drying. *Journal of Food Engineering*, 12(2), 133 – 143.
- Rahman, S. (1995). Water activity and sorption properties of foods. In: *Food Properties Handbook*, CRC Press Inc., Florida, United States of America.
- Rahman, M. S.; Perera, C. O.; Chen, X. D.; Driscoll, R. H.; Potluri, P. L. (1996). Density, shrinkage and porosity of calamari mantle meat during air drying in a cabinet dryer as a function of water content. *Journal of Food Engineering*, 30(1-2), 135 – 145.
- Rahman, M. S.; Sablani, S. S.; Al-Ruzeiqi, M. H.; Guisan, N. (2002). Water adsorption isotherms of freeze-dried tuna meat. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 45(3), 767 – 772.
- Rahman, M. S.; Kasapis, S.; Guizani, N.; Al-Amri, O. S. (2003). State diagram of tuna meat: freezing curve and glass transition. *Journal of Food Engineering*, 57(4), 321 – 326.
- Ratti, C. (1994). Shrinkage during drying of foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 23(1), 91 – 105.
- Ratti, C.; Mujumdar A. S. (1995). Simulation of packed bed drying of foodstuffs with airflow reversal. *Journal of Food Engineering*, 26(3), 259 – 271.
- Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 311 – 319.
- Reddy, J. N. (1993). An introduction to the finite element method, 2<sup>nd</sup> edition. McGraw Hill, Inc., United States of America.

- Renou, J. P.; Foucat, L.; Bonny, J. M. (2003). Magnetic resonance imaging studies of water interactions in meat. *Food Chemistry*, 82(1), 35 – 39.
- Reyes, A.; Álvarez, P. I.; Marquardt, F. H. (2002). Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modelling. *Drying Technology*, 20(7), 1463 – 1483.
- Rinaman, W. C.; Heil, C.; Strauss, M.; Mascagni, M.; Sousa, M. (1996). Probability and statistics. In: *Standard Mathematical Tables and Formulae*, 30<sup>th</sup> edition, CRC Press, Inc., Florida, United States of America, 569 – 668.
- Roshenow, W. M.; Choi, H. (1961). *Heat, mass and momentum transfer*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, United States of America.
- Rosselló, C.; Cañellas, J.; Simal, S.; Berna, A. (1992). A simple mathematical model to predict the drying kinetics of potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40(12), 2374 – 2378.
- Rosselló, C.; Simal, S.; Sanjuán, N.; Mulet, A. (1997). Nonisotropic mass transfer model for green bean drying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(2), 337 – 342.
- Ruiz-Cabrera, M. A.; Gou, P.; Foucat, L.; Renou, J. P.; Daudin, J. D. (2004). Water transfer analysis in pork meat supported by NMR imaging. *Meat Science*, 67(1), 169 – 178.
- Rutledge, D. N.; René, F.; Hills, B. P.; Foucat, L. (1994). Magnetic resonance imaging studies of the freeze-drying kinetics of potato. *Journal of Food Process Engineering*, 17(3), 325 – 352.
- Saad, Y. (1995). *Iterative methods for sparse linear systems*. Pws Publishing Company, Boston, United States of America.
- Sánchez, E. 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(1), 57 – 63.
- Sanjuán, N.; Bermejo, M. V.; Vivanco, D.; Cañellas, J.; Mulet, A. (1996). Drying kinetics of moscatel cultivar grapes. In: *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS '96)*, Vol. B, Krakow, Poland, 1069 – 1076.
- Saravacos, G. D.; Stinchfield, R. M. (1965). Effect of temperature and pressure on the sorption of water vapour by freeze-dried food materials. *Journal of Food Science*, 30, 779 – 786.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Saravacos, G. D. (1995). Mass transfer properties of foods. In: *Engineering Properties of Foods*. Second Edition, Marcel Dekker, New York, United States of America, 169 – 221.
- Saravacos, G. D. (1997). Moisture transport properties of foods. In: *Advances in Food Engineering*. Edited by G. NarNarsimham; M. R. Okos; S. Lombardo, Purdue University, West Lafayette, United States of America, 53 – 57.
- Saravacos, G. D.; Maroulis, Z. B. (2001). *Transport properties of foods*, Marcel and Dekker Inc., New York, United States of America.
- Sayas, M. E. (1997). Contribuciones al proceso tecnológico de elaboración del jamón curado: aspectos físicos, fisico-químicos y ultraestructurales en los procesos de curado tradicional y rápido. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Sherwood, T. K. (1929). The drying of solids. *Industrial and Engineering Chemistry* 21(1), 12 – 16.
- Shishido, I.; Suzuki, M.; Ohtani, S. (1986). On the drying mechanism of shrinkage materials. In: *Proceedings of the World Congress III of Chemical Engineering*, Tokyo, Japan.
- Simal, S.; Rosselló, C.; Berna, A.; Mulet, A. (1994). Heat and mass transfer model for potato drying. *Chemical Engineering Science*, 49(22), 3739 – 3744.
- Simal, S.; Rosselló, C.; Mulet, A. (1998a). Modelling of air drying in regular shaped bodies. *Trends in Chemical Engineering*, 4, 171 – 180.
- Simal, S.; Rosselló, C.; Berna, A.; Mulet, A. (1998b). Drying of shrinking cylinder-shaped bodies. *Journal of Food Engineering*, 37(4), 423 – 435.
- Simal, S.; Femenía, A.; Llull, P.; Rosselló, C. (2000). Dehydration of aloe vera: simulation of drying curves and evaluation of functional properties. *Journal of Food Engineering*, 43(2), 109 – 114.
- Song, H.; Litchfield, J. B. (1990). Nondestructive measurement of transient moisture profiles in ear corn during drying using NMR imaging. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33(4), 1286 – 1290.
- Sopade, P. A.; Ajisegiri, E. S.; Abass, A. B. (1995). Moisture sorption isotherms of kilishi, a traditional Nigerian meat product. *Association of Southeast Asian Nations Food Journal*, 10(1), 30 – 38.
- Steele, R. J. (1987). Use of polyols to measure equilibrium relative humidity. *International Journal of Food Science and Technology*, 22(4), 377 – 384.

- Sucec, J. (1975). Heat transfer, Simon and Schuster Inc., New York, United States of America, 460 – 508.
- Swatland, H. J. (1994). Structure and development of meat animals and poultry, Technomic Pub Co., Switzerland.
- Teixeira, M. B. F.; Tobinaga, S. (1998). A diffusion model for describing water transport in round squid mantle during drying with a moisture-dependent effective diffusivity. *Journal of Food Engineering*, 36(2), 169 – 181.
- Telis, V. R. N.; Murari, R. C. B. D. L.; Yamashita, F. (2004). Diffusion coefficients during osmotic dehydration of tomatoes in ternary solutions. *Journal of Food Engineering*, 61(2), 253 – 259.
- Timmermann, E. O.; Chirife, J.; Iglesias, H. A. (2001). Water sorption isotherms of food and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal of Food Engineering*, 48(1), 19 – 31.
- Tiwari, G. N.; Kumar, S.; Rakash, O. (2004). Evaluation of convective mass transfer coefficient during drying of jaggery. *Journal of Food Engineering*, 63(2), 219 – 227.
- Towner, G. D. (1987). The tensile stress generated in clay through drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 37(4), 279 – 289.
- Treybal, R. E. (1968). Mass transfer operations, Second Edition, McGraw Hill, United States of America
- Trujillo, F. J.; Yeow, P. Ch.; Pham, Q. T. (2003). Moisture sorption isotherm of fresh lean beef and external beef fat. *Journal of Food Engineering*, 60(4), 357 – 366.
- Tsami, E.; Maroulis, Z. B.; Marinos-Kouris, D.; Saravacos, G. D. (1990). Heat of sorption of water in dried fruits. *International Journal of Food Science and Technology*, 25(3), 350 – 363.
- Tsami, E.; Katsioti, M. (2000). Drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and colour during dehydration. *Drying Technology*, 18(7), 1559 – 1581.
- Verstreken, E.; Van Hecke, P.; Scheerlinck, N.; De Baerdemaeker, J.; Nicolai, B. (1998). Parameter estimation for moisture transport in apples with the aid of NMR imaging. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 36, 196 – 204.
- Viollaz, P. E.; Rovedo, C. O. (2002). A drying model for three dimensional shrinking bodies. *Journal of Food Engineering*, 52(2), 149 – 153.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Virgili, R.; Parolari, G.; Schivazappa, C.; Bordini, S. C.; Borri, M. (1995). Sensory and texture quality of dry cured ham as affected by endogeneous cathepsin B activity and muscle composition. *Journal of Food Science*, 60(6), 1183 – 1186.
- Virgili, R.; Porta, C.; Schivazappa, C. (1998). Effect of raw material on the end-product characteristics. En: *El jamón curado. Tecnología y análisis de consumo. Simposio especial 44<sup>th</sup> ICoMST*, Barcelona, España, 26 – 38.
- Waananen, K. M.; Okos, M. R. (1996). Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta. *Journal of Food Engineering*, 28(2), 121 – 137.
- Wang, N.; Brennan, J. G. (1991). Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. *Journal of Food Engineering*, 14(4), 269 – 287.
- Wang, N.; Brennan, J. G. (1995). Changes in structure of potato during drying. *Journal of Food Engineering*, 24(1), 61 – 76.
- Wang, L.; Sun, D. W. (2002). Modelling three-dimensional transient heat transfer of roasted meat during air blast cooling by the finite element method. *Journal of Food Engineering*, 51(4), 319 – 328.
- Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer in porous media: a theory of drying. In: *Advances in Heat Transfer*, Vol 13, Academic Press, New York, United States of America, 119 – 203.
- Willis, B.; Okos, M.; Campanella, O. (1999). Effects of glass transition on stress development during drying of a shrinking food system. In: *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Conference of Food Engineering (CoFE'99)*, Dallas, United States of America, 446 – 451.
- Wolf, M.; Walker, J. E.; Kapsalis, J. G. (1972). Water vapour sorption hysteresis in dehydrated food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 20(5), 1073 – 1077.
- Yamamoto, S. (2001). A short-cut method for determining concentration dependent diffusivity in liquid foods and polymer solutions from regular regime drying curves. *Drying Technology*, 19(7), 1479 – 1490.
- Yang, H.; Sakai, N.; Watanabe, M. (2001). Drying model with non-isotropic shrinkage deformation undergoing simultaneous heat and mass transfer. *Drying Technology*, 19(7), 1441 – 1460.

## **10. ANEJOS**



### 10.1. Correspondencia entre módulos adimensionales

En la Tabla 10.1.1. se muestran las analogías entre los módulos adimensionales utilizados en transferencia de calor y en transferencia de materia.

**Tabla 10.1.1.** Correspondencia entre los módulos adimensionales para transferencia de calor y de materia (Treybal, 1968).

TRANSFERENCIA DE MATERIA	TRANSFERENCIA DE CALOR
$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e}$	$\frac{T - T_e}{T_0 - T_e}$
Módulo de Reynolds $Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$	Módulo de Reynolds $Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$
Módulo de Schmidt $Sc = \frac{\mu}{\rho * D_{AB}}$	Módulo de Prandtl $Pr = \frac{C_p * \mu}{k'}$
Módulo de Sherwood $Sh = \frac{k * D}{D_{AB}}$	Módulo de Nusselt $Nu = \frac{h * D}{k'}$
Módulo de Grashof $Gr = \frac{D^3 * \rho * g * \Delta\rho_A}{\mu^2}$	Módulo de Grashof $Gr = \frac{D^3 * \rho^2 * g * \beta * \Delta T}{\mu^2}$
Módulo de Péclet $Pe = Re * Sc$	Módulo de Péclet $Pe = Re * Pr$
Módulo de Stanton $St = \frac{Sh}{Re * Sc}$	Módulo de Stanton $St = \frac{Nu}{Re * Pr}$
$j_D = St * Sc^{2/3}$	$j_H = St * Pr^{2/3}$

## 10.2. Determinación de la difusividad de sal

La resolución de los modelos, admitiendo las hipótesis enumeradas, puede llevarse a cabo analíticamente mediante el método de separación de variables (Crack, 1975), para lo cual, los contenidos en sal se deben expresar de forma adimensional (Ecuación 10.2.1.).

$$\Psi_s = \frac{C_s - C_{se}}{C_0 - C_{se}} \quad \text{Ec. 10.2.1.}$$

Mediante la resolución de la ecuación de gobierno (Ecuación 4.4.4.) y considerando las condiciones iniciales y de contorno correspondientes, es posible calcular el gradiente de concentración en el interior de la muestra. Integrando la expresión resultante para todo el volumen, se obtiene una relación entre el contenido en sal medio y el tiempo de salado.

Por lo tanto, la expresión que permite calcular la concentración media de un cilindro finito, suponiendo que la resistencia interna a la transferencia de sal es mucho mayor que la resistencia externa, viene dada por la Ecuación 4.4.9.

$$\Psi_s = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-D_s \lambda_n^2 t}}{(\lambda_n L)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_s \beta_n^2 t}}{(\beta_n R)^2} \quad \text{Ec. 4.4.9.}$$

Para el cálculo de los valores característicos  $\lambda_n$  y  $\beta_n$ , se tendrán en cuenta las expresiones definidas por las Ecuaciones 10.2.2. y 10.2.3.

$$\lambda_n L = (2n + 1) \frac{\pi}{2} \quad \text{Ec. 10.2.2.}$$

$n = 0, 1, 2, \dots$

$$\beta_n / J_0(\beta_n R) = 0 \quad \text{Ec. 10.2.3.}$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

siendo  $J_0$  la función de Bessel de primera especie de orden 0.

## ANEJOS

---

El valor de la concentración de sal en el equilibrio,  $C_e$ , puede estimarse utilizando el modelo empírico de Peleg (Peleg, 1988), que se describe en la Ecuación 10.2.4., a partir de los datos experimentales tiempo de salado ( $t$ ) y concentración de sal alcanzada a un determinado tiempo de salado ( $C(t)$ ).

$$C_s(t) = \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad \text{Ec. 10.2.4.}$$

Por consiguiente, la concentración de sal en el equilibrio se calculó con la expresión:  $C_e = 1/k_2$ .

### **10.3. Método de Separación de Variables. Aplicación a la ecuación de secado**

Un método standard para obtener la solución de una ecuación diferencial en derivadas parciales es asumir que la solución se puede obtener como producto de dos funciones de una sola variable. Esto se puede realizar cuando la ecuación diferencial es homogénea y las condiciones de contorno e iniciales son todas homogéneas o como máximo una es no homogénea. En algunos casos es necesario un cambio de variable para obtener dichas condiciones (Crack, 1975).

Tomando como ejemplo la ecuación para la difusión en una sola dimensión (Ecuación 10.4.1.), al separar las variables la ecuación se podría escribir tal y como muestra la Ecuación 10.4.2.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec. 10.4.1.}$$

$$C = X(x)T(t) \quad \text{Ec. 10.4.2.}$$

donde X y T son funciones de x y t respectivamente.

Dada esta formulación del problema, la solución sería:

$$C = (A \sin(\lambda x) + B \cos(\lambda x)) \exp(-\lambda^2 Dt) \quad \text{Ec. 10.4.3.}$$

que se cumple para infinitos valores determinados de  $\lambda$ . Dada la linealidad del problema resuelto, la solución general se obtiene como combinación lineal de soluciones del tipo de la Ecuación 10.4.3.

Por lo tanto:

$$C = \sum_{m=1}^{\infty} (A_m \sin(\lambda_m x) + B_m \cos(\lambda_m x)) \exp(-\lambda_m^2 Dt) \quad \text{Ec. 10.4.4.}$$

## ANEJOS

---

donde  $A_m$ ,  $B_m$  y  $\lambda_m$  vienen determinadas por las condiciones iniciales y de contorno para un problema determinado.

En el caso de la ecuación difusional de secado para un geometría de lámina infinita de espesor  $2L$ , considerando que la resistencia interna a la transferencia de materia es mucho mayor que la externa, la solución vendría descrita por la Ecuación 10.4.5. Para un cilindro de geometría infinita de radio  $R$  y considerando la misma relación entre las resistencias a la transferencia de materia, la Ecuación 10.4.6. describiría la solución.

$$W(x,t) = (W_0 - W_e) 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\lambda_n L} e^{-D_e \lambda_n^2 t} \cos(\lambda_n x) + W_e$$

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

Ec. 10.4.5.

$$W(r,t) = (W_0 - W_e) 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_e \beta_n^2 t}}{\beta_n R J_1(\beta_n R)} J_0(\beta_n r) + W_e$$

$$\beta_n / J_0(\beta_n R) = 0, n = 1, 2, \dots$$

Ec. 10.4.6.

$J_v(x)$ : Función de Bessel de primera especie de orden  $v$ .

Mediante las Ecuaciones 10.4.5. y 10.4.6. se calculó la humedad puntual. La humedad media fue calculada integrando estas ecuaciones para todo el volumen considerado (Ecuación 10.4.7. (lámina infinita) y Ecuación 10.4.8. (cilindro infinito)).

$$W = (W_0 - W_e) 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_n L)^2} e^{-D_e \lambda_n^2 t} + W_e$$

Ec. 10.4.7.

$$W = (W_0 - W_e) 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_e \beta_n^2 t}}{(\beta_n R)^2} + W_e$$

Ec. 10.4.8.

La ecuación 10.4.8. representa la solución del modelo 1 (apartado 4.5.1.). El cálculo se realizó tomando cincuenta términos de la serie.

Puede demostrarse matemáticamente que la solución para un cilindro finito se obtiene multiplicando la solución obtenida para una lámina infinita por la obtenida para un cilindro infinito (Ecuación 10.4.9.).

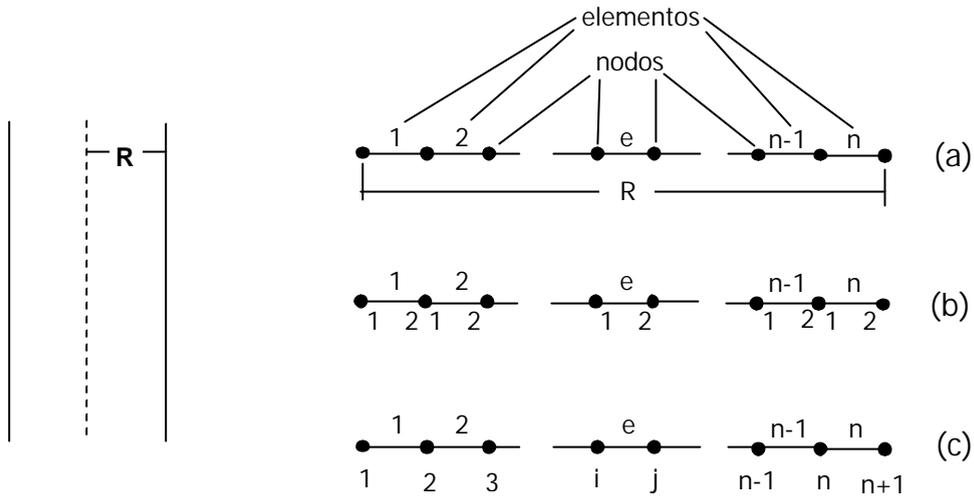
$$\Psi = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-D_e \lambda_n^2 t}}{(\lambda_n L)^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-D_e \beta_n^2 t}}{(\beta_n R)^2} \quad \text{Ec. 10.4.9.}$$

El cálculo de la Ecuación 10.4.9., solución del modelo 4 (apartado 4.5.2.) se realizó tomando 50 términos de la serie.

#### **10.4. Método de los Elementos Finitos. Aplicación al secado de carne**

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales o en derivadas parciales con unas determinadas condiciones de contorno. Dado el dominio de la función, éste se subdivide en una serie de subdominios llamados elementos finitos. La solución aproximada del problema se desarrolla en cada uno de los elementos. La subdivisión del dominio en partes tiene dos ventajas. En primer lugar, permite representar de manera más precisa geometrías complejas e incluir distintos materiales. Además, como se produce una representación más aproximada de la solución en cada elemento, se ponen de manifiesto efectos locales, por ejemplo, gradientes elevados de la solución. Existe abundante bibliografía sobre cómo aplicar el MEF para la resolución de ecuaciones diferenciales (Reddy, 1993; Comini et al., 1994). A continuación se expondrá de forma breve como ha sido aplicado dicho método a la resolución del problema planteado para geometría cilíndrica infinita (modelos 1, 2 y 3; apartado 4.5.1.).

El sistema estudiado fue un sistema unidimensional. Dado el dominio de la función, en este caso el radio del cilindro ( $R$ ), éste se subdividió en una serie de subdominios (elementos). Cada uno de los elementos, estaba formado por dos nodos o puntos extremos. La solución aproximada del problema fue desarrollada en cada uno de los elementos. Estos conceptos se ilustran en la Figura 10.4.1.



**Figura 10.4.1.** (a) División del dominio en elementos y nodos. Numeración de nodos: local (b) y global (c).

El Método de los Elementos Finitos requiere una función aproximación a la función buscada en el dominio de la solución. En el problema planteado sería la descrita por la Ecuación 10.4.1.:

$$W(r,t) \cong \hat{W}(r,t) \tag{Ec. 10.4.1.}$$

Siendo:

$W(r,t)$ : función buscada

$\hat{W}(r,t)$ : función aproximación

En cada elemento (e), la aproximación local es definida como una combinación lineal de las funciones de forma,  $N_i^e$ , y de los valores nodales,  $W_i$ . Estos valores representan la aproximación en los nodos. Una vez ensambladas las aproximaciones se obtiene la aproximación global en las que las funciones de

forma de los elementos,  $N_i^e$ , se convierten en las funciones de forma globales  $N_i$ . En estado no estacionario, las funciones de forma en cada elemento dependen de la dimensión espacial, mientras que los valores nodales dependen de la dimensión temporal. En el problema en cuestión, el dominio se divide en  $n$  elementos, lo que supone  $n+1$  nodos:

$$W(r, t) \cong \hat{W}(r, t) = \sum_{i=1}^n N_i(r) W_i(t) \quad \text{Ec. 10.4.2.}$$

Tras la aproximación (Ecuación 10.4.2.) y la aplicación del Método de Galerkin (de aproximación de la función buscada) y del Teorema de Green (para la resolución de integrales) a la ecuación de gobierno, así como del uso de las condiciones de contorno, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones,

$$[K] \vec{W} + [H] \vec{W}' = -\vec{r}_A \quad \text{Ec. 10.4.3.}$$

Siendo  $[K]$  y  $[H]$  dos matrices cuadradas de  $n+1$  filas y  $n+1$  columnas, cuyos coeficientes se calculan mediante las Ecuaciones 10.4.4. y 10.4.5., siendo  $i$  y  $j$  la fila y la columna del coeficiente de la matriz.

$$K_{ij} = \int_0^R \frac{dN_i}{dr} \left[ D_e r \frac{dN_j}{dr} \right] dr = \sum_{e=1}^n \int_{r_1^e}^{r_2^e} \left( \frac{dN_i^e}{dr} D_e r \frac{dN_j^e}{dr} \right) dr \quad \text{Ec. 10.4.4.}$$

$$H_{ij} = \int_0^R N_i r N_j dr = \sum_{e=1}^n \int_{r_1^e}^{r_2^e} N_i^e r N_j^e dr \quad \text{Ec. 10.4.5.}$$

Las herramientas informáticas utilizadas para la resolución de problemas mediante el método de los elementos finitos, llevan incorporado el cálculo de los

## ANEJOS

---

coeficientes de las matrices a partir del número de elementos en que se desea dividir el dominio.

Los vectores  $\vec{W}$  y  $\vec{W}'$  son los vectores de los valores nodales de las temperaturas y de sus derivadas respectivamente, tal y como se muestra en las Ecuaciones 10.4.6. y 10.4.7.

$$\vec{W}^t = [W_1, W_2, \dots, W_n, W_{n+1}] \quad \text{Ec. 10.4.6.}$$

$$\vec{W}'^t = \left[ \frac{\partial W_1}{\partial t}, \frac{\partial W_2}{\partial t}, \dots, \frac{\partial W_n}{\partial t}, \frac{\partial W_{n+1}}{\partial t} \right] \quad \text{Ec. 10.4.7.}$$

Dado que los valores nodales, varían con el tiempo, el sistema de ecuaciones deberá resolverse para cada intervalo de tiempo, a partir de los valores obtenidos para el intervalo anterior. Como para tiempo inicial se conoce el valor de la humedad media ( $W(r,0)=0$ ), a partir de él se aproximarán los valores de temperatura y de sus derivadas para cada tiempo y en cada nodo de la forma:

$$W_i = \frac{W_{i(t+\Delta t)} + W_{i(t)}}{2} \quad \text{Ec. 10.4.8.}$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \frac{W_{i(t+\Delta t)} - W_{i(t)}}{\Delta t} \quad \text{Ec. 10.4.9.}$$

En las Ecuaciones 10.4.8. y 10.4.9. el subíndice  $i$  representa un nodo determinado. En la Ecuación 10.4.8. se ha aproximado el valor de la humedad en un nodo para un tiempo determinado como la media entre la humedad para ese tiempo y el siguiente, lo que quiere decir que se ha elegido un factor de ponderación  $\alpha = 0.5$ .

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno del problema, los componentes del vector  $\vec{r}_A$  son todos cero, excepto el coeficiente de la fila  $n+1$ .

Este coeficiente viene definido por la Ecuación 10.4.10 (modelos 1 y 2, apartado 4.5.1.) y por la Ecuación 10.4.11. (modelo 3, apartado 4.5.1.).

$$r_{An+1} = 4D_e W_e \quad \text{Ec. 10.4.10.}$$

$$r_{An+1} = \frac{kR}{\rho_{ss}} (C_a - C_\infty) \quad \text{Ec. 10.4.11.}$$

Para la resolución del sistema de ecuaciones planteado se utilizó una herramienta realizada en EXCEL™ con macros desarrolladas en VISUAL BASIC™ para EXCEL. En la Figura 10.4.2. se muestra el aspecto de dicha herramienta.

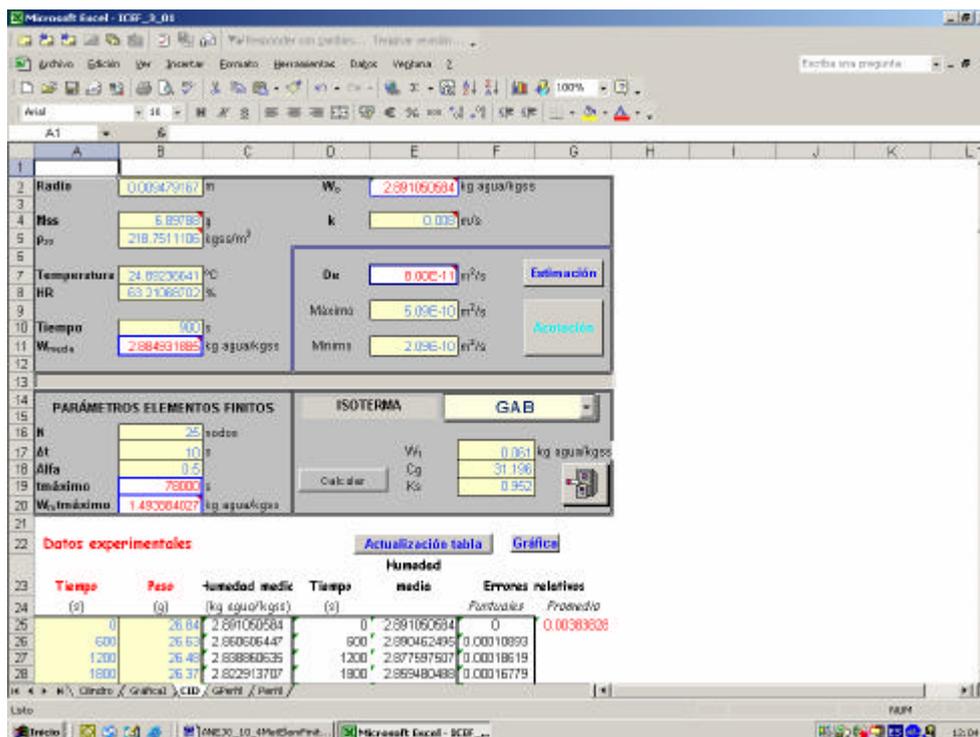


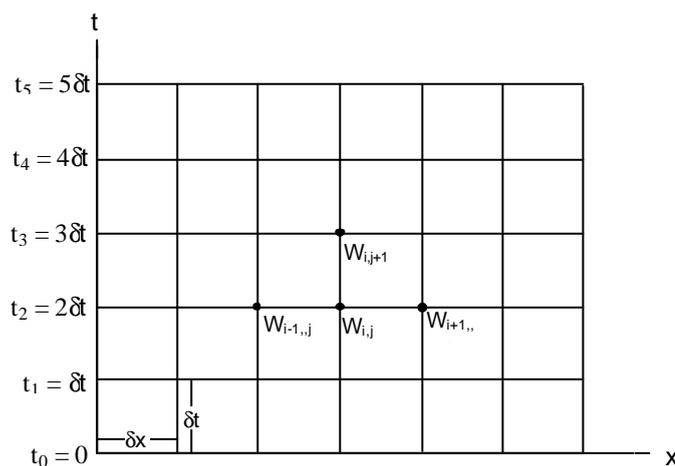
Figura 10.4.2. Herramienta de cálculo utilizada para resolver los modelos correspondientes a geometría cilíndrica infinita mediante el MEF.

### **10.5. Método de las Diferencias Finitas. Aplicación al secado de carne**

El Método de las Diferencias Finitas (Saad, 1995) se basa en aproximaciones locales de las derivadas parciales en una ecuación diferencial parcial, que se deriva mediante series de Taylor de orden inferior. Este método es bastante simple y fácil de aplicar. Además, es un método muy adecuado para regiones de forma regular y también cuando se utilizan mallas uniformes. Las matrices que se obtienen al aplicar el método suelen ser diagonales, lo que facilita la resolución del problema. Por ejemplo, dada la ecuación de gobierno utilizada en la modelización del secado de músculos enteros (Ecuación 4.5.19.),

$$D_e \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial W}{\partial t} \quad \text{Ec. 4.5.19.}$$

se divide la región en  $x$  en intervalos iguales  $\delta x$  y el tiempo en intervalos  $\delta t$ . Por lo tanto, la región  $x - t$  se divide en una malla de rectángulos de lado  $\delta x$  y  $\delta t$ , tal y como se muestra en la Figura 10.5.1.



**Figura 10.5.1.** Subdivisión del dominio en el Método de las Diferencias Finitas.

## ANEJOS

---

Las coordenadas de un punto de la malla serían  $(i\delta x, j\delta t)$ , siendo  $i$  y  $j$  números enteros. Se denominará  $W_{i,j}$  al valor de la función  $W$  en el punto  $(i\delta x, j\delta t)$ . Los valores de la función  $W$  en los puntos próximos se muestran en la Figura 10.5.1.

Aplicando un desarrollo en serie de Taylor en la estimación de las derivadas en la dirección  $t$  y en la dirección  $x$ , reagrupando y despreciando los términos de error, se obtiene:

$$W_{i,j} - W_{i,j-1} = D_e r (W_{i-1,j} - 2W_{i,j} + W_{i+1,j}) \quad \text{Ec. 10.5.1.}$$

donde  $r = \delta t / (\delta x)^2$ . La Ecuación 10.5.1. puede ser utilizada con un valor dado de  $r$  para calcular los valores de  $W$  para cada fila de  $t$ , teniendo en cuenta la condición inicial y la condición de contorno (apartado 4.5.3.).

La Ecuación 10.5.1., en la cual varios valores desconocidos se expresan en función de un valor conocido se denomina fórmula implícita de diferencias finitas.

Aplicando la Ecuación 10.5.1. para todos los nodos, se obtiene un conjunto de ecuaciones a resolver, tal y como se muestra en la Ecuación 10.5.2.,

$$\vec{W}_{i,j} = [A]^{-1} (W_{i,j-1} - \vec{B}) \quad \text{Ec. 10.5.2.}$$

donde el vector  $\vec{B}$  viene definido por la condición de contorno en la superficie y la matriz  $[A]$  conlleva los parámetros del conjunto de ecuaciones y sus coeficientes se calculan a partir de  $D_e$ , de  $\delta x$  y de  $\delta t$ .

## 10.6. Cálculo k. Convección forzada

En la Ecuación 10.6.1. se describe una de las analogías que existen entre transferencia de calor y transferencia de materia, que viene dada por el valor del factor  $j_D$ .

$$j_D = St * Sc^{2/3} \quad \text{Ec. 10.6.1.}$$

El cálculo del módulo de Stanton (St) viene definido en la Ecuación 10.6.2.

$$St = \frac{Sh}{Re * Sc} \quad \text{Ec. 10.6.2.}$$

Para el cálculo del módulo de Stanton, previamente debe ser calculado el módulo de Sherwood, Sh (Ecuación 10.6.3.) y el módulo de Reynolds, Re (Ecuación 10.6.5.),

$$Sh = \frac{k * D}{D_{AB}} \quad \text{Ec. 10.6.3.}$$

siendo k el coeficiente de transferencia de materia (m/s), D el diámetro del cilindro (0.02, 0.03 o 0.04 m) y  $D_{AB}$  la difusividad del agua en el aire ( $m^2/s$ ). El valor de la difusividad del agua en el aire depende de la temperatura y puede calcularse tal y como se describe en la Ecuación 10.6.4. (Perry et al., 1992). Para el cálculo de  $D_{AB}$  se consideró una temperatura de 25°C, que fue la utilizada en las experiencias de secado realizadas en el secadero convectivo.

$$D_{AB} = 0.00014738 * e^{\frac{-523.78}{T(^{\circ}C)+273}} \quad \text{Ec. 10.6.4.}$$

## ANEJOS

---

Para el cálculo del módulo de Reynolds es necesario conocer la densidad del aire de secado,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ), su velocidad,  $v$  (0.6, 2 o 2.8 m/s), y su viscosidad,  $\mu$  ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ).

$$\text{Re} = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad \text{Ec. 10.6.5.}$$

Por último, para calcular el valor de  $j_D$  se determina el valor del módulo de Schmidt ( $Sc$ ), tal y como se muestra en la Ecuación 10.6.6.

$$\text{Sc} = \frac{\mu}{\rho * D_{AB}} \quad \text{Ec. 10.6.6.}$$

A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene el coeficiente de transferencia de materia (Ecuación 10.6.7.).

$$k = \frac{j_D * D_{AB} * \text{Re}}{D * \text{Sc}^{-1/3}} \quad \text{Ec. 10.6.7.}$$

El módulo adimensional  $j_D$  se determina a partir del número de Reynolds y de la Figura 10.6.1. (Rohsenow y Choi, 1961).

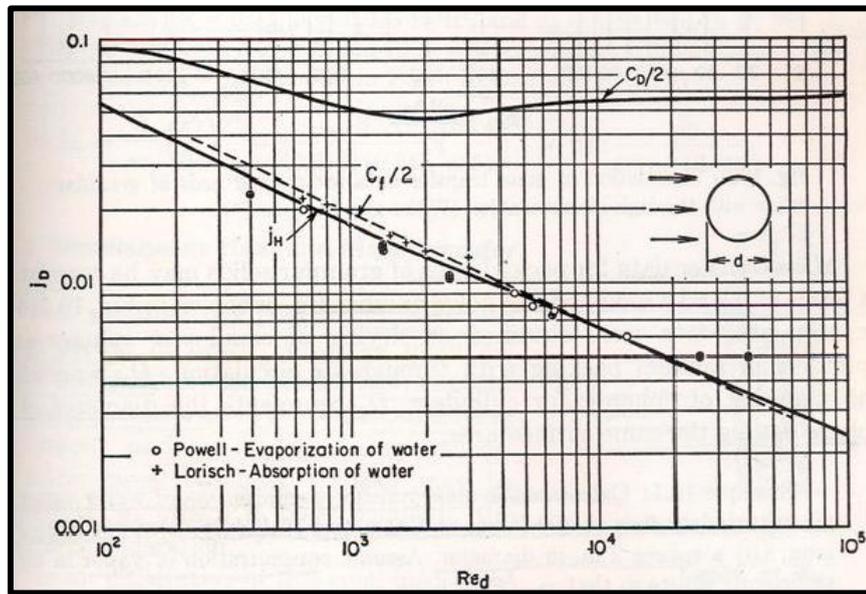


Figura 10.6.1. Correlación utilizada para el cálculo de  $j_D$  (Rohsenow y Choi, 1961).

### 10.7. Cálculo k. Convección natural

Para las cinéticas de deshidratación determinadas en cámara de secado, dado que la velocidad de impulsión del aire fue en todo momento inferior a  $2 \cdot 10^{-3}$  m/s se consideró convección natural. Por lo tanto, la ecuación utilizada para el cálculo del coeficiente de transferencia de materia viene descrita en la Ecuación 10.7.1.

$$Sh = a[Gr * Sc]^n \quad \text{Ec. 10.7.1.}$$

El cálculo de los módulos de Sherwood (Sh), de Grassof (Gr) y de Schmidt (Sc) viene descrito en las Ecuaciones 10.6.3., 10.7.2. y 10.6.6. respectivamente.

$$Gr = \frac{\lambda^3 * \rho * g * \Delta\rho_A}{\mu^2} \quad \text{Ec. 10.7.2.}$$

En la Ecuación 10.7.2.,  $\lambda$  es la dimensión característica (m). Para el secado de cilindros, la dimensión característica es el diámetro. En cambio, en el caso de músculos enteros, en los cuales se consideró una geometría de lámina infinita, como dimensión característica se tomó la dimensión vertical.

Para calcular  $\Delta\rho_A$  se utiliza la Ecuación 10.7.3.

$$\Delta\rho_A = |\rho_{int} - \rho_{\infty}| \quad \text{Ec. 10.7.3.}$$

siendo  $\rho_{int}$  la densidad del aire en la interfase ( $\text{kg/m}^3$ ) y  $\rho_{\infty}$  la densidad del aire de secado ( $\text{kg/m}^3$ ).

A partir de las ecuaciones anteriormente descritas se obtiene el valor de k (Ecuación 10.7.4.), calculándose  $D_{AB}$  mediante la Ecuación 10.6.4.

$$k = a[\text{Gr} * \text{Sc}]^n * \frac{D_{AB}}{D}$$

Ec. 10.7.4.

### 10.8. Isotermas de sorción experimentales

En las Tablas 10.8.1. y 10.8.2. se muestran las isotermas experimentales a diferentes temperaturas de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

**Tabla 10.8.1.** Isotherma experimental del músculo *Bíceps femoris* a distintas temperaturas.

W (kg agua/kg ss)	$a_w$ (25 °C)	$a_w$ (30 °C)	$a_w$ (35 °C)	$a_w$ (40 °C)
0.898 ± 0.016	0.975 ± 0.005	0.978 ± 0.010	0.979 ± 0.018	0.982 ± 0.024
0.868 ± 0.003	0.975 ± 0.006	0.973 ± 0.009	0.976 ± 0.015	0.979 ± 0.021
0.773 ± 0.010	0.973 ± 0.008	0.973 ± 0.011	0.974 ± 0.017	0.977 ± 0.024
0.546 ± 0.003	0.964 ± 0.009	0.969 ± 0.017	0.971 ± 0.021	0.974 ± 0.025
0.637 ± 0.006	0.951 ± 0.006	0.954 ± 0.009	0.956 ± 0.014	0.960 ± 0.021
0.419 ± 0.006	0.912 ± 0.001	0.916 ± 0.008	0.917 ± 0.012	0.917 ± 0.016
0.319 ± 0.022	0.833 ± 0.006	0.846 ± 0.013	0.850 ± 0.015	0.854 ± 0.019
0.178 ± 0.009	0.640 ± 0.009	0.649 ± 0.004	0.658 ± 0.003	0.671 ± 0.002
0.165 ± 0.013	0.662 ± 0.025	0.671 ± 0.018	0.679 ± 0.016	0.689 ± 0.011
0.163 ± 0.013	0.649 ± 0.002	0.660 ± 0.005	0.671 ± 0.006	0.683 ± 0.008
0.149 ± 0.002	0.634 ± 0.006	0.645 ± 0.001	0.655 ± 0.002	0.668 ± 0.002
0.115 ± 0.002	0.515 ± 0.003	0.528 ± 0.004	0.543 ± 0.005	0.551 ± 0.008
0.113 ± 0.002	0.512 ± 0.007	0.521 ± 0.005	0.533 ± 0.009	0.544 ± 0.010
0.071 ± 0.008	0.398 ± 0.019	0.411 ± 0.011	0.426 ± 0.008	0.446 ± 0.006
0.079 ± 0.003	0.289 ± 0.014	0.312 ± 0.013	0.339 ± 0.009	0.364 ± 0.007
0.067 ± 0.006	0.169 ± 0.003	0.185 ± 0.009	0.234 ± 0.015	0.255 ± 0.018
0.066 ± 0.001	0.183 ± 0.013	0.195 ± 0.014	0.209 ± 0.014	0.233 ± 0.014
0.065 ± 0.001	0.162 ± 0.014	0.179 ± 0.012	0.205 ± 0.013	0.244 ± 0.010
0.048 ± 0.004	0.090 ± 0.013	0.095 ± 0.016	0.109 ± 0.019	0.130 ± 0.021

ANEJOS

**Tabla 10.8.2.** Isotherma experimental del músculo *Semimembranosus* a distintas temperaturas.

<b>W (kg agua/kg ss)</b>	<b>a<sub>w</sub> (25 °C)</b>	<b>a<sub>w</sub> (30 °C)</b>	<b>a<sub>w</sub> (35 °C)</b>	<b>a<sub>w</sub> (40 °C)</b>
0.627 ± 0.006	0.957 ± 0.005	0.960 ± 0.011	0.962 ± 0.016	0.962 ± 0.020
0.479 ± 0.027	0.919 ± 0.005	0.925 ± 0.012	0.925 ± 0.016	0.926 ± 0.019
0.374 ± 0.008	0.886 ± 0.003	0.894 ± 0.006	0.896 ± 0.009	0.897 ± 0.013
0.245 ± 0.003	0.799 ± 0.010	0.809 ± 0.015	0.813 ± 0.016	0.818 ± 0.020
0.237 ± 0.004	0.796 ± 0.002	0.806 ± 0.004	0.811 ± 0.007	0.815 ± 0.011
0.230 ± 0.008	0.777 ± 0.012	0.788 ± 0.017	0.794 ± 0.019	0.799 ± 0.022
0.226 ± 0.001	0.778 ± 0.009	0.789 ± 0.014	0.794 ± 0.016	0.800 ± 0.019
0.135 ± 0.002	0.581 ± 0.008	0.596 ± 0.007	0.611 ± 0.007	0.622 ± 0.007
0.122 ± 0.001	0.526 ± 0.006	0.540 ± 0.002	0.557 ± 0.001	0.571 ± 0.002
0.103 ± 0.008	0.506 ± 0.002	0.519 ± 0.002	0.537 ± 0.003	0.552 ± 0.006
0.064 ± 0.002	0.179 ± 0.010	0.198 ± 0.012	0.226 ± 0.012	0.255 ± 0.011
0.061 ± 0.002	0.209 ± 0.010	0.220 ± 0.006	0.238 ± 0.003	0.261 ± 0.001
0.057 ± 0.001	0.335 ± 0.017	0.346 ± 0.009	0.370 ± 0.005	0.391 ± 0.001
0.054 ± 0.005	0.129 ± 0.002	0.137 ± 0.002	0.155 ± 0.003	0.178 ± 0.001

### 10.9. Isotermas experimentales. Intervalos LSD

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de los intervalos LSD. En cada figura se representan las actividades de agua obtenidas a las diferentes temperaturas para un determinado contenido en humedad de la muestra.

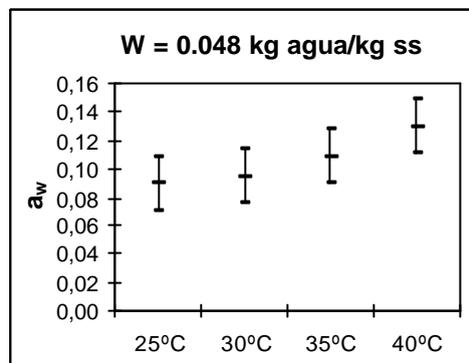


Figura 10.9.1. Intervalos LSD para  $W = 0.048$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

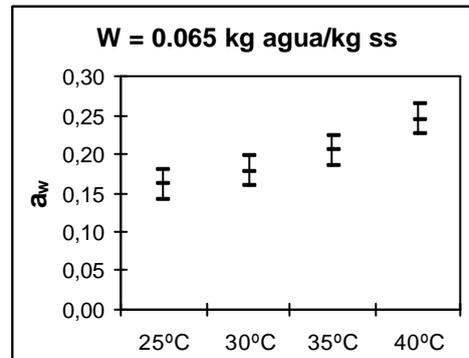


Figura 10.9.2. Intervalos LSD para  $W = 0.065$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

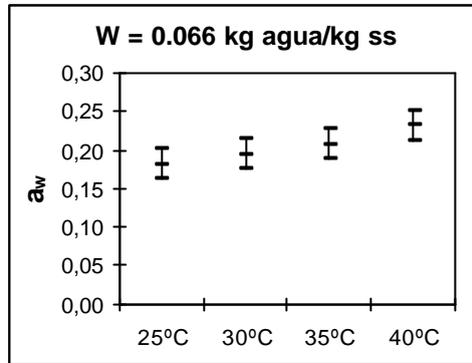


Figura 10.9.3. Intervalos LSD para W = 0.066 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

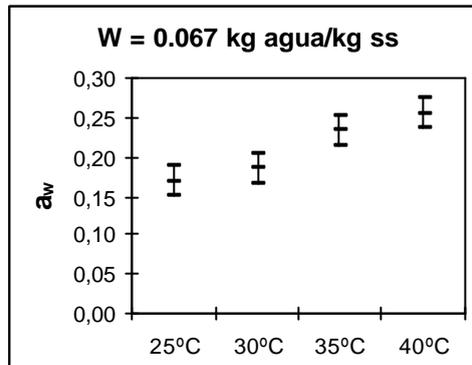


Figura 10.9.4. Intervalos LSD para W = 0.067 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

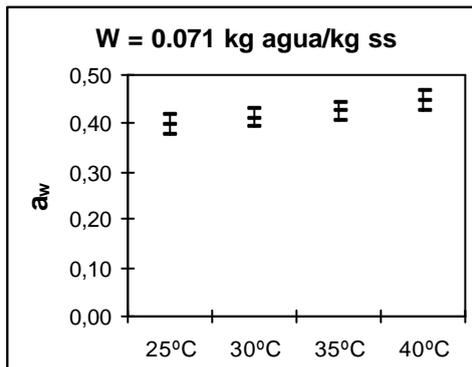


Figura 10.9.5. Intervalos LSD para W = 0.071 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

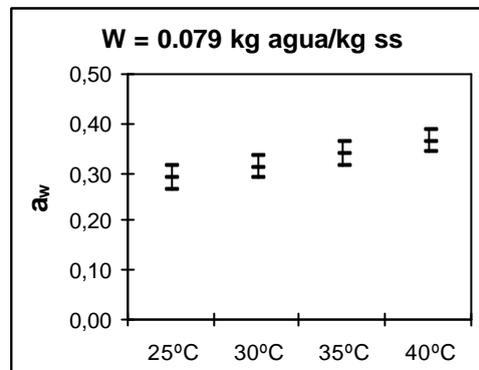


Figura 10.9.6. Intervalos LSD para  $W = 0.079$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

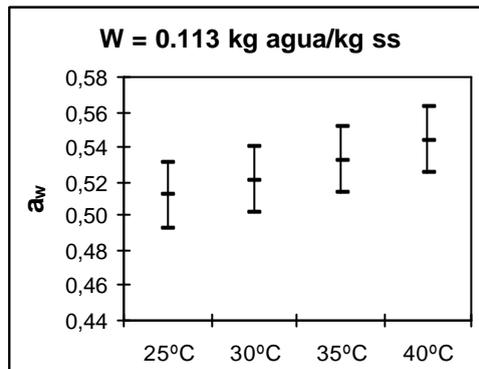


Figura 10.9.7. Intervalos LSD para  $W = 0.113$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

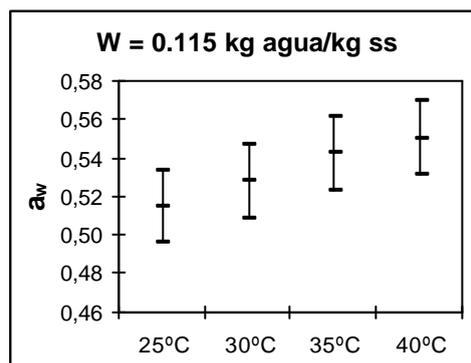


Figura 10.9.8. Intervalos LSD para  $W = 0.115$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

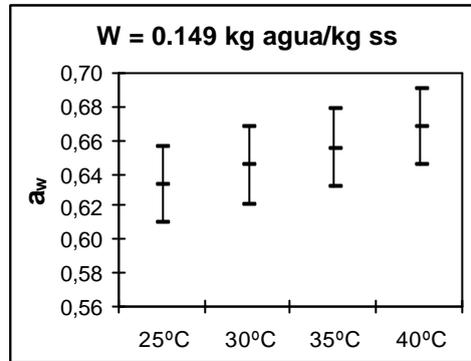


Figura 10.9.9. Intervalos LSD para W = 0.149 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

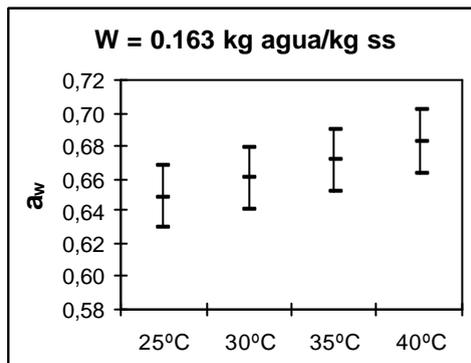


Figura 10.9.10. Intervalos LSD para W = 0.163 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

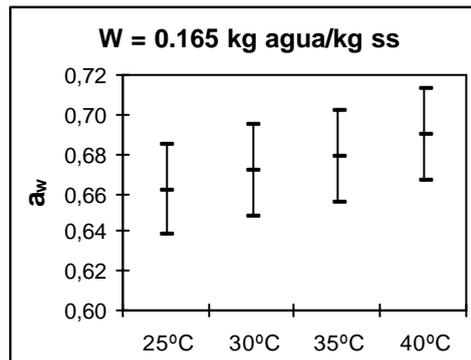


Figura 10.9.11. Intervalos LSD para W = 0.165 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

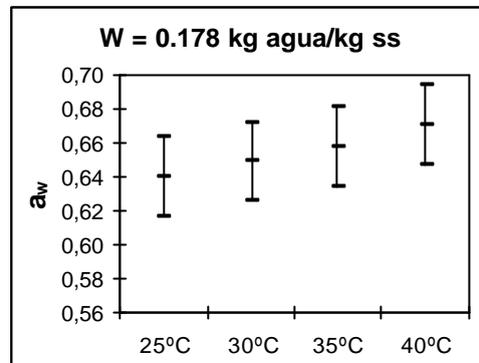


Figura 10.9.12. Intervalos LSD para  $W = 0.178$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

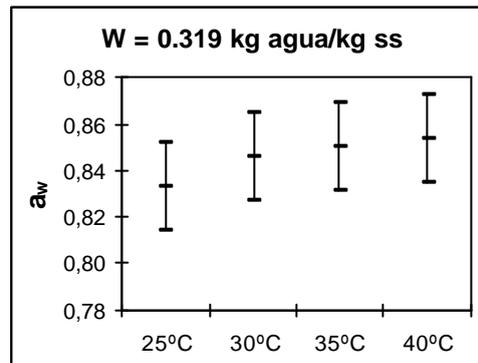


Figura 10.9.13. Intervalos LSD para  $W = 0.319$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

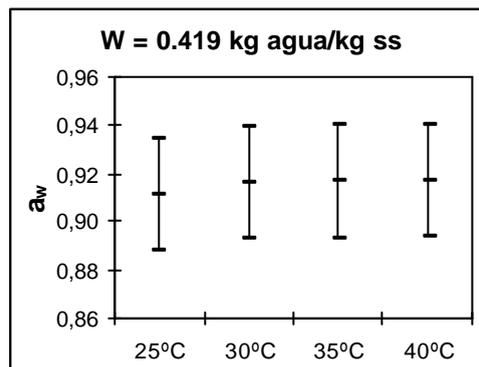


Figura 10.9.14. Intervalos LSD para  $W = 0.419$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

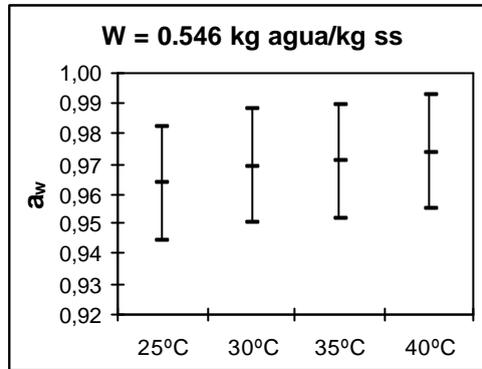


Figura 10.9.15. Intervalos LSD para W = 0.546 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

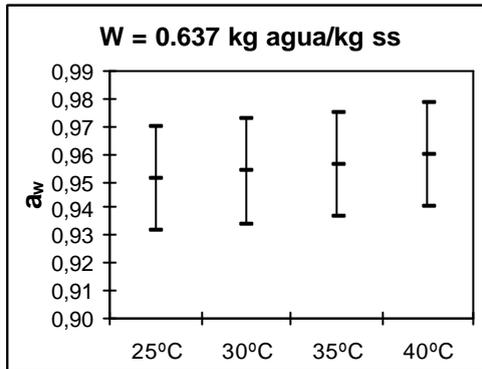


Figura 10.9.16. Intervalos LSD para W = 0.637 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

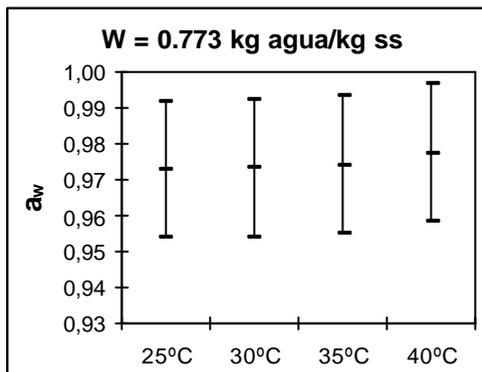


Figura 10.9.17. Intervalos LSD para W = 0.773 kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

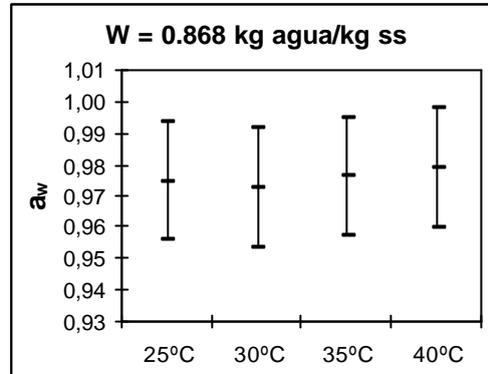


Figura 10.9.18. Intervalos LSD para  $W = 0.868$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

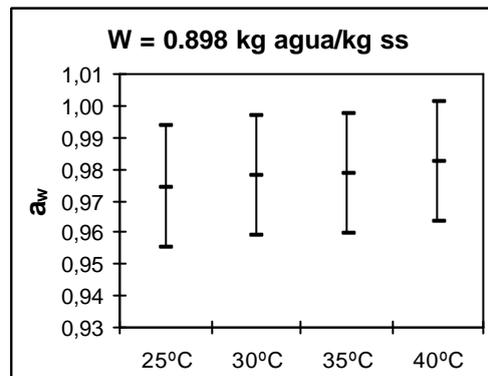


Figura 10.9.19. Intervalos LSD para  $W = 0.898$  kg agua/kg ss. *Biceps femoris*.

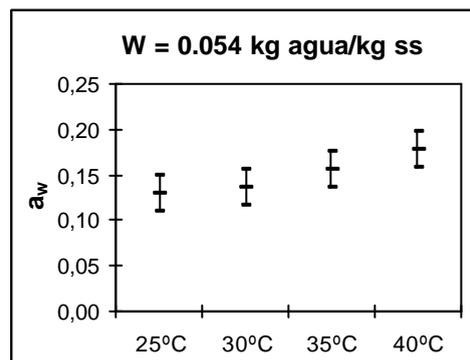


Figura 10.9.20. Intervalos LSD para  $W = 0.054$  kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

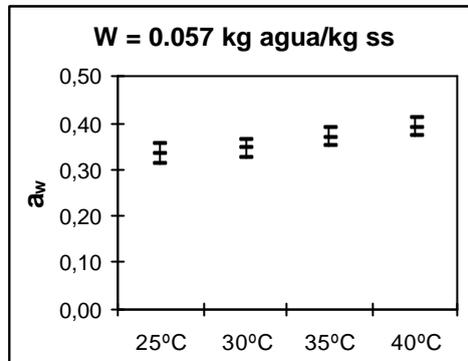


Figura 10.9.21. Intervalos LSD para W = 0.057 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

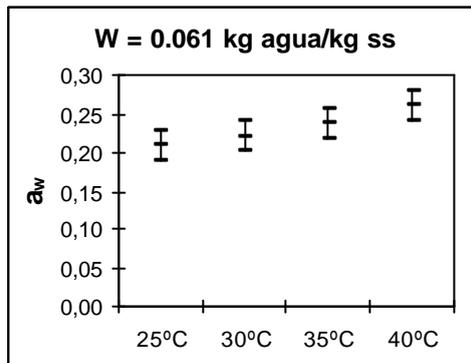


Figura 10.9.22. Intervalos LSD para W = 0.061 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

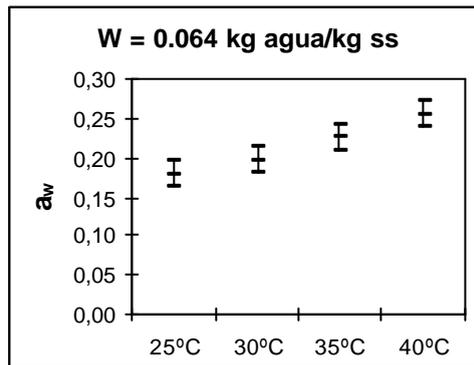


Figura 10.9.23. Intervalos LSD para W = 0.064 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

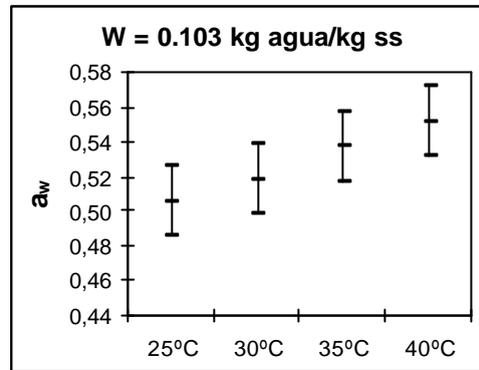


Figura 10.9.24. Intervalos LSD para W = 0.103 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

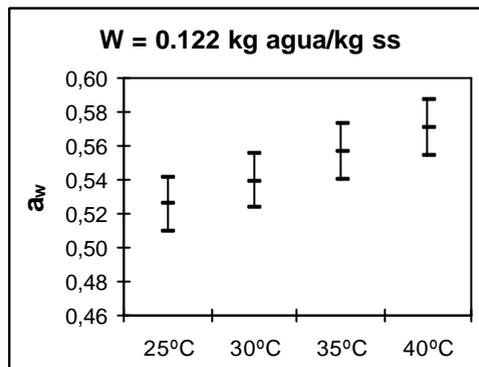


Figura 10.9.25. Intervalos LSD para W = 0.122 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

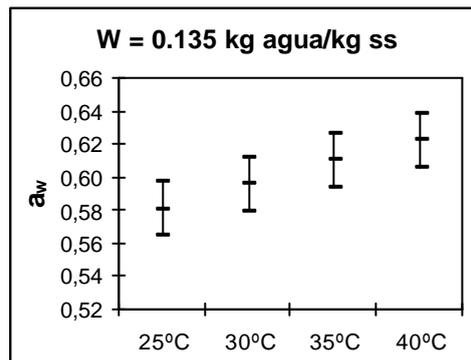


Figura 10.9.26. Intervalos LSD para W = 0.135 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

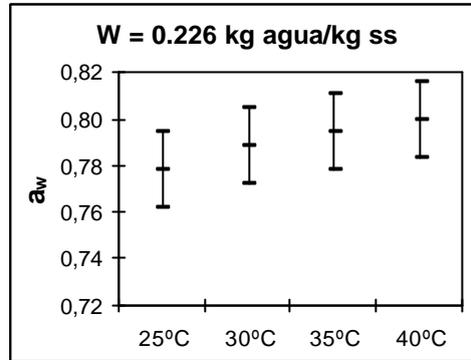


Figura 10.9.27. Intervalos LSD para W = 0.226 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

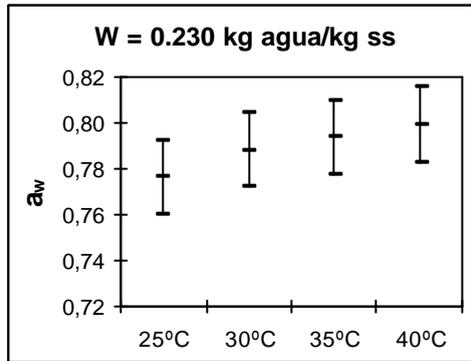


Figura 10.9.28. Intervalos LSD para W = 0.230 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

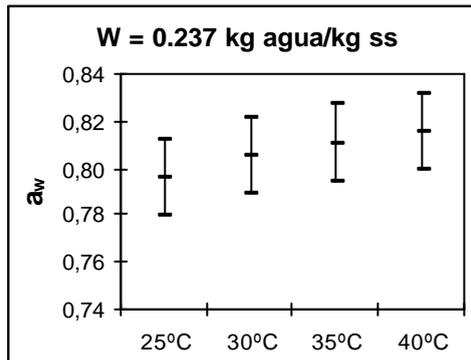


Figura 10.9.29. Intervalos LSD para W = 0.237 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

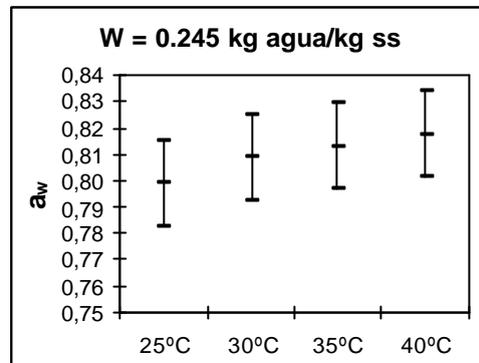


Figura 10.9.30. Intervalos LSD para  $W = 0.245$  kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

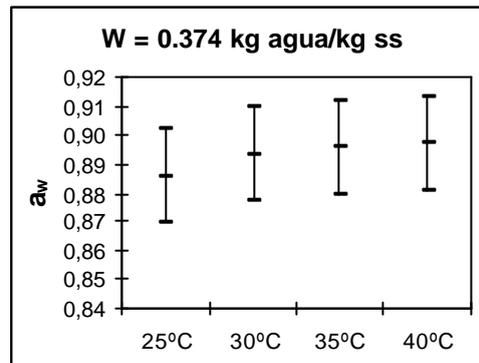


Figura 10.9.31. Intervalos LSD para  $W = 0.374$  kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

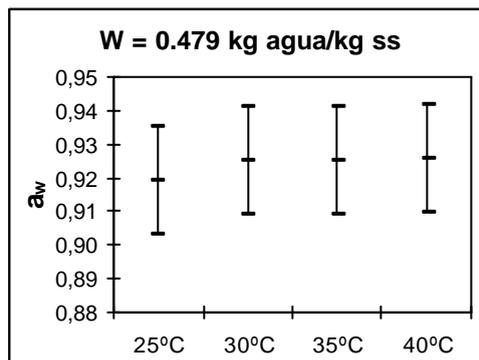


Figura 10.9.32. Intervalos LSD para  $W = 0.479$  kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

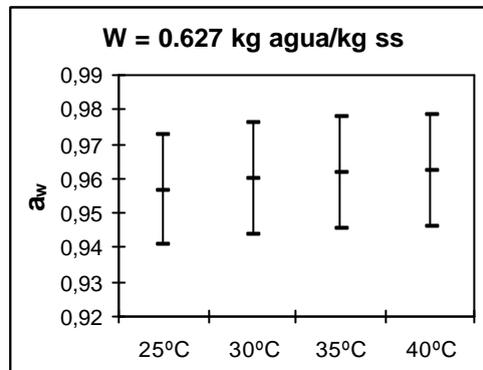


Figura 10.9.33. Intervalos LSD para W = 0.627 kg agua/kg ss. *Semimembranosus*.

### 10.10. Modelización de isotermas. Modelo de Oswin

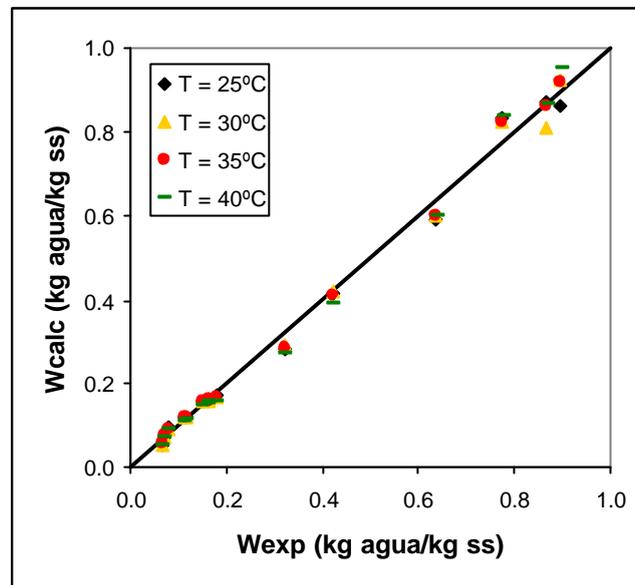


Figura 10.10.1. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin sin efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

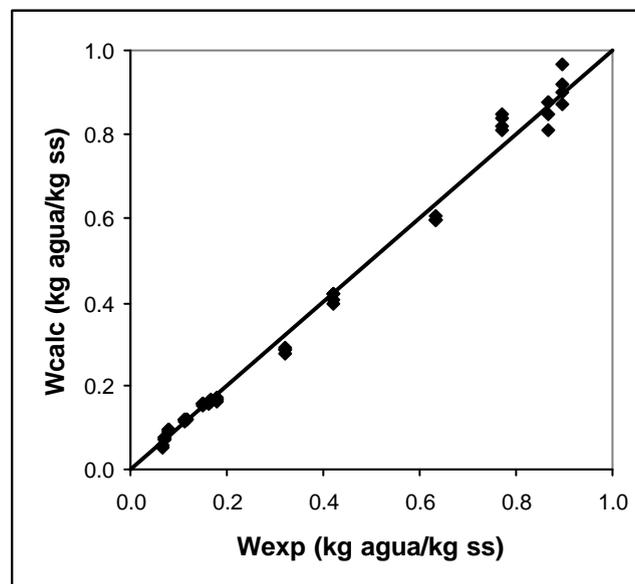


Figura 10.10.2. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin con efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

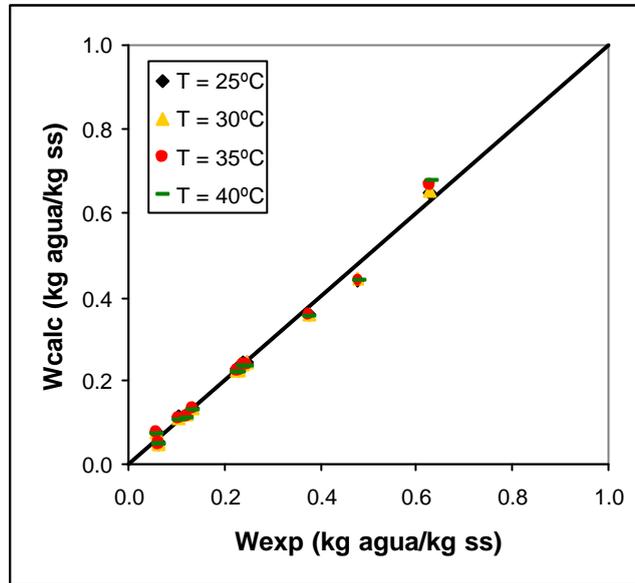


Figura 10.10.3. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin sin efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

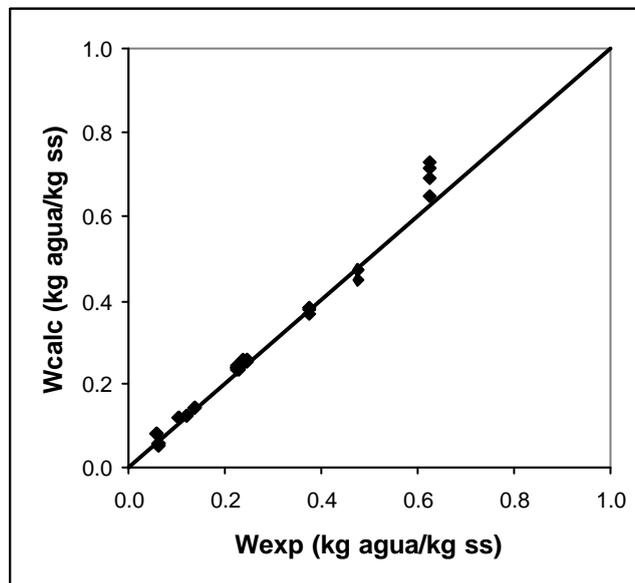


Figura 10.10.4. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Oswin con efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

### 10.11. Modelización de isotermas. Modelo de Henderson

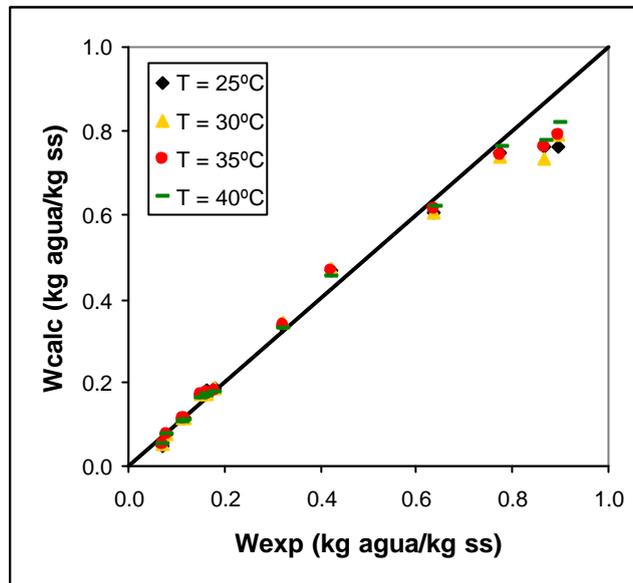


Figura 10.11.1. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson sin efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

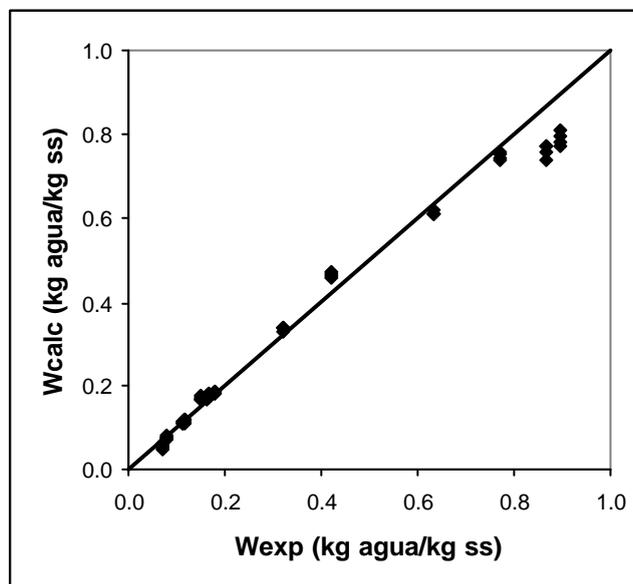


Figura 10.11.2. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson con efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

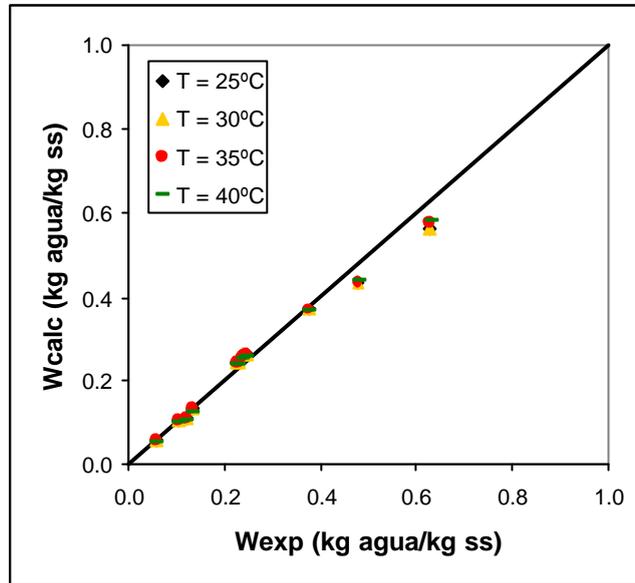


Figura 10.11.3. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson sin efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

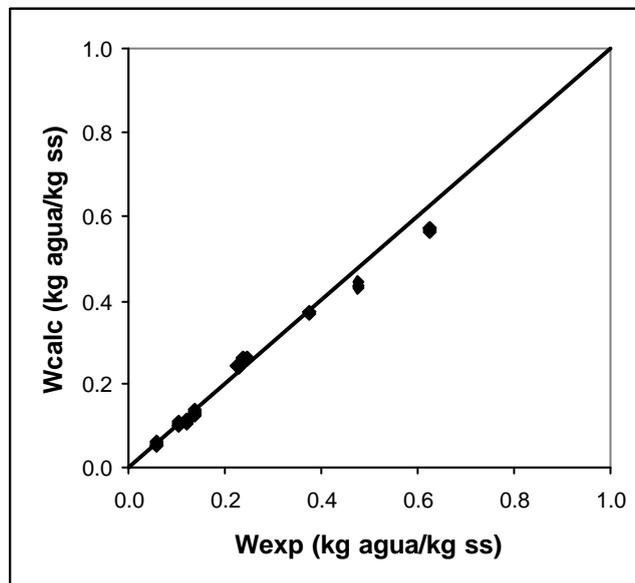


Figura 10.11.4. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de Henderson con efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

### 10.12. Modelización de isotermas. Halsey modificado

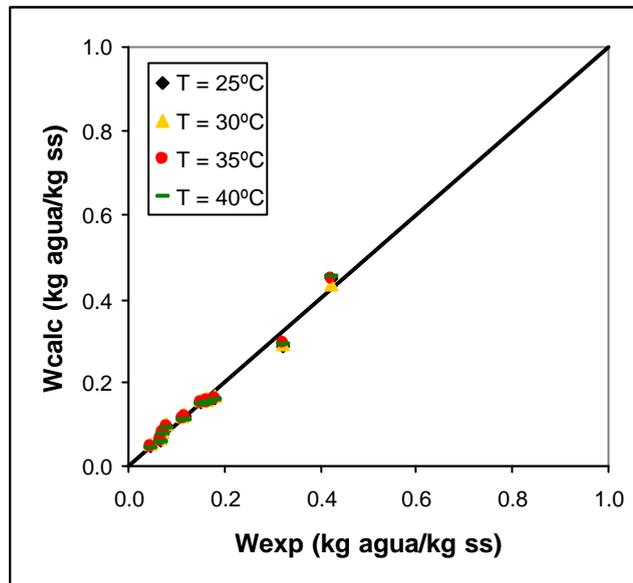


Figura 10.12.1. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado sin efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

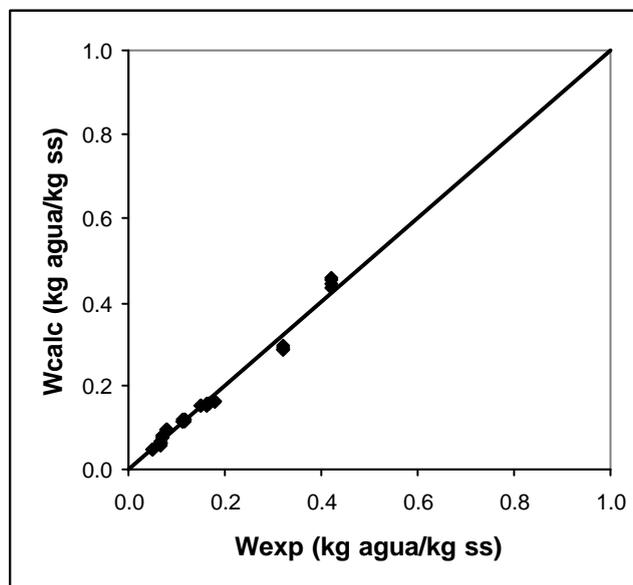


Figura 10.12.2. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado con efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

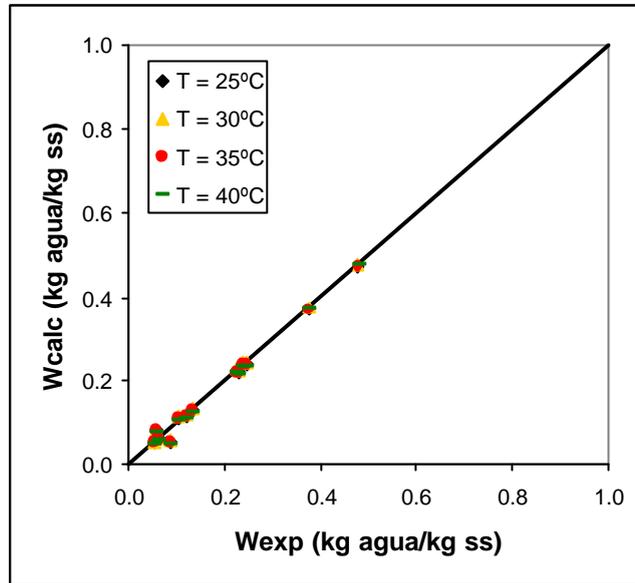


Figura 10.12.3. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado sin efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

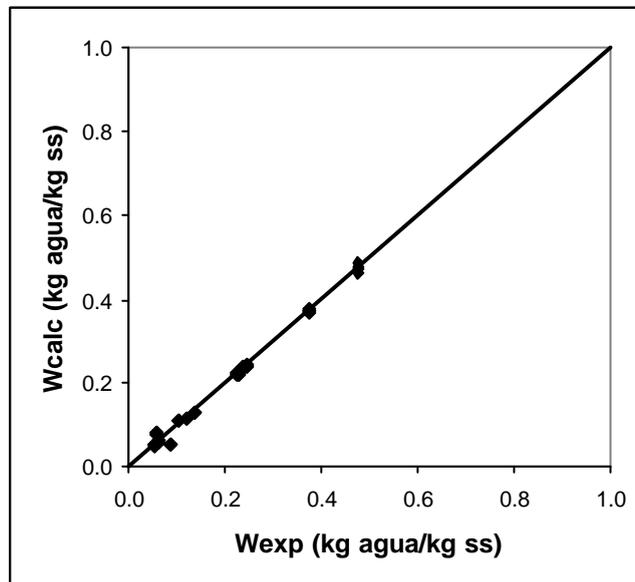


Figura 10.12.4. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Halsey modificado con efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

### 10.13. Modelización de isotermas. Modelo de GAB

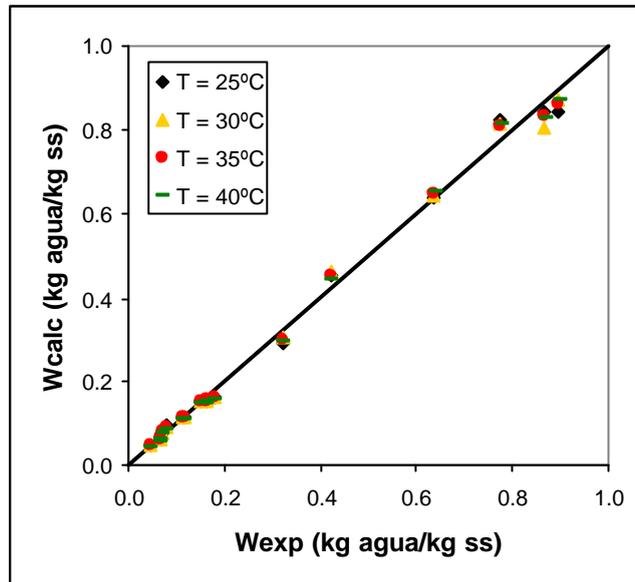


Figura 10.13.1. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB sin efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

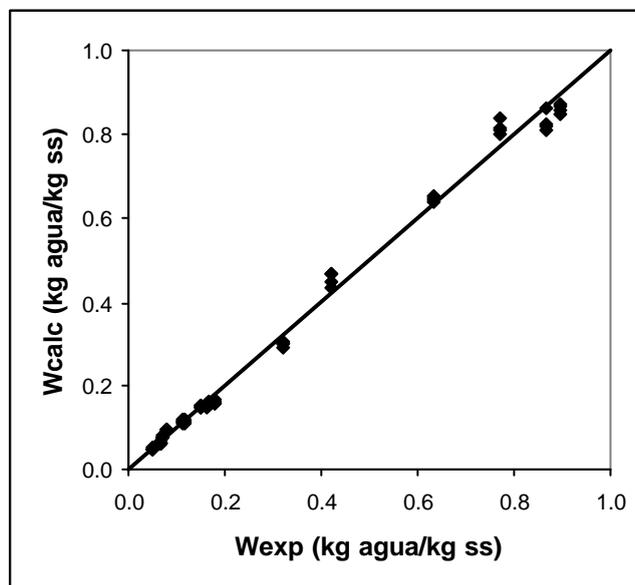


Figura 10.13.2. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB con efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

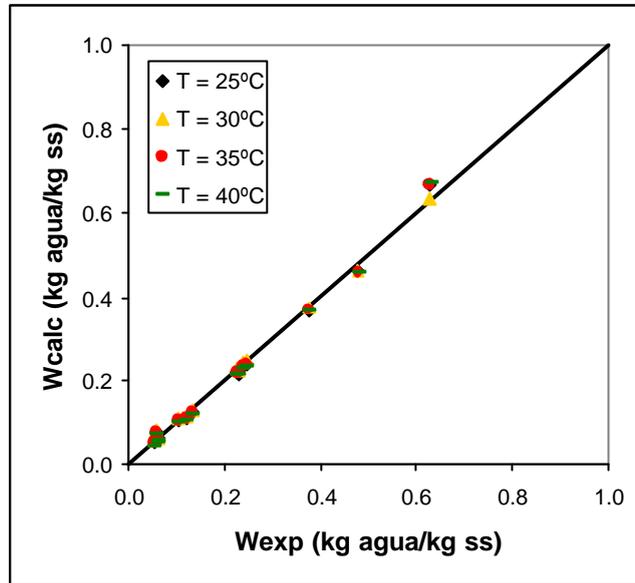


Figura 10.13.3. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB sin efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

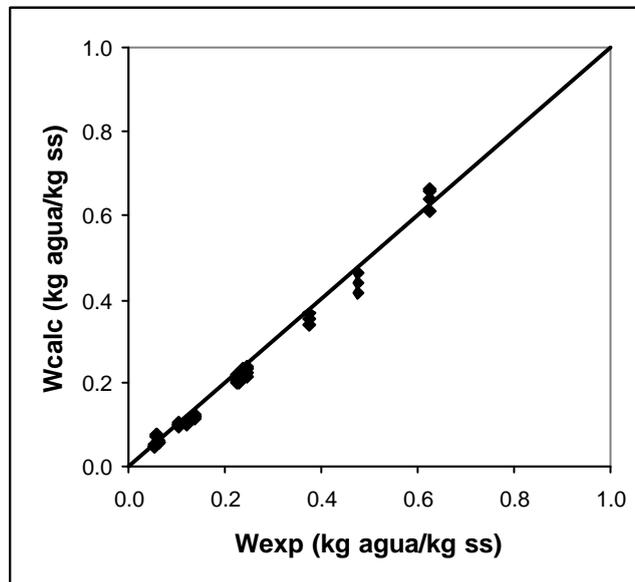


Figura 10.13.4. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de GAB con efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

### 10.14. Modelización de isotermas. Modelo de BET

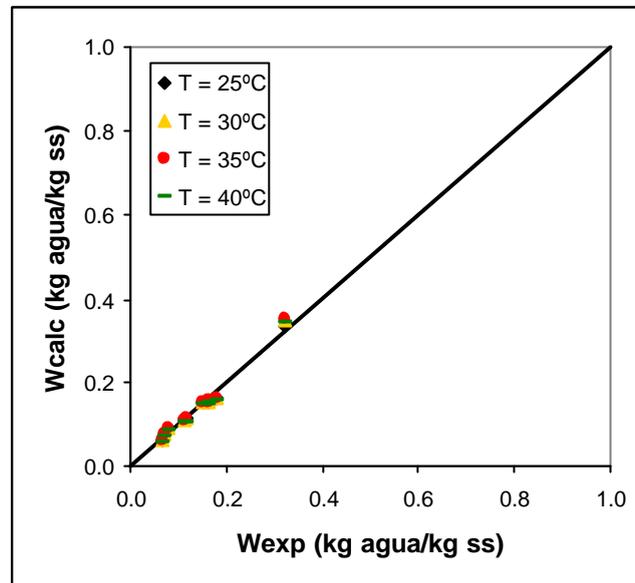


Figura 10.14.1. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET sin efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

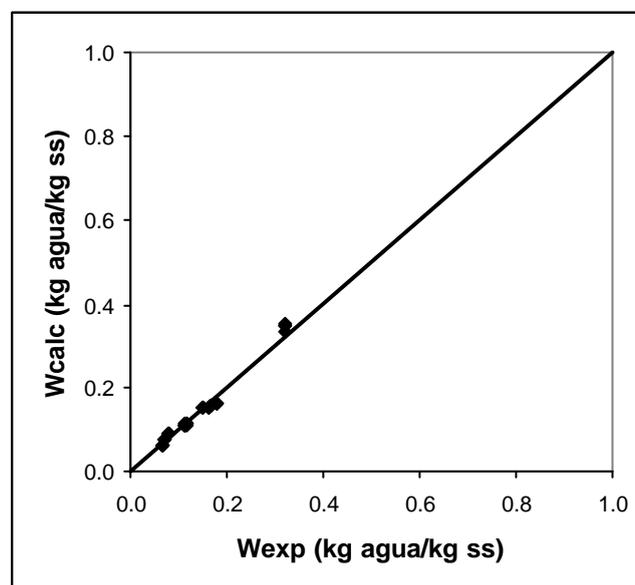


Figura 10.14.2. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET con efecto de la temperatura. *Biceps femoris*.

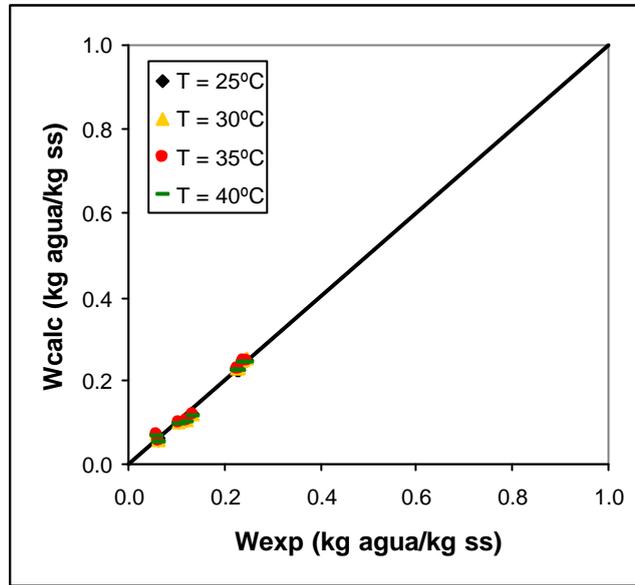


Figura 10.14.3. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET sin efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

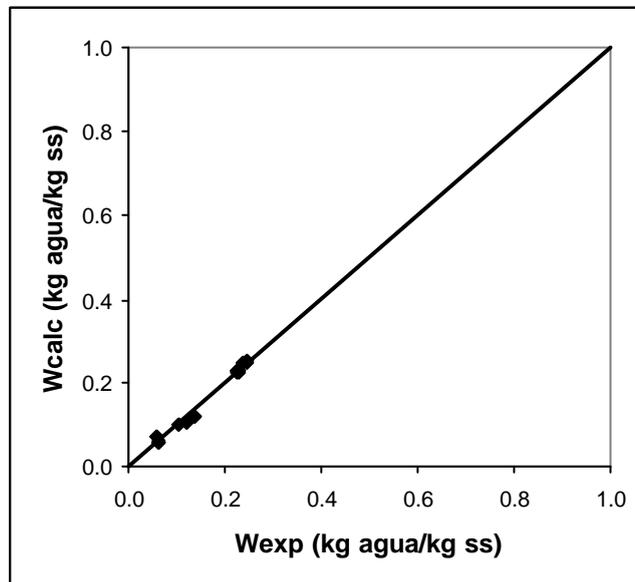


Figura 10.14.4. Valores de humedad calculada frente a la experimental. Modelo de BET con efecto de la temperatura. *Semimembranosus*.

### 10.15. Calor isostérico de sorción

En las Tablas 10.15.1. y 10.15.2. se muestra el calor isostérico de sorción para diferentes contenidos de humedad de los músculos *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

**Tabla 10.15.1.** Calores isostéricos de desorción obtenidos a partir de la ecuación de Clausius-Clayperon. Músculo *Bíceps femoris*.

W (kg agua/kg ss)	$Q_n^{st}/\mathcal{R}$	$Q_n^{st}$ (kJ/kg)	$Q^{st}$ (kJ/kg)
0.898 ± 0.016	44.2	20.4	2279.7
0.868 ± 0.003	29.5	13.6	2272.9
0.773 ± 0.010	28.7	13.2	2272.5
0.546 ± 0.003	57.2	26.4	2285.7
0.637 ± 0.006	62.9	29.1	2288.3
0.419 ± 0.006	38.0	17.6	2276.9
0.319 ± 0.022	144.8	66.9	2326.2
0.178 ± 0.009	284.2	131.3	2390.6
0.165 ± 0.013	331.5	153.1	2412.4
0.163 ± 0.013	248.4	114.7	2374.0
0.149 ± 0.002	326.8	150.9	2410.2
0.115 ± 0.002	422.2	195.0	2454.3
0.113 ± 0.002	374.1	172.8	2432.1
0.079 ± 0.003	708.5	327.2	2586.5
0.071 ± 0.008	1436.3	663.4	2922.7
0.067 ± 0.006	1456.3	672.7	2932.0
0.066 ± 0.001	2536.5	1171.6	3430.9
0.065 ± 0.001	2733.8	1262.7	3522.0
0.048 ± 0.004	2301.3	1063.0	3322.3

ANEJOS

**Tabla 10.15.2.** Calores isostéricos de desorción obtenidos a partir de la ecuación de Clausius-Clayperon. Músculo *Semimembranosus*.

<b>W (kg agua/kg ss)</b>	<b><math>Q_n^{st}/R</math></b>	<b><math>Q_n^{st}</math> (kJ/kg)</b>	<b><math>Q^{st}</math> (kJ/kg)</b>
0.627 ± 0.006	34.4	15.9	2275.2
0.479 ± 0.027	41.0	18.9	2278.2
0.374 ± 0.008	76.1	35.2	2294.5
0.245 ± 0.003	137.6	63.6	2322.9
0.237 ± 0.004	144.6	66.8	2326.1
0.230 ± 0.008	165.4	76.4	2335.7
0.226 ± 0.001	174.4	80.6	2339.9
0.135 ± 0.002	427.2	197.3	2456.6
0.122 ± 0.001	514.3	237.5	2496.8
0.103 ± 0.008	546.5	252.4	2511.7
0.064 ± 0.002	1376.8	635.9	2895.2
0.061 ± 0.002	2208.8	1020.2	3279.5
0.057 ± 0.001	153.1	70.7	2330.0
0.054 ± 0.005	2004.8	926.0	3185.3

### 10.16. Secado en secadero convectivo. Geometría cilíndrica infinita

**Tabla 10.16.1.** Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica infinita. *Bíceps femoris*.

MUESTRA	SC SRE (Analítica)		SC SRE (Numérica)	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var	De (m <sup>2</sup> /s)	% var
2 01 1	7.62E-11	97.80	7.28E-11	97.96
2 01 2	1.49E-10	90.58	1.50E-10	93.54
3 01 1	1.18E-10	91.28	1.13E-10	93.86
3 01 2	1.52E-10	91.22	1.52E-10	93.58
4 01 1	1.80E-10	97.99	1.72E-10	98.05
4 01 2	2.31E-10	98.57	2.31E-10	98.01
2 05 1	1.85E-10	94.82	1.78E-10	95.91
2 05 2	2.03E-10	97.98	2.04E-10	98.11
3 05 1	1.91E-10	98.31	1.83E-10	98.25
3 05 2	2.88E-10	98.46	2.89E-10	98.41
4 05 1	2.77E-10	99.00	2.76E-10	98.52
4 05 2	2.88E-10	98.32	2.87E-10	97.97
2 1 1	2.07E-10	98.37	1.98E-10	98.38
2 1 2	2.76E-10	98.36	2.79E-10	98.41
3 1 1	1.97E-10	99.67	1.90E-10	99.48
3 1 2	2.84E-10	98.45	2.85E-10	98.21
4 1 1	2.72E-10	99.69	2.61E-10	99.59
4 1 2	2.61E-10	99.33	2.60E-10	99.01

**Tabla 10.16.2.** Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica infinita. *Bíceps femoris*.

MUESTRA	CC SRE	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var
2 01 1	7.01E-11	98.20
2 01 2	1.45E-10	94.08
3 01 1	1.09E-10	94.22
3 01 2	1.48E-10	93.89
4 01 1	1.60E-10	98.49
4 01 2	2.18E-10	98.18
2 05 1	1.57E-10	96.79
2 05 2	1.81E-10	98.59
3 05 1	1.81E-10	98.54
3 05 2	2.89E-10	98.71
4 05 1	2.61E-10	98.55
4 05 2	2.71E-10	98.26
2 1 1	1.92E-10	98.62
2 1 2	2.71E-10	98.64
3 1 1	1.84E-10	99.39
3 1 2	2.79E-10	98.23
4 1 1	2.52E-10	99.63
4 1 2	2.58E-10	98.88

**Tabla 10.16.3.** Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica infinita. *Bíceps femoris*.

MUESTRA	SC_CRE		
	De (m <sup>2</sup> /s)	k (m/s)	% var
2 01 1	1.25E-10	1.00E-02	92.75
2 01 2	2.46E-10	1.90E-02	99.20
3 01 1	8.00E-11	8.00E-03	94.40
3 01 2	1.65E-10	7.50E-03	92.62
4 01 1	5.80E-11	8.00E-03	96.38
4 01 2	8.00E-11	8.00E-03	92.05
2 05 1	2.27E-10	3.40E-02	99.75
2 05 2	2.90E-10	3.80E-02	97.91
3 05 1	1.60E-10	6.00E-01	96.74
3 05 2	2.00E-10	1.50E-01	98.01
4 05 1	1.00E-10	4.80E-02	98.28
4 05 2	1.00E-10	2.40E-02	95.50
2 1 1	2.62E-10	4.10E-02	98.92
2 1 2	4.50E-10	4.50E-02	95.46
3 1 1	1.21E-10	2.00E-02	93.71
3 1 2	1.83E-10	2.90E-02	96.02
4 1 1	1.00E-10	3.10E-02	90.23
4 1 2	1.00E-10	3.30E-02	92.35

### 10.17. Secado en secadero convectivo. Geometría cilíndrica finita

**Tabla 10.17.1.** Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

MUESTRA	SC SRE (Analítica)		SC SRE (Numérica)	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var	De (m <sup>2</sup> /s)	% var
BF 25 06 1	1.01E-10	95.89	8.11E-11	92.46
BF 25 06 2	1.59E-10	94.82	1.35E-10	91.28
BF 25 06 3	1.14E-10	96.03	8.97E-11	92.59
BF 25 2 1	1.90E-10	99.14	1.66E-10	91.42
BF 25 2 2	2.32E-10	98.85	2.25E-10	92.08
BF 25 2 3	2.63E-10	97.72	2.59E-10	90.50
BF 25 28 1	3.65E-10	98.23	3.13E-10	97.01
BF 25 28 2	2.83E-10	90.74	2.75E-10	91.86
BF 25 28 3	2.22E-10	93.31	2.12E-10	95.31
SM 25 06 1	1.65E-10	87.02	1.49E-10	85.88
SM 25 06 2	1.29E-10	90.01	1.14E-10	86.26
SM 25 06 3	2.34E-10	92.43	1.92E-10	87.97
SM 25 2 1	2.00E-10	90.68	1.86E-10	90.17
SM 25 2 2	2.55E-10	90.31	2.35E-10	90.36
SM 25 2 3	1.97E-10	91.32	2.13E-10	90.39
SM 25 28 1	2.25E-10	90.10	2.15E-10	92.74
SM 25 28 2	2.59E-10	90.98	2.71E-10	91.61

**Tabla 10.17.2.** Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

MUESTRA	CC SRE	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var
BF 25 06 1	6.09E-11	98.11
BF 25 06 2	1.21E-10	94.37
BF 25 06 3	8.88E-11	95.37
BF 25 2 1	1.63E-10	92.35
BF 25 2 2	1.95E-10	92.99
BF 25 2 3	2.39E-10	90.22
BF 25 28 1	2.44E-10	98.68
BF 25 28 2	2.50E-10	94.08
BF 25 28 3	1.98E-10	97.40
SM 25 06 1	1.37E-10	85.88
SM 25 06 2	1.03E-10	89.63
SM 25 06 3	1.77E-10	90.38
SM 25 2 1	1.69E-10	90.15
SM 25 2 2	2.17E-10	90.57
SM 25 2 3	1.83E-10	90.39
SM 25 28 1	1.88E-10	92.89
SM 25 28 2	2.36E-10	92.95

**Tabla 10.17.3.** Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

MUESTRA	SC CRE		
	De (m <sup>2</sup> /s)	k (m/s)	% var
BF 25 06 1	2.02E-10	8.80E-03	95.45
BF 25 06 2	2.74E-10	1.34E-02	92.63
BF 25 06 3	1.80E-10	1.24E-02	92.57
BF 25 2 1	1.83E-10	2.96E-02	93.58
BF 25 2 2	2.25E-10	2.97E-02	95.66
BF 25 2 3	2.45E-10	3.29E-02	96.44
BF 25 28 1	1.98E-10	3.11E-02	93.79
BF 25 28 2	2.79E-10	3.31E-02	93.03
BF 25 28 3	2.12E-10	2.70E-02	96.56
SM 25 06 1	2.00E-10	1.76E-02	95.12
SM 25 06 2	1.50E-10	1.75E-02	94.55
SM 25 06 3	2.46E-10	1.80E-02	96.61
SM 25 2 1	1.75E-10	3.33E-02	90.12
SM 25 2 2	2.25E-10	3.26E-02	90.79
SM 25 2 3	1.52E-10	3.26E-02	93.79
SM 25 28 1	2.40E-10	4.03E-02	93.47
SM 25 28 2	2.23E-10	4.11E-02	97.43

**Tabla 10.17.4.** Modelo con contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris* y *Semimembranosus*.

MUESTRA	CC CRE		
	De (m <sup>2</sup> /s)	k (m/s)	% var
BF 25 06 1	1.99E-10	8.88E-03	95.16
BF 25 06 2	2.30E-10	1.34E-02	96.38
BF 25 06 3	1.71E-10	1.25E-02	93.28
BF 25 2 1	1.78E-10	2.96E-02	93.66
BF 25 2 2	2.17E-10	2.90E-02	96.35
BF 25 2 3	2.38E-10	3.34E-02	96.24
BF 25 28 1	1.91E-10	3.11E-02	93.51
BF 25 28 2	2.82E-10	3.19E-02	93.81
BF 25 28 3	1.98E-10	2.70E-02	98.79
SM 25 06 1	1.95E-10	1.48E-02	95.40
SM 25 06 2	1.43E-10	1.34E-02	94.53
SM 25 06 3	2.39E-10	1.47E-02	96.75
SM 25 2 1	1.65E-10	2.96E-02	91.57
SM 25 2 2	2.15E-10	3.03E-02	90.63
SM 25 2 3	1.52E-10	3.39E-02	93.53
SM 25 28 1	2.36E-10	3.78E-02	92.95
SM 25 28 2	1.99E-10	4.23E-02	97.25

### 10.18. Secado en cámara de secado. Geometría cilíndrica finita

**Tabla 10.18.1.** Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris*. Cámara de secado. Solución analítica.

MUESTRA	SC SRE (Analítica)		MUESTRA	SC SRE (Analítica)	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var		De (m <sup>2</sup> /s)	% var
BF 2 2 5 1	6.95E-12	79.95	BF 2 2 15 1	7.93E-12	96.37
BF 2 2 5 2	5.45E-12	78.27	BF 2 2 15 2	8.54E-12	95.68
BF 2 2 5 3	6.31E-12	86.85	BF 2 2 15 3	8.98E-12	94.27
BF 2 3 5 1	3.99E-12	85.91	BF 2 3 15 1	8.73E-12	91.81
BF 2 3 5 2	4.39E-12	83.75	BF 2 3 15 2	8.97E-12	90.00
BF 2 3 5 3	4.90E-12	82.02	BF 2 3 15 3	5.93E-12	94.73
BF 3 2 5 1	4.96E-12	56.80	BF 3 2 15 1	8.76E-12	77.72
BF 3 2 5 2	3.98E-12	53.09	BF 3 2 15 2	1.16E-11	74.69
BF 3 2 5 3	4.95E-12	59.85	BF 3 2 15 3	1.25E-11	79.21
BF 3 3 5 1	5.98E-12	58.38	BF 3 3 15 1	7.02E-12	76.46
BF 3 3 5 2	2.98E-12	44.82	BF 3 3 15 2	7.41E-12	74.84
BF 3 3 5 3	4.98E-12	44.58	BF 3 3 15 3	6.55E-12	73.99
BF 4 2 5 1	4.92E-12	48.20	BF 4 2 15 1	8.22E-12	72.83
BF 4 2 5 2	5.01E-12	54.18	BF 4 2 15 2	6.91E-12	79.74
BF 4 2 5 3	6.23E-12	51.80	BF 4 2 15 3	6.87E-12	78.41
BF 4 3 5 1	6.15E-12	57.29	BF 4 3 15 1	4.99E-12	41.22
BF 4 3 5 2	4.23E-12	59.59	BF 4 3 15 2	6.11E-12	48.60
BF 4 3 5 3	4.11E-12	58.61	BF 4 3 15 3	6.85E-12	53.69
BF 2 2 10 1	1.19E-11	91.79	BF 2 2 20 1	1.72E-11	94.60
BF 2 2 10 2	7.65E-12	95.20	BF 2 2 20 2	1.69E-11	94.07
BF 2 2 10 3	7.36E-12	93.35	BF 2 2 20 3	1.14E-11	95.51
BF 2 3 10 1	6.98E-12	89.59	BF 2 3 20 1	1.00E-11	88.16
BF 2 3 10 2	7.99E-12	92.48	BF 2 3 20 2	1.08E-11	91.57
BF 2 3 10 3	6.45E-12	90.77	BF 2 3 20 3	1.27E-11	94.39
BF 3 2 10 1	5.41E-12	81.62	BF 3 2 20 1	1.67E-11	82.54
BF 3 2 10 2	5.98E-12	83.65	BF 3 2 20 2	1.43E-11	79.78
BF 3 2 10 3	7.93E-12	79.83	BF 3 2 20 3	9.98E-12	81.27
BF 3 3 10 1	3.98E-12	32.16	BF 3 3 20 1	1.51E-11	85.44
BF 3 3 10 2	5.98E-12	65.67	BF 3 3 20 2	1.07E-11	78.55
BF 3 3 10 3	6.69E-12	66.53	BF 3 3 20 3	9.00E-12	70.37
BF 4 2 10 1	5.14E-12	70.10	BF 4 2 20 1	9.41E-12	65.78
BF 4 2 10 2	8.97E-12	76.53	BF 4 2 20 2	9.98E-12	67.37
BF 4 2 10 3	4.98E-12	79.67	BF 4 2 20 3	1.43E-11	76.99
BF 4 3 10 1	6.03E-12	53.35	BF 4 3 20 1	1.18E-11	72.12
BF 4 3 10 2	6.39E-12	50.49	BF 4 3 20 2	9.37E-12	65.28
BF 4 3 10 3	7.29E-12	59.72	BF 4 3 20 3	1.00E-11	70.92

ANEJOS

**Tabla 10.18.2.** Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris*. Cámara de secado. Solución numérica.

MUESTRA	SC_SRE (Numérica)		MUESTRA	SC_SRE (Numérica)	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var		De (m <sup>2</sup> /s)	% var
BF 2 2 5 1	7.68E-12	88.23	BF 2 2 15 1	8.94E-12	99.17
BF 2 2 5 2	6.36E-12	86.57	BF 2 2 15 2	9.69E-12	98.70
BF 2 2 5 3	7.33E-12	93.54	BF 2 2 15 3	9.80E-12	97.89
BF 2 3 5 1	4.96E-12	93.75	BF 2 3 15 1	8.78E-12	97.23
BF 2 3 5 2	5.44E-12	92.59	BF 2 3 15 2	1.00E-11	95.19
BF 2 3 5 3	5.64E-12	91.05	BF 2 3 15 3	6.83E-12	98.62
BF 3 2 5 1	5.82E-12	72.19	BF 3 2 15 1	8.68E-12	87.73
BF 3 2 5 2	5.15E-12	71.31	BF 3 2 15 2	1.04E-11	87.13
BF 3 2 5 3	5.81E-12	74.49	BF 3 2 15 3	1.15E-11	89.97
BF 3 3 5 1	6.94E-12	74.40	BF 3 3 15 1	7.08E-12	89.35
BF 3 3 5 2	6.34E-12	66.84	BF 3 3 15 2	7.21E-12	87.98
BF 3 3 5 3	5.89E-12	64.07	BF 3 3 15 3	6.72E-12	87.31
BF 4 2 5 1	5.75E-12	67.17	BF 4 2 15 1	7.29E-12	90.25
BF 4 2 5 2	3.78E-12	74.37	BF 4 2 15 2	8.30E-12	89.81
BF 4 2 5 3	7.36E-12	70.21	BF 4 2 15 3	7.08E-12	90.22
BF 4 3 5 1	7.50E-12	75.07	BF 4 3 15 1	6.55E-12	64.23
BF 4 3 5 2	5.19E-12	77.13	BF 4 3 15 2	7.60E-12	67.84
BF 4 3 5 3	5.08E-12	76.55	BF 4 3 15 3	8.36E-12	71.63
BF 2 2 10 1	1.29E-11	95.52	BF 2 2 20 1	1.65E-11	97.61
BF 2 2 10 2	8.64E-12	98.44	BF 2 2 20 2	1.60E-11	97.69
BF 2 2 10 3	8.38E-12	97.20	BF 2 2 20 3	1.28E-11	98.00
BF 2 3 10 1	8.06E-12	95.28	BF 2 3 20 1	1.34E-11	96.32
BF 2 3 10 2	9.05E-12	97.06	BF 2 3 20 2	1.19E-11	96.20
BF 2 3 10 3	7.49E-12	95.96	BF 2 3 20 3	1.39E-11	97.82
BF 3 2 10 1	6.91E-12	91.21	BF 3 2 20 1	1.74E-11	89.94
BF 3 2 10 2	7.30E-12	92.11	BF 3 2 20 2	1.49E-11	88.57
BF 3 2 10 3	9.44E-12	89.33	BF 3 2 20 3	1.18E-11	90.39
BF 3 3 10 1	8.70E-12	89.01	BF 3 3 20 1	1.57E-11	93.38
BF 3 3 10 2	7.22E-12	80.20	BF 3 3 20 2	1.29E-11	88.63
BF 3 3 10 3	7.93E-12	79.97	BF 3 3 20 3	9.20E-12	83.10
BF 4 2 10 1	6.39E-12	83.42	BF 4 2 20 1	1.14E-11	80.15
BF 4 2 10 2	1.07E-11	87.23	BF 4 2 20 2	1.18E-11	80.70
BF 4 2 10 3	6.13E-12	89.63	BF 4 2 20 3	1.47E-11	86.78
BF 4 3 10 1	7.48E-12	71.91	BF 4 3 20 1	1.44E-11	85.15
BF 4 3 10 2	7.81E-12	69.05	BF 4 3 20 2	1.17E-11	80.73
BF 4 3 10 3	8.74E-12	75.58	BF 4 3 20 3	9.08E-12	87.43

**Tabla 10.18.3.** Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Semimembranosus*. Cámara de secado. Solución analítica.

MUESTRA	SC SRE (Analítica)		MUESTRA	SC SRE (Analítica)	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var		De (m <sup>2</sup> /s)	% var
SM 2 2 5 1	5.10E-12	83.59	SM 2 2 15 1	8.46E-12	93.66
SM 2 2 5 2	3.98E-12	89.98	SM 2 2 15 2	5.40E-12	91.86
SM 2 2 5 3	5.23E-12	84.28	SM 2 2 15 3	4.97E-12	91.21
SM 2 3 5 1	2.98E-12	78.18	SM 2 3 15 1	4.98E-12	95.81
SM 2 3 5 2	2.95E-12	74.38	SM 2 3 15 2	8.00E-12	89.90
SM 2 3 5 3	3.94E-12	73.62	SM 2 3 15 3	7.90E-12	87.73
SM 3 2 5 1	4.95E-12	61.51	SM 3 2 15 1	9.43E-12	81.18
SM 3 2 5 2	4.41E-12	65.09	SM 3 2 15 2	7.38E-12	85.14
SM 3 2 5 3	2.95E-12	63.62	SM 3 2 15 3	8.13E-12	78.78
SM 3 3 5 1	4.65E-12	59.13	SM 3 3 15 1	7.54E-12	78.85
SM 3 3 5 2	4.19E-12	50.37	SM 3 3 15 2	6.17E-12	77.06
SM 3 3 5 3	3.95E-12	52.75	SM 3 3 15 3	6.21E-12	79.88
SM 4 2 5 1	3.38E-12	23.40	SM 4 2 15 1	6.43E-12	56.88
SM 4 2 5 2	3.07E-12	34.40	SM 4 2 15 2	4.98E-12	68.60
SM 4 2 5 3	5.92E-12	41.66	SM 4 2 15 3	3.94E-12	52.73
SM 4 3 5 1	4.04E-12	41.33	SM 4 3 15 1	4.93E-12	39.29
SM 4 3 5 2	2.98E-12	36.13	SM 4 3 15 2	4.34E-12	41.75
SM 4 3 5 3	2.95E-12	44.74	SM 4 3 15 3	5.00E-12	52.73
SM 2 2 10 1	7.90E-12	90.10	SM 2 2 20 1	1.25E-11	88.63
SM 2 2 10 2	7.50E-12	92.57	SM 2 2 20 2	1.40E-11	90.18
SM 2 2 10 3	7.70E-12	92.92	SM 2 2 20 3	1.06E-11	82.69
SM 2 3 10 1	5.43E-12	92.39	SM 2 3 20 1	7.07E-12	87.93
SM 2 3 10 2	5.95E-12	92.94	SM 2 3 20 2	6.12E-12	88.49
SM 2 3 10 3	6.46E-12	92.89	SM 2 3 20 3	7.23E-12	90.72
SM 3 2 10 1	7.11E-12	88.44	SM 3 2 20 1	1.08E-11	75.00
SM 3 2 10 2	6.68E-12	87.05	SM 3 2 20 2	6.25E-12	75.34
SM 3 2 10 3	6.25E-12	84.36	SM 3 2 20 3	5.42E-12	77.69
SM 3 3 10 1	1.09E-11	78.28	SM 3 3 20 1	1.21E-11	77.95
SM 3 3 10 2	6.22E-12	81.98	SM 3 3 20 2	1.28E-11	72.96
SM 3 3 10 3	6.32E-12	81.43	SM 3 3 20 3	7.08E-12	65.97
SM 4 2 10 1	5.00E-12	82.86	SM 4 2 20 1	5.73E-12	65.72
SM 4 2 10 2	5.56E-12	79.92	SM 4 2 20 2	9.59E-12	69.51
SM 4 2 10 3	4.22E-12	70.58	SM 4 2 20 3	1.07E-11	71.29
SM 4 3 10 1	4.12E-12	48.90	SM 4 3 20 1	6.19E-12	62.52
SM 4 3 10 2	5.11E-12	57.67	SM 4 3 20 2	4.61E-12	60.34
SM 4 3 10 3	6.00E-12	62.63	SM 4 3 20 3	4.13E-12	64.40

**Tabla 10.18.4.** Modelo sin contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Semimembranosus*. Cámara de secado. Solución numérica.

MUESTRA	SC_SRE (Numérica)		MUESTRA	SC_SRE (Numérica)	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var		De (m <sup>2</sup> /s)	% var
SM 2 2 5 1	5.39E-12	92.98	SM 2 2 15 1	8.52E-12	98.50
SM 2 2 5 2	4.90E-12	96.57	SM 2 2 15 2	6.39E-12	97.16
SM 2 2 5 3	5.27E-12	94.62	SM 2 2 15 3	5.68E-12	97.25
SM 2 3 5 1	3.43E-12	88.98	SM 2 3 15 1	5.90E-12	99.05
SM 2 3 5 2	3.16E-12	86.56	SM 2 3 15 2	7.80E-12	96.96
SM 2 3 5 3	4.64E-12	85.26	SM 2 3 15 3	7.98E-12	95.13
SM 3 2 5 1	5.60E-12	76.28	SM 3 2 15 1	1.06E-11	89.91
SM 3 2 5 2	5.24E-12	80.19	SM 3 2 15 2	8.90E-12	92.95
SM 3 2 5 3	3.65E-12	79.53	SM 3 2 15 3	7.83E-12	90.42
SM 3 3 5 1	5.40E-12	75.73	SM 3 3 15 1	7.88E-12	90.10
SM 3 3 5 2	4.95E-12	69.61	SM 3 3 15 2	7.74E-12	89.04
SM 3 3 5 3	4.49E-12	70.52	SM 3 3 15 3	7.39E-12	90.07
SM 4 2 5 1	4.28E-12	51.86	SM 4 2 15 1	7.67E-12	72.73
SM 4 2 5 2	3.91E-12	59.77	SM 4 2 15 2	5.44E-12	79.51
SM 4 2 5 3	6.47E-12	60.19	SM 4 2 15 3	4.53E-12	67.86
SM 4 3 5 1	4.72E-12	62.20	SM 4 3 15 1	6.35E-12	61.70
SM 4 3 5 2	3.67E-12	58.87	SM 4 3 15 2	5.87E-12	65.40
SM 4 3 5 3	3.87E-12	67.80	SM 4 3 15 3	6.53E-12	72.44
SM 2 2 10 1	7.00E-12	98.64	SM 2 2 20 1	1.08E-11	96.45
SM 2 2 10 2	7.42E-12	98.32	SM 2 2 20 2	1.29E-11	95.84
SM 2 2 10 3	7.57E-12	98.26	SM 2 2 20 3	8.35E-12	95.12
SM 2 3 10 1	6.40E-12	97.56	SM 2 3 20 1	8.23E-12	94.39
SM 2 3 10 2	7.00E-12	97.77	SM 2 3 20 2	7.24E-12	95.16
SM 2 3 10 3	7.53E-12	97.69	SM 2 3 20 3	8.16E-12	95.99
SM 3 2 10 1	8.65E-12	95.36	SM 3 2 20 1	9.61E-12	88.05
SM 3 2 10 2	7.97E-12	94.63	SM 3 2 20 2	7.78E-12	87.30
SM 3 2 10 3	7.66E-12	92.95	SM 3 2 20 3	6.84E-12	89.05
SM 3 3 10 1	9.47E-12	92.08	SM 3 3 20 1	1.12E-11	89.71
SM 3 3 10 2	7.49E-12	91.63	SM 3 3 20 2	1.22E-11	84.78
SM 3 3 10 3	7.55E-12	91.08	SM 3 3 20 3	8.61E-12	80.80
SM 4 2 10 1	6.13E-12	91.42	SM 4 2 20 1	7.57E-12	82.49
SM 4 2 10 2	6.67E-12	89.51	SM 4 2 20 2	8.40E-12	86.03
SM 4 2 10 3	5.02E-12	82.77	SM 4 2 20 3	9.55E-12	85.00
SM 4 3 10 1	5.35E-12	70.66	SM 4 3 20 1	7.98E-12	79.75
SM 4 3 10 2	6.40E-12	75.74	SM 4 3 20 2	5.97E-12	77.97
SM 4 3 10 3	7.36E-12	78.36	SM 4 3 20 3	5.58E-12	81.42

**Tabla 10.18.5.** Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris*. Cámara de secado.

MUESTRA	CC SRE		MUESTRA	CC SRE	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var		De (m <sup>2</sup> /s)	% var
BF 2 2 5 1	6.72E-12	93.30	BF 2 2 15 1	7.95E-12	99.86
BF 2 2 5 2	6.12E-12	91.58	BF 2 2 15 2	8.28E-12	99.84
BF 2 2 5 3	6.47E-12	96.77	BF 2 2 15 3	7.95E-12	99.50
BF 2 3 5 1	4.45E-12	96.42	BF 2 3 15 1	7.62E-12	99.03
BF 2 3 5 2	4.86E-12	95.61	BF 2 3 15 2	8.08E-12	97.91
BF 2 3 5 3	4.80E-12	94.31	BF 2 3 15 3	6.14E-12	99.81
BF 3 2 5 1	5.22E-12	79.32	BF 3 2 15 1	7.53E-12	93.06
BF 3 2 5 2	4.71E-12	77.80	BF 3 2 15 2	8.89E-12	92.69
BF 3 2 5 3	5.18E-12	81.02	BF 3 2 15 3	9.68E-12	94.86
BF 3 3 5 1	6.27E-12	82.29	BF 3 3 15 1	6.59E-12	93.17
BF 3 3 5 2	5.55E-12	75.19	BF 3 3 15 2	6.45E-12	92.06
BF 3 3 5 3	5.15E-12	72.77	BF 3 3 15 3	6.05E-12	91.38
BF 4 2 5 1	5.30E-12	75.78	BF 4 2 15 1	7.08E-12	93.87
BF 4 2 5 2	3.38E-12	81.61	BF 4 2 15 2	7.37E-12	93.97
BF 4 2 5 3	6.64E-12	79.71	BF 4 2 15 3	6.89E-12	94.03
BF 4 3 5 1	6.64E-12	82.52	BF 4 3 15 1	6.24E-12	72.29
BF 4 3 5 2	4.89E-12	82.77	BF 4 3 15 2	7.11E-12	75.82
BF 4 3 5 3	4.74E-12	82.18	BF 4 3 15 3	7.95E-12	79.09
BF 2 2 10 1	1.06E-11	98.10	BF 2 2 20 1	1.50E-11	97.63
BF 2 2 10 2	7.76E-12	99.66	BF 2 2 20 2	1.42E-11	98.60
BF 2 2 10 3	7.17E-12	99.15	BF 2 2 20 3	1.24E-11	98.20
BF 2 3 10 1	7.07E-12	98.01	BF 2 3 20 1	1.16E-11	98.41
BF 2 3 10 2	8.04E-12	99.15	BF 2 3 20 2	1.04E-11	98.42
BF 2 3 10 3	6.66E-12	98.38	BF 2 3 20 3	1.18E-11	99.42
BF 3 2 10 1	6.53E-12	94.37	BF 3 2 20 1	1.39E-11	95.04
BF 3 2 10 2	6.80E-12	95.22	BF 3 2 20 2	1.24E-11	93.91
BF 3 2 10 3	8.09E-12	93.70	BF 3 2 20 3	1.01E-11	94.82
BF 3 3 10 1	7.75E-12	93.29	BF 3 3 20 1	1.35E-11	96.87
BF 3 3 10 2	6.62E-12	86.34	BF 3 3 20 2	1.16E-11	93.27
BF 3 3 10 3	7.26E-12	86.24	BF 3 3 20 3	8.49E-12	88.64
BF 4 2 10 1	5.97E-12	88.24	BF 4 2 20 1	1.05E-11	87.56
BF 4 2 10 2	9.34E-12	92.44	BF 4 2 20 2	9.97E-12	88.08
BF 4 2 10 3	5.43E-12	93.56	BF 4 2 20 3	1.28E-11	92.95
BF 4 3 10 1	6.63E-12	79.04	BF 4 3 20 1	1.23E-11	90.39
BF 4 3 10 2	6.84E-12	77.38	BF 4 3 20 2	1.03E-11	87.05
BF 4 3 10 3	7.53E-12	83.07	BF 4 3 20 3	7.84E-12	92.48

**Tabla 10.18.6.** Modelo con contracción y sin resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Semimembranosus*. Cámara de secado.

MUESTRA	CC SRE		MUESTRA	CC SRE	
	De (m <sup>2</sup> /s)	% var		De (m <sup>2</sup> /s)	% var
SM 2 2 5 1	4.81E-12	96.05	SM 2 2 15 1	7.81E-12	99.47
SM 2 2 5 2	4.39E-12	98.48	SM 2 2 15 2	6.28E-12	98.93
SM 2 2 5 3	5.18E-12	97.48	SM 2 2 15 3	5.96E-12	99.04
SM 2 3 5 1	3.63E-12	93.92	SM 2 3 15 1	4.88E-12	99.63
SM 2 3 5 2	3.16E-12	91.44	SM 2 3 15 2	6.18E-12	98.75
SM 2 3 5 3	4.02E-12	90.37	SM 2 3 15 3	7.30E-12	97.75
SM 3 2 5 1	4.87E-12	84.01	SM 3 2 15 1	9.18E-12	95.04
SM 3 2 5 2	4.90E-12	86.92	SM 3 2 15 2	8.23E-12	96.49
SM 3 2 5 3	3.34E-12	85.50	SM 3 2 15 3	7.49E-12	95.05
SM 3 3 5 1	4.95E-12	83.75	SM 3 3 15 1	7.36E-12	94.28
SM 3 3 5 2	4.44E-12	78.43	SM 3 3 15 2	7.22E-12	93.31
SM 3 3 5 3	4.49E-12	70.52	SM 3 3 15 3	6.75E-12	94.03
SM 4 2 5 1	3.61E-12	62.27	SM 4 2 15 1	6.36E-12	81.93
SM 4 2 5 2	3.41E-12	69.34	SM 4 2 15 2	4.48E-12	87.63
SM 4 2 5 3	5.23E-12	72.92	SM 4 2 15 3	4.08E-12	77.97
SM 4 3 5 1	4.55E-12	71.22	SM 4 3 15 1	5.92E-12	69.59
SM 4 3 5 2	3.46E-12	66.41	SM 4 3 15 2	5.23E-12	72.49
SM 4 3 5 3	3.61E-12	74.55	SM 4 3 15 3	5.72E-12	78.98
SM 2 2 10 1	6.33E-12	99.54	SM 2 2 20 1	9.37E-12	97.97
SM 2 2 10 2	6.71E-12	99.53	SM 2 2 20 2	1.01E-11	97.60
SM 2 2 10 3	6.58E-12	99.60	SM 2 2 20 3	7.88E-12	97.41
SM 2 3 10 1	5.73E-12	99.18	SM 2 3 20 1	7.37E-12	97.30
SM 2 3 10 2	6.21E-12	99.40	SM 2 3 20 2	6.61E-12	97.72
SM 2 3 10 3	6.36E-12	99.30	SM 2 3 20 3	7.82E-12	97.95
SM 3 2 10 1	7.32E-12	97.85	SM 3 2 20 1	8.31E-12	93.31
SM 3 2 10 2	7.15E-12	97.34	SM 3 2 20 2	7.46E-12	92.41
SM 3 2 10 3	6.80E-12	96.26	SM 3 2 20 3	6.18E-12	93.30
SM 3 3 10 1	7.60E-12	95.57	SM 3 3 20 1	9.71E-12	94.40
SM 3 3 10 2	6.60E-12	95.09	SM 3 3 20 2	9.72E-12	90.53
SM 3 3 10 3	6.50E-12	94.77	SM 3 3 20 3	7.25E-12	87.19
SM 4 2 10 1	5.24E-12	95.02	SM 4 2 20 1	6.82E-12	87.62
SM 4 2 10 2	5.80E-12	93.75	SM 4 2 20 2	7.67E-12	90.70
SM 4 2 10 3	4.44E-12	89.17	SM 4 2 20 3	8.41E-12	91.04
SM 4 3 10 1	4.57E-12	77.02	SM 4 3 20 1	7.07E-12	85.01
SM 4 3 10 2	5.56E-12	82.02	SM 4 3 20 2	5.52E-12	82.74
SM 4 3 10 3	6.13E-12	84.51	SM 4 3 20 3	5.12E-12	85.52

**Tabla 10.18.7.** Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris*. Cámara de secado.

MUESTRA	SC_CRE		MUESTRA	SC_CRE	
	k (m/s)	% var		k (m/s)	% var
BF 2 2 5 1	2.56E-03	99.56	BF 2 2 15 1	1.47E-03	94.19
BF 2 2 5 2	2.33E-03	99.36	BF 2 2 15 2	1.56E-03	93.62
BF 2 2 5 3	2.48E-03	98.19	BF 2 2 15 3	1.36E-03	95.17
BF 2 3 5 1	1.90E-03	99.04	BF 2 3 15 1	1.45E-03	95.58
BF 2 3 5 2	1.90E-03	99.01	BF 2 3 15 2	1.33E-03	96.85
BF 2 3 5 3	1.92E-03	99.69	BF 2 3 15 3	1.33E-03	95.12
BF 3 2 5 1	1.50E-03	99.07	BF 3 2 15 1	9.26E-04	98.66
BF 3 2 5 2	1.43E-03	98.17	BF 3 2 15 2	1.09E-03	99.11
BF 3 2 5 3	1.55E-03	99.16	BF 3 2 15 3	9.72E-04	98.59
BF 3 3 5 1	1.54E-03	98.76	BF 3 3 15 1	8.09E-04	99.13
BF 3 3 5 2	1.23E-03	96.35	BF 3 3 15 2	8.31E-04	99.13
BF 3 3 5 3	1.25E-03	97.57	BF 3 3 15 3	7.53E-04	99.44
BF 4 2 5 1	1.24E-03	98.98	BF 4 2 15 1	7.75E-04	99.02
BF 4 2 5 2	1.21E-03	99.13	BF 4 2 15 2	7.60E-04	99.19
BF 4 2 5 3	1.37E-03	99.45	BF 4 2 15 3	8.01E-04	98.94
BF 4 3 5 1	1.33E-03	99.38	BF 4 3 15 1	5.81E-04	98.97
BF 4 3 5 2	1.11E-03	99.07	BF 4 3 15 2	6.31E-04	98.99
BF 4 3 5 3	1.06E-03	98.73	BF 4 3 15 3	7.05E-04	99.30
BF 2 2 10 1	2.87E-03	97.40	BF 2 2 20 1	1.74E-03	97.12
BF 2 2 10 2	2.16E-03	91.97	BF 2 2 20 2	1.74E-03	97.26
BF 2 2 10 3	2.15E-03	93.43	BF 2 2 20 3	1.44E-03	96.27
BF 2 3 10 1	1.77E-03	95.55	BF 2 3 20 1	1.32E-03	98.33
BF 2 3 10 2	2.22E-03	96.11	BF 2 3 20 2	1.28E-03	98.50
BF 2 3 10 3	1.76E-03	94.57	BF 2 3 20 3	1.44E-03	97.01
BF 3 2 10 1	1.27E-03	98.70	BF 3 2 20 1	1.27E-03	98.50
BF 3 2 10 2	1.31E-03	98.35	BF 3 2 20 2	1.01E-03	99.20
BF 3 2 10 3	1.60E-03	98.59	BF 3 2 20 3	9.22E-04	99.00
BF 3 3 10 1	1.29E-03	99.11	BF 3 3 20 1	1.12E-03	98.21
BF 3 3 10 2	1.10E-03	99.12	BF 3 3 20 2	9.57E-04	97.15
BF 3 3 10 3	1.14E-03	98.87	BF 3 3 20 3	8.72E-04	99.52
BF 4 2 10 1	1.23E-03	98.67	BF 4 2 20 1	5.80E-04	99.67
BF 4 2 10 2	1.33E-03	99.18	BF 4 2 20 2	7.22E-04	99.47
BF 4 2 10 3	1.11E-03	99.21	BF 4 2 20 3	9.78E-04	97.99
BF 4 3 10 1	9.25E-04	98.30	BF 4 3 20 1	8.31E-04	99.65
BF 4 3 10 2	9.29E-04	98.42	BF 4 3 20 2	7.16E-04	99.32
BF 4 3 10 3	1.03E-03	99.15	BF 4 3 20 3	5.58E-04	96.18

**Tabla 10.18.8.** Modelo sin contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Semimembranosus*. Cámara de secado.

MUESTRA	SC CRE		MUESTRA	SC CRE	
	k (m/s)	% var		k (m/s)	% var
SM 2 2 5 1	1.82E-03	99.02	SM 2 2 15 1	1.33E-03	95.01
SM 2 2 5 2	1.76E-03	97.29	SM 2 2 15 2	1.33E-03	93.61
SM 2 2 5 3	1.59E-03	97.52	SM 2 2 15 3	1.02E-03	97.54
SM 2 3 5 1	1.33E-03	99.45	SM 2 3 15 1	1.10E-03	94.98
SM 2 3 5 2	1.28E-03	99.33	SM 2 3 15 2	1.18E-03	97.05
SM 2 3 5 3	1.49E-03	99.25	SM 2 3 15 3	1.35E-03	98.50
SM 3 2 5 1	1.26E-03	98.99	SM 3 2 15 1	1.05E-03	98.56
SM 3 2 5 2	1.09E-03	99.27	SM 3 2 15 2	9.78E-04	96.99
SM 3 2 5 3	1.03E-03	98.97	SM 3 2 15 3	8.61E-04	98.68
SM 3 3 5 1	1.22E-03	99.60	SM 3 3 15 1	9.00E-04	99.33
SM 3 3 5 2	1.08E-03	98.85	SM 3 3 15 2	8.12E-04	99.59
SM 3 3 5 3	1.06E-03	98.65	SM 3 3 15 3	8.55E-04	99.06
SM 4 2 5 1	8.29E-04	97.95	SM 4 2 15 1	7.17E-04	99.19
SM 4 2 5 2	8.11E-04	98.08	SM 4 2 15 2	6.57E-04	99.00
SM 4 2 5 3	1.08E-03	98.12	SM 4 2 15 3	5.03E-04	99.58
SM 4 3 5 1	9.69E-04	98.07	SM 4 3 15 1	5.42E-04	99.71
SM 4 3 5 2	7.85E-04	97.26	SM 4 3 15 2	5.85E-04	97.70
SM 4 3 5 3	8.48E-04	97.34	SM 4 3 15 3	5.99E-04	98.69
SM 2 2 10 1	2.19E-03	97.11	SM 2 2 20 1	1.27E-03	98.61
SM 2 2 10 2	1.95E-03	97.44	SM 2 2 20 2	1.25E-03	98.71
SM 2 2 10 3	2.01E-03	97.00	SM 2 2 20 3	1.31E-03	98.68
SM 2 3 10 1	1.48E-03	96.45	SM 2 3 20 1	1.16E-03	97.30
SM 2 3 10 2	1.65E-03	95.73	SM 2 3 20 2	1.16E-03	91.42
SM 2 3 10 3	1.58E-03	95.34	SM 2 3 20 3	1.16E-03	97.43
SM 3 2 10 1	1.37E-03	97.42	SM 3 2 20 1	8.72E-04	98.08
SM 3 2 10 2	1.35E-03	98.06	SM 3 2 20 2	8.72E-04	92.04
SM 3 2 10 3	1.40E-03	98.75	SM 3 2 20 3	6.64E-04	98.43
SM 3 3 10 1	1.22E-03	98.65	SM 3 3 20 1	8.72E-04	97.90
SM 3 3 10 2	1.06E-03	99.03	SM 3 3 20 2	8.72E-04	95.50
SM 3 3 10 3	1.17E-03	98.97	SM 3 3 20 3	6.49E-04	99.42
SM 4 2 10 1	8.65E-04	98.49	SM 4 2 20 1	5.16E-04	99.39
SM 4 2 10 2	1.02E-03	99.18	SM 4 2 20 2	4.67E-04	97.44
SM 4 2 10 3	7.41E-04	99.30	SM 4 2 20 3	5.81E-04	99.59
SM 4 3 10 1	7.10E-04	97.95	SM 4 3 20 1	6.04E-04	99.00
SM 4 3 10 2	8.51E-04	98.94	SM 4 3 20 2	5.10E-04	97.93
SM 4 3 10 3	8.55E-04	99.45	SM 4 3 20 3	4.67E-04	98.32

**Tabla 10.18.9.** Modelo con contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Bíceps femoris*. Cámara de secado.

MUESTRA	CC CRE		MUESTRA	CC CRE	
	k (m/s)	% var		k (m/s)	% var
BF 2 2 5 1	2.55E-03	99.56	BF 2 2 15 1	1.47E-03	94.22
BF 2 2 5 2	2.33E-03	99.37	BF 2 2 15 2	1.55E-03	93.65
BF 2 2 5 3	2.47E-03	98.20	BF 2 2 15 3	1.36E-03	95.20
BF 2 3 5 1	1.89E-03	99.04	BF 2 3 15 1	1.45E-03	95.60
BF 2 3 5 2	1.89E-03	98.96	BF 2 3 15 2	1.33E-03	96.84
BF 2 3 5 3	1.91E-03	99.70	BF 2 3 15 3	1.33E-03	95.12
BF 3 2 5 1	1.49E-03	99.06	BF 3 2 15 1	9.23E-04	98.67
BF 3 2 5 2	1.43E-03	98.17	BF 3 2 15 2	1.09E-03	99.12
BF 3 2 5 3	1.55E-03	99.16	BF 3 2 15 3	9.69E-04	98.61
BF 3 3 5 1	1.53E-03	98.76	BF 3 3 15 1	8.06E-04	99.14
BF 3 3 5 2	1.21E-03	96.17	BF 3 3 15 2	8.28E-04	99.13
BF 3 3 5 3	1.24E-03	97.56	BF 3 3 15 3	7.50E-04	99.44
BF 4 2 5 1	1.23E-03	98.98	BF 4 2 15 1	7.70E-04	99.03
BF 4 2 5 2	1.20E-03	99.12	BF 4 2 15 2	7.56E-04	99.20
BF 4 2 5 3	1.36E-03	99.45	BF 4 2 15 3	7.95E-04	98.95
BF 4 3 5 1	1.32E-03	99.38	BF 4 3 15 1	5.77E-04	98.96
BF 4 3 5 2	1.11E-03	99.07	BF 4 3 15 2	6.26E-04	98.99
BF 4 3 5 3	1.05E-03	98.72	BF 4 3 15 3	7.01E-04	99.30
BF 2 2 10 1	2.86E-03	97.42	BF 2 2 20 1	1.74E-03	97.16
BF 2 2 10 2	2.16E-03	91.99	BF 2 2 20 2	1.74E-03	97.29
BF 2 2 10 3	2.14E-03	93.45	BF 2 2 20 3	1.43E-03	96.31
BF 2 3 10 1	1.77E-03	95.57	BF 2 3 20 1	1.32E-03	98.35
BF 2 3 10 2	2.21E-03	96.13	BF 2 3 20 2	1.28E-03	98.52
BF 2 3 10 3	1.76E-03	94.60	BF 2 3 20 3	1.44E-03	97.04
BF 3 2 10 1	1.26E-03	98.71	BF 3 2 20 1	1.26E-03	98.52
BF 3 2 10 2	1.30E-03	98.36	BF 3 2 20 2	1.01E-03	99.22
BF 3 2 10 3	1.60E-03	98.61	BF 3 2 20 3	9.20E-04	99.02
BF 3 3 10 1	1.28E-03	99.11	BF 3 3 20 1	1.12E-03	98.24
BF 3 3 10 2	1.10E-03	99.11	BF 3 3 20 2	9.54E-04	97.19
BF 3 3 10 3	1.14E-03	98.86	BF 3 3 20 3	8.72E-04	99.50
BF 4 2 10 1	1.23E-03	98.66	BF 4 2 20 1	5.77E-04	99.68
BF 4 2 10 2	1.32E-03	99.18	BF 4 2 20 2	7.19E-04	99.47
BF 4 2 10 3	1.11E-03	99.21	BF 4 2 20 3	9.74E-04	98.03
BF 4 3 10 1	9.20E-04	98.28	BF 4 3 20 1	8.27E-04	99.65
BF 4 3 10 2	9.25E-04	98.41	BF 4 3 20 2	7.11E-04	99.30
BF 4 3 10 3	1.02E-03	99.15	BF 4 3 20 3	5.56E-04	96.29

**Tabla 10.18.10.** Modelo con contracción y con resistencia externa. Geometría cilíndrica finita. *Semimembranosus*. Cámara de secado.

MUESTRA	CC CRE		MUESTRA	CC CRE	
	k (m/s)	% var		k (m/s)	% var
SM 2 2 5 1	1.82E-03	99.03	SM 2 2 15 1	1.33E-03	95.04
SM 2 2 5 2	1.76E-03	97.30	SM 2 2 15 2	1.33E-03	93.49
SM 2 2 5 3	1.59E-03	97.54	SM 2 2 15 3	1.01E-03	97.56
SM 2 3 5 1	1.33E-03	99.46	SM 2 3 15 1	1.10E-03	95.00
SM 2 3 5 2	1.27E-03	99.33	SM 2 3 15 2	1.17E-03	97.06
SM 2 3 5 3	1.48E-03	99.25	SM 2 3 15 3	1.35E-03	98.51
SM 3 2 5 1	1.25E-03	98.98	SM 3 2 15 1	1.04E-03	98.58
SM 3 2 5 2	1.09E-03	99.26	SM 3 2 15 2	9.74E-04	97.01
SM 3 2 5 3	1.02E-03	98.96	SM 3 2 15 3	8.57E-04	98.70
SM 3 3 5 1	1.22E-03	99.60	SM 3 3 15 1	8.96E-04	99.34
SM 3 3 5 2	1.08E-03	98.84	SM 3 3 15 2	8.08E-04	99.60
SM 3 3 5 3	1.05E-03	98.63	SM 3 3 15 3	8.51E-04	99.07
SM 4 2 5 1	8.24E-04	97.94	SM 4 2 15 1	7.14E-04	99.19
SM 4 2 5 2	8.07E-04	98.06	SM 4 2 15 2	6.53E-04	99.00
SM 4 2 5 3	1.07E-03	98.11	SM 4 2 15 3	5.00E-04	99.58
SM 4 3 5 1	9.62E-04	98.06	SM 4 3 15 1	5.38E-04	99.71
SM 4 3 5 2	7.79E-04	97.24	SM 4 3 15 2	5.81E-04	97.68
SM 4 3 5 3	8.43E-04	97.32	SM 4 3 15 3	5.96E-04	98.69
SM 2 2 10 1	2.12E-03	96.86	SM 2 2 20 1	1.27E-03	98.63
SM 2 2 10 2	1.94E-03	97.45	SM 2 2 20 2	1.25E-03	98.73
SM 2 2 10 3	2.00E-03	97.02	SM 2 2 20 3	1.31E-03	98.69
SM 2 3 10 1	1.48E-03	96.47	SM 2 3 20 1	1.16E-03	97.22
SM 2 3 10 2	1.65E-03	95.75	SM 2 3 20 2	1.16E-03	91.26
SM 2 3 10 3	1.58E-03	95.37	SM 2 3 20 3	1.16E-03	97.34
SM 3 2 10 1	1.37E-03	97.44	SM 3 2 20 1	8.72E-04	98.02
SM 3 2 10 2	1.35E-03	98.08	SM 3 2 20 2	8.72E-04	91.82
SM 3 2 10 3	1.40E-03	98.76	SM 3 2 20 3	6.61E-04	98.44
SM 3 3 10 1	1.21E-03	98.66	SM 3 3 20 1	8.72E-04	97.85
SM 3 3 10 2	1.06E-03	99.03	SM 3 3 20 2	8.72E-04	95.39
SM 3 3 10 3	1.16E-03	98.98	SM 3 3 20 3	6.47E-04	99.42
SM 4 2 10 1	8.60E-04	98.50	SM 4 2 20 1	5.14E-04	99.38
SM 4 2 10 2	1.02E-03	99.18	SM 4 2 20 2	4.67E-04	97.24
SM 4 2 10 3	7.36E-04	99.30	SM 4 2 20 3	5.77E-04	99.59
SM 4 3 10 1	7.08E-04	97.95	SM 4 3 20 1	6.01E-04	98.99
SM 4 3 10 2	8.46E-04	98.93	SM 4 3 20 2	5.08E-04	97.91
SM 4 3 10 3	8.51E-04	99.45	SM 4 3 20 3	4.67E-04	98.27

### 10.19. Convección forzada. Proporcionalidad entre k y v

A partir de la Ecuación 5.4.1. se deducirá la proporcionalidad existente entre el coeficiente de transferencia de materia (k) y la velocidad del aire de secado (v).

$$j_D = a' Re^{n'} \quad \text{Ec. 5.4.1.}$$

A partir de la definición de  $j_D$  (Anejo 10.6.) e igualando a la Ecuación 5.4.1, se obtiene la Ecuación 10.19.2.

$$j_D = St * S_c^{2/3} = \frac{Sh}{Re * Sc} S_c^{2/3} = \frac{k * D}{D_{AB} \rho * v * D} \left( \frac{\mu}{\rho * D_{AB}} \right)^{-1/3} \quad \text{Ec. 10.19.1.}$$

$$\frac{k * D}{D_{AB} \rho * v * D} \left( \frac{\mu}{\rho * D_{AB}} \right)^{-1/3} = a' \left( \frac{\rho * v * D}{\mu} \right)^{n'} \quad \text{Ec. 10.19.2.}$$

Reorganizando términos se obtiene la expresión que relaciona el coeficiente de transferencia de materia con la velocidad del aire de secado (Ecuación 10.19.3.).

$$k = \frac{a' \rho^{n'} D^{n'} D_{AB}^{2/3} \rho^{2/3}}{\mu^{n'+2/3}} v^{n'+1} \quad \text{Ec. 10.19.3.}$$

Es decir, el coeficiente de transferencia de materia es proporcional a la velocidad del aire de secado elevada a  $n'+1$ .

$$k \propto v^{n'+1} \quad \text{Ec. 10.19.4.}$$