



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Química
Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado



Maestría en Ingeniería Química

TESIS:

**Transferencia de masa durante el salado en seco y
secado convectivo de camarón**

Que presenta:

Jisel del Rosario Santiago

Que para obtener el grado de:

MAESTRA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor de tesis:

Dr. Irving Israel Ruiz López

Coasesor de tesis:

M.C. Héctor Ruiz Espinosa

H. Puebla de Z. a noviembre de 2016

**Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería
Química**

**Transferencia de masa durante el
salado en seco y secado convectivo de
camarón**

Jisel Del Rosario Santiago

29 de noviembre de 2016

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vi
NOMENCLATURA	ix
INTRODUCCIÓN	1
I ANTECEDENTES	3
1.1 Características generales del camarón	3
1.1.1 Clasificación comercial	5
1.2 Salado en seco	7
1.3 Secado convectivo	10
1.3.1 Factores que intervienen en el proceso de secado	11
1.3.2 Secado de productos del mar	12
1.4 Parámetros de calidad de alimentos durante el proceso de secado . .	13
1.5 Métodos combinados de secado	14
1.6 Mecanismos de transferencia de masa y calor durante el proceso de secado convectivo	16
1.6.1 Transferencia de calor	16
1.6.1.1 Conducción	17

1.6.1.2	Convección	17
1.6.2	Transferencia de masa	19
1.6.3	Transferencia de masa durante el secado aplicado a geometrías no tradicionales	20
II	Objetivos	22
III	MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1	Desarrollo Experimental	24
3.1.1	Pretratamiento de secado	26
3.1.1.1	Ganancia de cloruros	28
3.2	Secado convectivo	30
3.3	Desarrollo teórico	35
3.3.1	Modelo en coordenadas cilindro-elíptico	35
3.3.2	Solución numérica del modelo	41
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
4.1	Caracterización de área y geometría del camarón	47
4.2	Proceso de salado en seco	48
4.2.1	Evolución del contenido de humedad adimensional para las direcciones uv y z	49
4.2.2	Contenido de humedad y pérdida de agua	51
4.2.3	Ganancia de sólidos totales y cloruros	53
4.3	Proceso de secado convectivo	54
4.3.1	Encogimiento durante el proceso de secado convectivo	58
4.4	Proceso combinado de secado de camarón	63

V CONCLUSIONES	66
Bibliografía	68

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Etapas de la velocidad durante el secado convectivo.	11
3.1	Caracterización dimensional del camarón	25
3.2	Análisis de textura de las muestras de camarón rehidratadas	26
3.3	Proceso de salado en seco de camarón.	28
3.4	Medición de ganancia de cloruros a partir de un medidor de sodio (HANNA Instruments).	29
3.5	Proceso de secado convectivo en secador de túnel.	31
3.6	Captura de imágenes. (a) Distancia de la muestra al objetivo, (b) arre- glo de la muestra y el objeto de referencia.	32
3.7	Proceso de análisis de imagen.	33
3.8	Representación de las coordenadas elíptico-cilíndricas. $u \in (0, 1)$ de- fine una serie de elipses confocales centradas en el origen, $v \in (0, 2)$ representa hipérbolas asintóticas simétricas alrededor del eje x y a define los focos de las elipses sobre el eje x	43
3.9	Algoritmo para la estimación de difusividad y condiciones en equili- brio con base a las coordenadas cilindro elípticas	46
4.1	Cambio del área y forma elíptica en dirección longitudinal del camarón	48
4.2	Evolución del contenido de humedad adimensional en dirección an- gular uv para el sistema coordenado cilindro elíptico ($\phi = 0,69$).	49

4.3	Evolución del contenido de humedad adimensional en dirección axial z para el sistema coordenado cilindro elíptico.	50
4.4	Evolución del contenido de humedad adimensional en dirección angular uv para el sistema coordenado cilindro elíptico y cilindro completo	51
4.5	Evolución del contenido de humedad (experimental y ajustado) durante el salado en seco de camarón.	52
4.6	Pérdida de agua (experimental y ajustado) durante el salado en seco de camarón.	53
4.7	Ganancia de sólidos totales y cloruros (experimental y ajustado) durante el salado en seco de camarón.	54
4.8	Proceso de secado convectivo de camarón fresco.	56
4.9	Proceso de secado convectivo en camarón pretratado.	57
4.10	Disminución del contenido de humedad b.s. durante el proceso de secado convectivo de camarón.	58
4.11	Cambio de área con respecto a la fracción de humedad libre.	59
4.12	Cambio de perímetro con respecto a la fracción de humedad libre.	60
4.13	Relación del perímetro y área con respecto a la fracción de humedad libre.	61
4.14	Evolución de la compactabilidad con respecto a la fracción de humedad libre	62
4.15	Evolución de la redondez con respecto a la fracción de humedad libre.	63
4.16	Curvas de rehidratación obtenidas para camarón sin pretratamiento (ST) y pretratado (CT)	65

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Composición química del camarón (Benjakul <i>et al.</i> , 2007).	5
1.2	Clasificación por talla de camarón (NMX-F-559-1999).	7
4.1	Difusividades y nivel de equilibrio alcanzado durante el salado en seco de camarón.	54
4.2	Difusividades obtenidas durante el proceso de secado convectivo de camarón.	58
4.3	Efecto de la aplicación de procesos de secado en el cambio de color y textura de camarón.	65

NOMENCLATURA

β	Coefficiente de expansión térmica (m^3/K)
μ	Viscosidad cinemática (m^2/s)
ϕ	Elipticidad
ψ	concentración adimensional
ρ	Densidad (g/L)
τ	Tiempo adimensional
A	Área de la muestra (cm^2)
A	Área normal a la dirección del flujo de calor (m^2)
a	Foco de la elipse
A_i	Área de la interfaz donde el calor esta siendo transferido (m^2)
A_{mp}	Área de la muestra (pxs^2)
A_{op}	Área del objeto (pxs^2)
b_i	Ancho en pixeles de la imagen de la muestra
Bi_m	Número de Biot másico (adimensional)
C	Concentración de humedad ($\text{kg agua}/\text{Kg solidos secos}$)
Cd	Compactabilidad

D	Difusividad másica (m^2/s)
D_o	Diámetro del objeto (cm)
D_{op}	Diámetro del objeto (pxs)
f_{cc}	Fracción de color del círculo
f_{cm}	Fracción de color de la muestra
G_{NaCl}	Ganancia de cloruro de sodio (g NaCl/g producto)
G_S	Ganancia de sólidos totales (g agua/g de producto)
h	Coefficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$)
H_0	Humedad inicial (g agua/g muestra)
H_t	Humedad a determinado tiempo (g agua/g muestra)
hi	Alto en pixeles de la imagen de la muestra
k	Conductividad térmica (W/mK)
K_{eq}	constante de distribución en equilibrio
L	Longitud característica (m)
M_f	Masa final de la muestra (g)
M_o	Masa inicial de la muestra(g)
M_t	Masa de la muestra en el tiempo(g)
P	Périmetro (cm)

PA	pérdida de agua (g agua/g de producto)
q_x	Caudal de transmisión de calor en la dirección x (W)
Rh	Porcentaje de rehidratación
Rz	Redondez de la muestra
t	Tiempo (s)
T_s	Temperatura del medio (K)
We	Concentración en equilibrio
x	Espesor del alimento (m)
x_i	Coordenadas de la imagen de la muestra (cm)
X_{Na}	Fracción de sodio
X_{NaCl}	Fracción de cloruro de sodio

INTRODUCCIÓN

Los productos del mar son alimentos altamente perecederos y requieren temperaturas bajas para asegurar su conservación; es por ello que se buscan tratamientos que garanticen la disminución de humedad e impidan el crecimiento microbiano para evitar su descomposición; el método más usado es el secado ya que reduce sustancialmente el peso y volumen, minimizando los costos de embalaje, almacenamiento y transporte. Este proceso involucra la transferencia simultanea de calor y masa y está determinado por las propiedades del producto; su representación mediante modelos matemáticos es más fácil y exacta si se aplica en formas definidas como placa plana, cilindro y esfera, debido a esto es poco aplicado en alimentos de forma irregular; además disminuye la calidad de los alimentos afectando propiedades físicas como textura, color y tamaño, reduciendo la calidad sensorial y la aceptación por el consumidor. Avances en la tecnología de procesos de alimentos han demostrado que aplicar un pretratamiento antes del secado mejora en gran medida las características del producto final, obteniendo buenos resultados en la calidad del producto como capacidad de rehidratación, textura y porosidad, así como un menor tiempo de secado y disminución de costos.

En general esta técnica solo es aplicada en frutas y vegetales, debido a un mejor control de la forma del alimento que permite una transferencia de masa uniforme y una predicción fiable de los efectos de la temperatura, tales como deshidratación osmótica o por salmuera, salado en seco, secado al vacío y liofilización; es por ello que en este trabajo se realiza secado convectivo en camarón con pretratamiento de salado en seco (ya que no requiere equipos especiales y es un proceso fácil de adaptar en condiciones de laboratorio) con la finalidad de obtener una mejor descripción de los

procesos de transferencia de masa a su forma irregular haciendo una aproximación a una geometría de cilindro elíptico.

I. ANTECEDENTES

1.1. Características generales del camarón

Los productos del mar han atraído la atención comercial ya que se consideran una fuente importante de nutrientes en la dieta humana, de los cuales el camarón es uno de los productos de mayor consumo, considerado como una excelente fuente de proteínas (Yanar & Celik, 2006). En los últimos años la producción de camarón ha aumentado significativamente y en la actualidad es clasificado como el producto de pesquería de mayor impacto económico en el mundo (García *et al.*, 2014). En México y el resto de Latinoamérica la principal especie criada es el camarón blanco del Pacífico, representando el 95 % de la producción (Barros-Velázquez *et al.*, 2011).

El valor de mercado de los camarones se basa principalmente en la apariencia visual de su cuerpo pero debido a que es altamente perecedero después de la muerte sufre cambios como variación de color y desarrollo de textura blanda, causados por su alto contenido de aminoácidos libres y sustancias solubles no nitrogenadas que sirven como nutrientes para el crecimiento microbiano (Zhang *et al.*, 2015). Por lo tanto, el aspecto del producto y las implicaciones de calidad resultantes juegan un papel significativo en el mantenimiento de una alta aceptación por parte del consumidor.

La principal característica que distingue al camarón es el color y se debe a la presencia de carotenoides que proporcionan la típica pigmentación rojo-naranja y que varía de acuerdo a su hábitat; su principal pigmento es la astaxantina y por lo general se encuentra presente en forma libre, esterificada o unida a algunas macromoléculas como las proteínas. La escisión de este complejo resulta en un marcado

cambio de color debido a la liberación de carotenoides (Parjikolaei *et al.*, 2015); es por eso que es una de las propiedades físicas más afectadas durante su procesamiento o almacenamiento debido a que el método más usual para su transporte y conservación es la congelación.

La congelación reduce los niveles de microorganismos patógenos (tales como *Staphylococcus aureus*, *Vibrio spp.* y *Pseudomonas fragi*) y controlan la degradación enzimática (den Besten *et al.*, 2015) y en consecuencia el alto contenido de humedad del camarón que oscila entre el 77.21 y 80.47% base húmeda. El proceso de congelación debe ser rápido permitiendo formar cristales esféricos, transparentes y de tamaño muy pequeño de forma que se produzcan un mayor número de cristales tanto intra como extracelulares, permitiendo una menor transferencia del agua desde el interior hasta el exterior de la célula disminuyendo la desnaturalización de la proteína y daños físicos celulares, así como una mayor capacidad de retención de agua en el tejido obteniendo una textura más parecida a la existente antes del proceso de congelación; por el contrario el proceso de descongelación debe de ser lento ya que dará tiempo para que ocurra la reabsorción de agua hacia el interior de la célula, reduciéndose la sinéresis y daño en el tejido (Méndez & Briceño, 2006). En el caso del camarón se suele agregar el 15.05% de agua de mar con la finalidad de disminuir la deshidratación durante su almacenamiento, evitando que el agua pueda sublimar a la superficie de los camarones y cristalizar dentro del empaque dando lugar a la formación de escarcha (Bertelsen *et al.*, 1999).

El consumo del camarón, al igual que otros crustáceos, aporta aminoácidos, péptidos, proteínas y otros nutrientes útiles (Benjakul *et al.*, 2007). El músculo del camarón contiene ácidos grasos altamente insaturados (HUFA), tales como eicosa-pentaenoico (20:5n3, EPA) y docosahexaenoico (22:6n3, DHA) los cuales son ácidos

esenciales (Gonzalez-Félix *et al.*, 2002); la carne de camarón es también una buena fuente de minerales como el calcio (Yanar & Celik, 2006); sin embargo, aunque es muy nutritivo debido a sus grandes cantidades de proteínas y minerales (Tabla 1.1), con frecuencia se rechaza como alimento por su alto contenido de colesterol, cuya concentración es por lo general mayor a 100 mg/100 g en camarón crudo (Benjakul & Nirmal, 2009).

Tabla 1.1. Composición química del camarón (Benjakul *et al.*, 2007).

Humedad (g/100g)	77.21
Proteína Cruda (mg/100g)	18.8
Extracto etéreo (mg/100g)	1.30
Carbohidratos (mg/100g)	1.5
Calorías (kcal/100g)	91
Minerales (mg/100g)	
Calcio	24.7
Fósforo	230
Hierro	1.22
Zinc	1.47
Vitaminas (mg/100g)	
Tiamina	0.04
Niacina	3.20
Riboflavina	0.03
Colesterol	128.0
Ácidos grasos (g/100g)	
Palmítico	21.8
Linoleico	15.6
Eicosapentaenoico	9.46
Docosohexaenoico	9.99

1.1.1. Clasificación comercial

Existe una gran variedad de tipos y tamaños de crustáceos; de ellos el camarón congelado representa un segmento específico de preparación para su venta, ya que su tamaño fluctúa desde unos cuantos milímetros hasta los 35 cm, encontrándose

tanto en aguas saladas como dulces.

Entre las principales variedades comerciales se encuentran (SAGARPA, 2009):

- Camarón fresco con cáscara (sin cabeza).
- Camarón cocido y pelado (sin cabeza).
- Camarón congelado con y sin cabeza.

En cambio, las denominaciones comerciales más comunes son:

- Camarón Botalón.
- Camarón Macuil.
- Camarón Roca.
- Camarón Pacotilla (pacotilla y coctel son denominaciones en base a la talla, las demás en base a especies tipos de camarón).
- Camarón Coctel (SAGARPA, 2009).

Para hablar de los diferentes tamaños de camarones es necesario conocer los códigos bajo los cuales se han clasificado. Uno de ellos radica en una terminología alfanumérica en la que se utiliza la U como prefijo a un número; esta medida se creó para contabilizar el número de los camarones que se venden por libra o por kilo. Existen otras mediciones para determinar la cantidad de camarones que se encuentran en una libra como se observa en la Tabla 1.2; por ejemplo, 16/20 significa de 16 a 20 camarones por libra; otra manera para determinar las tallas de los camarones es a través de un nombre genérico como jumbo, gigante, grande, mediano o pacotilla.

El conteo es diferente cuando se aplica a camarón pelado o cocido, por lo que el término "conteo final" se refiere al número real de camarón pelado por libra en el paquete. La clasificación "pelado de" se refiere al conteo de camarón por libra antes de ser pelado.

Tabla 1.2. Clasificación por talla de camarón (NMX-F-559-1999).

Talla	Definición (pza/lb)
Grande	
U-10	10
U-12	11-12
U-15	13-15
16/20	16-20
Mediano	
21-25	21-25
26-30	26-30
31-35	31-35
36-40	36-40
Chico	
41-50	41-50
51-60	51-60
61-70	61-70
71-80	71-80
80 o más	80 o más

1.2. Salado en seco

La salazón es una de las técnicas más antiguas conocidas por el hombre para la preservación y el aumento de la vida de anaquel en productos marinos, sobre todo en pescado, y estaba en uso mucho antes de otros procesos como el ahumado, el secado, el enlatado, marinado, etc. Este proceso puede realizarse en húmedo, seco o una combinación de ambos (Sobukola & Olatunde, 2011); el salado en seco consiste en alternar capas de sal y carne o pescado evitando el contacto directo entre

el alimento, de tal forma que el agua que constituye al producto y la sal crean una solución sobresaturada de NaCl que actúa como motor para la difusión de la sal al interior de la masa muscular del alimento (Guerrero *et al.*, 2009). Actualmente, el proceso de salado en seco es considerado como un tratamiento osmótico que pretende dar características sensoriales y organolépticas específicas al producto, en lugar del propósito de conservación. El control del proceso de salado en seco en productos del mar es esencial ya que los principales factores que afectan a la transferencia de masa durante el salado son la concentración de sal y la temperatura. Para el caso particular del pescado también se ve afectada la difusión de agua y sal en el interior por el contenido de grasa, la especie, la frescura y el estado de rigor mortis (Boudhrioua *et al.*, 2009).

El objetivo del tratamiento con sal seca es la disminución de la actividad de agua, para ello la concentración de sal debe ser mayor del 10% para asegurar un retraso en el crecimiento microbiano. Uno de los principales cambios bioquímicos que se llevan a cabo durante la elaboración de este proceso es la degradación de la fracción de proteína como consecuencia de los cambios que ocurren en las proteínas sarcoplásmicas y miofibrilares, debido a la intensa acción de las proteasas musculares. La intensa degradación de proteínas que se produce durante el proceso contribuye no sólo a los cambios en la textura del producto final sino también al desarrollo de su aroma y sabor (Chabbouh *et al.*, 2012).

En general los productos del mar son muy nutritivos, suelen ser excepcionalmente ricos en ácidos grasos, en especial ácidos grasos insaturados omega 3 y minerales como el yodo, cinc, fósforo y selenio lo que los convierte en alimentos de alto valor comercial, pero su alto contenido de humedad los hace productos perecederos requiriendo más gastos energéticos para su conservación que cualquier otro tipo de

carne, es por eso que se han realizado estudios para mejorar la aplicación del salado en seco como método de conservación. Gudjónsdóttir *et al.* (2011) estudiaron los efectos de la aplicación de salmuera y salado en seco como pretratamiento en filetes de bacalao observando, mediante resonancia magnética nuclear, que la desnaturación de las proteínas es menor en la aplicación de salado en seco y presenta un menor daño en las células después de la rehidratación debido a que el uso de salmuera requiere de altas temperaturas para obtener una mejor impregnación de sal. Finalmente en el análisis de resultados concluyeron que se obtiene el mismo contenido de sal y de coeficientes de difusividad independientemente del método usado.

Bellagha *et al.* (2007) se propusieron mejorar la calidad del pescado seco realizando un análisis de la aplicación de salado en seco y salado en húmedo al 21 % como pretratamiento de secado. Con el uso de salmuera se obtiene una mejor apariencia y textura, así como una velocidad de secado constante, mientras que con el salado en seco la velocidad varía debido a la formación de una costra de sal en la superficie del producto, pero ofrece ventajas ya que se realiza en menos tiempo y el análisis microbiológico comprobó que ofrece una mejor inhibición del crecimiento microbiano. Por otra parte, da Silva Pena *et al.* (2015) observaron que el aumento de contenido de sal en el filete de arapaima (hasta de 40 g NaCl/100g sólidos secos) favoreció la difusión de humedad durante el proceso de secado por convección a 50°C. Las isotermas de sorción se modelaron mediante las ecuaciones de Hasley y GAB prediciendo eficientemente los datos experimentales.

1.3. Secado convectivo

El secado es un fenómeno que implica procesos de transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa, depende de la aplicación de calor para vaporizar agua o los constituyentes volátiles, requiriendo el control de variables tales como la velocidad del aire caliente. El secado está influenciado por dos factores importantes: el aire de secado y las características del producto (composición, contenido de humedad, tamaño, etc.); dicha información está dada por las curvas de actividad de agua y la cinética de secado (Roberti, 2001).

En general, el proceso de secado por convección se puede dividir en tres etapas principales (Figura 1.1)(Delgado & de Lima, 2014):

1. Primero, el material húmedo (alimento) debe ser calentado hasta la temperatura de secado, este es un procedimiento muy rápido y, en la mayoría de las veces, no se detecta en las curvas de secado, por lo que se puede despreciar. En este período la velocidad de secado es esencialmente cero y por lo tanto el contenido de humedad se mantiene casi constante e igual al contenido de humedad inicial.
2. En segundo lugar, se produce el transporte de agua presente en los macro y micro poros del material a la superficie y su posterior evaporación; en esta etapa la velocidad de secado es constante, lo que significa que el contenido de humedad disminuye linealmente con el tiempo de secado.
3. Por último, la velocidad de secado comienza a disminuir hasta que se alcanza el valor final; para la gran mayoría de los alimentos, este es el período más importante del proceso de secado, ya que definirá el contenido final de humedad del producto seco .

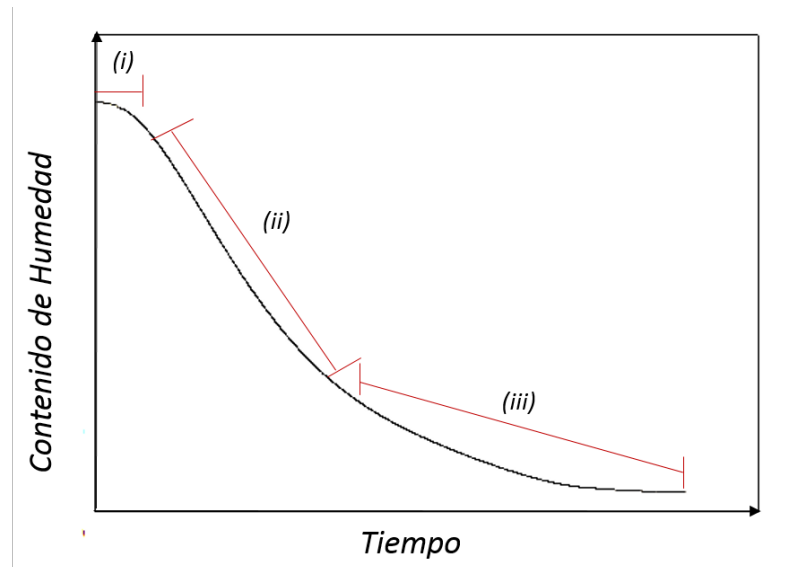


Figura 1.1. Etapas de la velocidad durante el secado convectivo.

1.3.1. Factores que intervienen en el proceso de secado

- Temperatura del aire. Con el objeto de mantener un producto uniforme es necesario tener un control de la temperatura del aire. Esta se selecciona con base a las características del alimento, a mayor temperatura del aire de secado mayor capacidad tendrá para eliminar el agua del producto, pero si el producto es termosensible se puede dañar su estructura (Maupoey *et al.*, 2001).
- Velocidad del aire. Las velocidad de secado se limita no sólo por razones biológicas y microbiológicas, sino también por la posibilidad de ennegrecimiento, deformación y hendiduras causadas por tensiones producto del encogimiento de los alimentos. Durante la etapa inicial del secado, la superficie del producto sólido se comporta como si se tratara de una superficie saturada, esta etapa se denomina como periodo de velocidad constante y está en función de la velocidad del aire, la humedad inicial, la temperatura de bulbo húmedo, el área y

forma de las muestras (Pinto & Tobinaga, 2007).

- Humedad relativa. La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, se expresa en porcentaje, a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa (Perry, 1994).

1.3.2. Secado de productos del mar

Los filetes de pescado presentan una gran variación en el volumen durante el secado, debido a su alto contenido de humedad, es por eso que Pinto & Tobinaga (2007) estudiaron el secado de rebanadas de pescado con forma de placa plana usando condiciones constantes del aire en tres niveles de temperatura. Para la modelación del proceso de secado se utilizó un modelo de difusión considerando el cambio de volumen en una sola dimensión. Se determinó el coeficiente de contracción lineal considerando una correlación lineal entre el espesor del material y su contenido de humedad. Como resultado se obtuvo una ecuación diferencial no lineal que fue resuelta numéricamente mediante la técnica de diferencias finitas.

Una de las desventajas del secado convectivo es el uso de altas temperaturas que pueden dañar la calidad sensorial del alimento pero además puede disminuir su valor nutricional. Zhao *et al.* (2015) estudiaron el efecto de diferentes métodos de secado en la desnaturalización de la miocina en filetes de calamar, mostrando que el secado a altas temperaturas disminuye el total de compuestos volátiles y en comparación con el secado por liofilización se obtiene una menor calidad en el producto final. Por otra parte Jain (2006) determinó que los coeficientes de transferencia de calor y masa por convección en pescado son función de la eliminación de humedad y

varían significativamente de acuerdo al tipo de pescado esto debido a la porosidad, forma, tamaño y contenido de humedad inicial.

Otros autores como Kituu *et al.* (2010) desarrollaron un modelo matemático para predecir las temperaturas adecuadas para el proceso de secado de pescado Tilapia en un secador de túnel y con ello tener un control de las condiciones óptimas a las que se obtiene un producto seco de mejor calidad, los resultados de ajuste del modelo fueron eficientes con un $R^2=0.961$.

1.4. Parámetros de calidad de alimentos durante el proceso de secado

Numerosos parámetros de calidad se pueden definir para los alimentos secos. No todos son aplicables para un producto determinado o para una aplicación dada, en general estos parámetros pueden ser categorizados como térmicos, estructurales, ópticos, sensoriales, de textura, biológicos y microbiológicos, así como de apariencia (Baker, 1997).

La rehidratación es el proceso de humectación de un material seco. En la mayoría de los casos, los alimentos secos se sumergen en agua antes de la cocción o el consumo, por lo tanto la rehidratación es uno de los criterios de calidad más importantes. La propiedad de un producto para deshidratarse y subsecuentemente ser reconstituido con agua depende entre otras cosas de la formación de una estructura porosa, libre de barreras impermeables que provocan cambios de textura, tamaño y deformación (Devahastin *et al.*, 2008a), sin embargo en la mayoría de los casos la rehidratación no es un proceso reversible a la deshidratación (Lewicki, 1998).

La textura como uno de los principales atributos de un alimento seco afecta di-

rectamente a varios indicadores importantes de la calidad, tales como su sensación en la boca, la digestión gástrica, la absorción de humedad, vida útil y la capacidad de transporte. La funcionalidad, comercialización y la aceptabilidad de los alimentos procesados pueden ser influenciados por la textura física (Hosseinpour *et al.*, 2014). La textura de productos secos está influenciada por su contenido de humedad, composición, pH y madurez del producto. En el caso de las frutas y verduras la textura está influenciada por los cambios químicos como son la cristalización de la celulosa, la degradación de la pectina, y gelatinización del almidón. En productos cárnicos por los cambios como la agregación y desnaturalización de proteínas así como la pérdida de la capacidad de retención de agua conducen a un endurecimiento del tejido muscular. El método del proceso de secado y las condiciones también influyen en la textura de los productos secos (Krokida *et al.*, 2001).

Los cambios en el sabor y aroma de los productos deshidratados se deben fundamentalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso así como al desarrollo de sabores y aromas típicos de productos cocidos provocados por las altas temperaturas (Maupoey *et al.*, 2001).

1.5. Métodos combinados de secado

Los cambios físicos en la estructura del alimento tales como el endurecimiento, la formación de poros, la rehidratación y la pegajosidad pueden influir en la calidad final del producto seco. El secado por aire caliente usualmente destruye la estructura celular tomando más tiempo para la deshidratación, mientras que el estado sólido del agua durante la liofilización protege la estructura primaria y forma de los productos manteniendo las células casi intactas con productos finales de alta porosidad

por lo tanto, se utilizan los pre-tratamientos aplicados a los alimentos antes del secado así como las condiciones óptimas para crear una estructura más porosa con el fin de facilitar una mejor transferencia de masa, manteniendo los gradientes de humedad en el sólido, reduciendo el grado de formación de la corteza y de esta forma acelerando el proceso de secado (Sagar & Suresh, 2010).

Debido a que los procesos de secado presentan inconvenientes en las propiedades finales del producto y a que otras técnicas de mejores resultados como la liofilización son de alto costo y sólo se utilizan para productos de alto valor agregado, se han estudiado nuevas técnicas que involucran dos o más procesos combinados (Donsí *et al.*, 2001).

La combinación de deshidratación osmótica y el secado solar ha sido aplicada en el secado de frutas tropicales obteniendo buena calidad y costos reducidos, estudiando los efectos de los tratamientos térmicos cortos en papaya a partir de un escaldado en solución concentrada de sacarosa o deshidratación osmótica en solución y una combinación con el secado solar, observando aumentos significativos en materia seca y un mayor rendimiento de producción, así como una reducción de energía necesaria para el secado (Hui *et al.*, 2008).

Jaturonglumlert & Kiatsiriroat (2010) estudiaron el secado de cáscara de fruta mediante la combinación de secado convectivo e infrarrojo lejano obteniendo una transferencia de masa más alta y un menor tiempo de secado debido a los mayores coeficientes de transferencia calor y de masa en comparación con el secado con aire caliente.

Debido a que la operación de secado es uno de los pasos críticos en la preparación de arroz instantáneo, los métodos y condiciones de secado juegan un papel importante en el logro de la calidad deseada. Zhengyu *et al.* (2014) sometieron arroz

instantáneo al secado convectivo de aire caliente (70, 80 y 90°C) y por microondas (210, 300 y 560W) como métodos individuales y combinados; mostrando que el secado con aire caliente combinado con las microondas disminuyó el tiempo de secado requerido en comparación con la aplicación de un sólo método. La combinación de los procesos de secado dio como resultado un producto rehidratado con una calidad óptima dentro de la gama de condiciones experimentales estudiadas.

Esta innovación de proceso de secado combinado se ha aplicado a productos del mar. Vega-Gálvez *et al.* (2009) aplicaron la deshidratación osmótica mediante una solución saturada de sal, como pretratamiento seguido por un secado convectivo a diferentes temperaturas en rebanadas de calamar, obteniendo resultados de disminución en la capacidad de rehidratación, pero una mayor calidad en la textura y color.

1.6. Mecanismos de transferencia de masa y calor durante el proceso de secado convectivo

Modelar el proceso de secado presenta una gran ventaja para identificar las causas de una disminución en la calidad del producto final además de que proporciona un enfoque a la solución de estos problemas. En el caso del secado convectivo ocurren dos mecanismos simultáneos, transferencia de masa y calor.

1.6.1. Transferencia de calor

El análisis de transferencia de calor tiene por objeto determinar la cantidad de energía térmica que puede intercambiarse bajo condiciones específicas y qué tan rápido ocurrirá el cambio.

La transferencia de calor se describe como el intercambio de energía entre los materiales como consecuencia de una diferencia de temperatura. El calor se transmite por tres mecanismos físicos diferentes: conducción, convección y radiación (Roselli & Diller, 2011).

1.6.1.1. Conducción

La conducción se refiere a la transmisión de calor desde la parte más caliente a la más fría de un cuerpo por contacto molecular directo. En estado estacionario el caudal de transmisión de calor depende de la naturaleza del material y de las diferencias de temperatura, y se expresa por la ley de Fourier mostrada en la Ecuación (1.1) (Levenspiel, 2014):

$$q_x = -kA \frac{dt}{dx} \quad (1.1)$$

En la transferencia de calor por conducción una sustancia se considera homogénea si su conductividad térmica no varía de un punto a otro dentro de la sustancia, de lo contrario la sustancia se considera heterogénea.

Una sustancia se considera isotrópica con respecto a la conducción de calor cuando su conductividad térmica es la misma en todas las direcciones. Si no es el caso, la sustancia es anisotrópica (Massoud, 2005).

1.6.1.2. Convección

El modo de transferencia de calor por convección en realidad consiste en dos mecanismos que operan de manera simultánea. El primero es la transferencia de

energía generada por el movimiento molecular, es decir, el modo conductivo. Superpuesta a este, se encuentra la transferencia de energía por el movimiento macroscópico de un fluido, es decir, consiste en una gran cantidad de moléculas que se mueven por la acción de una fuerza externa (Kreith *et al.*, 2012); la transferencia de calor convectiva describe el intercambio de calor asociado con el movimiento relativo entre un fluido y un sólido. El fluido puede encontrarse ya sea en fase gaseosa o líquida (Roselli & Diller, 2011).

La transferencia de calor por convección se evalúa como la tasa de intercambio de calor en la interfaz entre el fluido y el sólido y se expresa a partir de la ley de enfriamiento de Newton de acuerdo a la Ecuación (1.2), que establece que la tasa de calor a la que un objeto se enfría (o calienta) es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y el medio que lo rodea.

$$q = hA_i(T_m - T_s) = hA_i\Delta T \quad (1.2)$$

Convección natural. La convección natural depende de los cambios de gravedad, densidad y viscosidad asociados con las diferencias de temperatura en el fluido para inducir corrientes convectivas. El grado de agitación producida por las corrientes convectivas depende del gradiente de temperatura entre el fluido y la superficie del sólido (Toledo, 2007).

Los fluidos de movimiento lento que pasan por las superficies calientes presentan un valor de h mayor del esperado. Esto es debido a la convección natural. Las variables particulares que caracterizan la convección natural se combinan en el grupo adimensional (1.3), denominado número de Grashof (Levenspiel, 2014).

$$Gr = \frac{L^3 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (1.3)$$

Convección forzada La convección forzada se produce cuando la materia es obligada a moverse de un lugar a otro por medios mecánicos . Solo se produce en líquidos y gases donde los átomos y moléculas son libres de moverse en el medio.

1.6.2. Transferencia de masa

Uno de los parámetros más importantes requeridos en la modelación del secado es la transferencia de masa, que implica la migración de un constituyente líquido o un componente de una mezcla dentro o fuera de un producto alimenticio. La transferencia de masa es controlada por la difusión del componente dentro de la mezcla. La migración masiva se produce debido a cambios en el equilibrio físico del sistema causados por las diferencias de concentración o presión de vapor. La transferencia de masa puede ocurrir dentro de una fase o puede implicar la transferencia de una fase a otra (Clark *et al.*, 2014).

Un parámetro que combina todos los mecanismos internos de transferencia de masa es la difusividad efectiva. Este valor se determina a partir de las curvas de secado ajustando estos valores a la ecuación de difusión en estado no estacionario o segunda ley de Fick la cual se describe en la Ecuación (1.4) (Alzate, 2003).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot [D \nabla (C)] \quad (1.4)$$

La segunda ley de Fick describe la transferencia de masa en estado no estacio-

nario para la difusión de humedad dentro de un material homogéneo e isotrópico, donde un mecanismo de convección es generalmente usado para expresar la transferencia de masa de la superficie del producto hacia el aire y está determinado por la Ecuación (1.5). En esta ecuación el calor transferido por conducción al interior del alimento es expresado por la diferencia entre el calor transferido por convección y el calor requerido para que el agua cambie de fase (Ruiz-López *et al.*, 2004).

$$-D\nabla(C_i) = h_m(w_i - w_\infty) \quad (1.5)$$

1.6.3. Transferencia de masa durante el secado aplicado a geometrías no tradicionales

Los modelos matemáticos de transferencia de masa tienen como propósito representar el comportamiento de las variables del proceso de secado bajo diferentes condiciones de operación, de tal manera que la forma geométrica del alimento influye para una mejor aproximación a lo esperado en la parte experimental.

Dentro de las formas geométricas irregulares que se pueden encontrar en los alimentos se encuentran el cilindro elíptico, esferoide achatado y alargado, siendo este último el más común.

Se han realizado trabajos como el descrito por Giner *et al.* (2002) quienes desarrollaron un modelo matemático para estimar los coeficientes de difusión durante el secado de granos a diferentes temperaturas, realizando una aproximación a un sistema elipsoide y obteniendo mejores resultados que los reportados para una esfera. Igualmente Markowski *et al.* (2010) utilizaron las mismas geometrías para estimar las propiedades de transporte de masa durante el secado de cebada en un secador

de lecho fluidizado, obteniendo un coeficiente de difusión de $1,39 \times 10^{-10} m^2/s$ para el modelo elipsoide y $5,31 \times 10^{-10} m^2/s$ para el modelo esférico.

Hii *et al.* (2013) investigaron la cinética de secado de los granos de cacao analizando la transferencia de calor y masa en un simulador 3D para incorporar modelos que incluyeran el encogimiento en su forma esferoide.

García-Alvarado *et al.* (2008) propusieron un modelo en 3D para describir los perfiles de temperatura y humedad en el interior del grano de café verde durante el proceso de secado, utilizando las coordenadas de un esferoide alargado, obteniendo una buena aproximación a los valores experimentales. También, de Lima *et al.* (2002) usaron la misma geometría para describir el efecto del secado por aire a diferentes condiciones en la piel del plátano, asumiendo que el esferoide alargado se aproxima más a la forma de esta fruta, de esta forma determinaron el coeficiente de encogimiento y la distribución del contenido de humedad, concluyendo que el modelo es preciso y eficaz para detectar problemas de difusión tales como calentamiento, enfriamiento y secado en sólidos esferoidales.

Por otra parte, Sahin & Dincer (2005) realizaron una recopilación de parámetros de secados experimentales disponibles en la literatura para productos de forma irregular y los aproximaron a modelos en dos y tres dimensiones con formas cilindro elíptico y elipsoide comparando su precisión con una placa plana infinita.

II. Objetivos

Objetivo general

Estudiar la transferencia de masa durante los procesos de secado combinado de camarón usando un modelo general basado en el sistema coordenado cilindro elíptico.

Objetivos particulares

- Formular un modelo de transferencia de masa para el proceso de secado convectivo de camarón.
- Analizar el comportamiento de las variables de proceso durante el secado convectivo (humedad, encogimiento y deformación) y el salado en seco (pérdida de agua y ganancia de sólidos) del producto seleccionado bajo diferentes condiciones de operación.
- Estimar las propiedades de transporte de masa del producto propuesto bajo diferentes consideraciones de solución del modelo.

Hipótesis

El uso del salado en seco como pretratamiento de secado mejorará las características del producto final y disminuirá el tiempo de secado por convección con aire caliente, además el modelo basado en el sistema coordenado cilindro-elíptico será

idóneo para representar la transferencia de calor y de masa del camarón en comparación con geometrías derivadas de otros sistemas coordenados.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Desarrollo Experimental

El trabajo experimental fue realizado en dos etapas, una para pretratamiento de secado y otra para el proceso de secado convectivo. Se utilizó camarón de pacotilla comercial, congelado y cocido (clasificación 36/40). Para su procesamiento se descongeló en refrigeración por un periodo de 24 horas. Se midió el contenido de humedad inicial mediante estufa a 80 °C hasta obtener peso constante para 5 muestras de camarón por medio del método de la AOAC. Se determinaron propiedades físicas tales como color, tamaño y textura, así como una prueba de rehidratación.

El color se determinó mediante un colorímetro ColorFlex (Hunter lab) utilizando los parámetros L^* , a^* y b^* del espacio de color CIELAB, donde L^* muestra el grado de luminosidad (donde 0 es negro y 100 es blanco), a^* representa la tonalidad de rojo a verde (los valores positivos son rojos, los valores negativos son verdes y 0 es neutro) y b^* la tonalidad de azul a amarillo (los valores positivos son azules, los negativos son amarillos y 0 es neutro). Esta propiedad se midió para una muestra blanco de camarón sin tratar y al final del proceso combinado de secado, las pruebas fueron realizadas por triplicado. El cambio neto de color fue determinado mediante la Ecuación (3.1).

$$\Delta E = \left[\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} \right] \quad (3.1)$$

Las mediciones de tamaño del camarón se hicieron con un vernier analógico, di-

vidiendo el camarón en tres secciones y registrando el diámetro mayor y menor para cada sección, así como el largo correspondiente a la sección, como se muestra en la Figura 3.1.

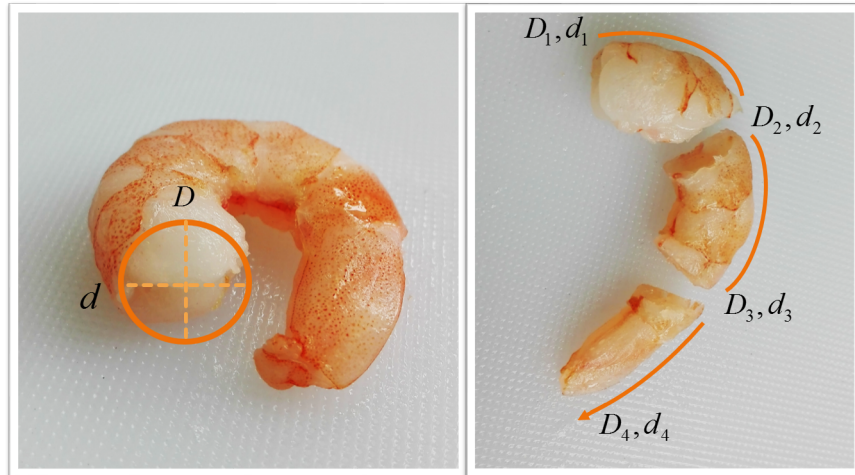


Figura 3.1. Caracterización dimensional del camarón

Las propiedad de textura de las muestras fue evaluada mediante una prueba de punción con un texturómetro modelo TA-XT_PLUS utilizando una sonda TA-212 de 3 mm a una velocidad de 1 mm/s tomando el esfuerzo máximo en (N/mm^2) para cada muestra (Figura 3.2), este análisis se realizó para una muestra sin tratar y para muestras tratadas después del proceso de rehidratación con la finalidad de validar la mejora de las características del producto mediante la aplicación de procesos combinados de secado.

Debido a que el camarón tiene un alto contenido de humedad, las muestras secas fueron rehidratadas por inmersión en agua caliente a 94°C por 10 minutos, registrando su peso y tamaño antes y después de la inmersión. El grado de rehidratación (%Rh) se expresa mediante la diferencia de tamaño y peso de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\%Rh = \frac{D_i - D_f}{D_i} \times 100 \quad (3.2)$$



Figura 3.2. Análisis de textura de las muestras de camarón rehidratadas

3.1.1. Pretratamiento de secado

Se usaron muestras de 5 camarones previamente descongelados a 4°C por 24 horas, se drenaron y se retiró el exceso de humedad, se registró el peso inicial de cada camarón mediante una balanza analítica y se colocaron en un cama de sal de mar comercial de aproximadamente 1 cm de espesor (Figura 3.3) y se cubrieron con otra parte de sal de 1 cm, cada media hora se retiraron del medio, se limpiaron para re-

tirar el exceso sal y se monitoreo la pérdida de peso, incorporándolos nuevamente al medio. Se dejaron muestras desde 1 a 7 horas en incrementos de 1 hora, una vez finalizado el periodo de tiempo correspondiente, se retiró el exceso de sal mediante un enjuague rápido en agua, secando con papel absorbente y se monitoreo su peso final. A las muestras obtenidas se les determino el contenido de humedad mediante el método de la AOAC. Los datos obtenidos fueron analizados para determinar contenido de humedad, ganancia de sólidos y pérdida de agua.

$$H = \frac{M_0 - M_f}{M_0} \quad (3.3)$$

$$PA = \frac{M_0 H_0 - M_t H_t}{M_0} \quad (3.4)$$

$$GS = \frac{M_t (1 - H_t) - M_0 (1 - H_0)}{M_0} \quad (3.5)$$



Figura 3.3. Proceso de salado en seco de camarón.

3.1.1.1. Ganancia de cloruros

Para determinar la ganancia de cloruros se utilizaron las muestras secas obtenidas del salado en seco para cada tiempo (1-7 h). Cada muestra fue triturada en un mortero hasta obtener partículas de tamaño homogéneo, de las cuales se tomaron 10 g y se agregaron 100 ml de agua desionizada. Las muestras se llevaron a una parrilla a 50°C por 20 minutos manteniendo agitación constante, una vez transcurrido este tiempo, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y se filtraron.

Se tomaron 50 ml de la solución obtenida y por medio de un medidor de sodio (HANNA Instruments modelo HI 931101) y el factor de conversión, se obtuvo la fracción y ganancia de NaCl por gramos de producto fresco (Figura 3.4).

$$x_{Na} = x_{NaCl} \left(\frac{23}{54,4} \right) \quad (3.6)$$

$$X_{NaCl} = (1 - H_t) x_{NaCl,t} \quad (3.7)$$

$$GN_{aCl} = \frac{X_{NaCl,t}M_t - X_{NaCl,t}M_0}{M_0} \quad (3.8)$$



Figura 3.4. Medición de ganancia de cloruros a partir de un medidor de sodio (HANNA Instruments).

3.2. Secado convectivo

El proceso de secado se realizó en un secador de túnel convectivo a una velocidad de 2, se colocaron muestras de 130 g de camarón sin tratar y camarón pretratado mediante el salado en seco, estos fueron sometidos a temperaturas de 70, 80 y 90°C, su peso se registró por periodos de 1 min para las primeras cinco lecturas, seguido por 5, 10, 20 y 30 min para cada 5 lecturas, debido a que la pérdida de agua es más rápida al inicio y conforme pasa el tiempo, la velocidad de secado empieza a disminuir (Figura 3.5).

A partir de las cinéticas obtenidas se determinaron los tiempos en los que la muestra tiene una fracción de humedad libre de 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3, 0.1 y 0. El proceso se aplica nuevamente interrumpiéndolo en los tiempos establecidos para cada fracción de humedad libre (es decir si la muestra alcanza 0.9 de humedad libre a los 3 min del proceso en ese momento es retirada y así sucesivamente para las otras concentraciones), la muestras se miden nuevamente de acuerdo a la Figura 3.1 y se toman fotografías para cada sección junto a un objeto de referencia, las imágenes fueron digitalizadas para obtener el promedio de encogimiento y deformación. Los resultados obtenidos son analizados y se ajusta el modelo propuesto a los datos experimentales.

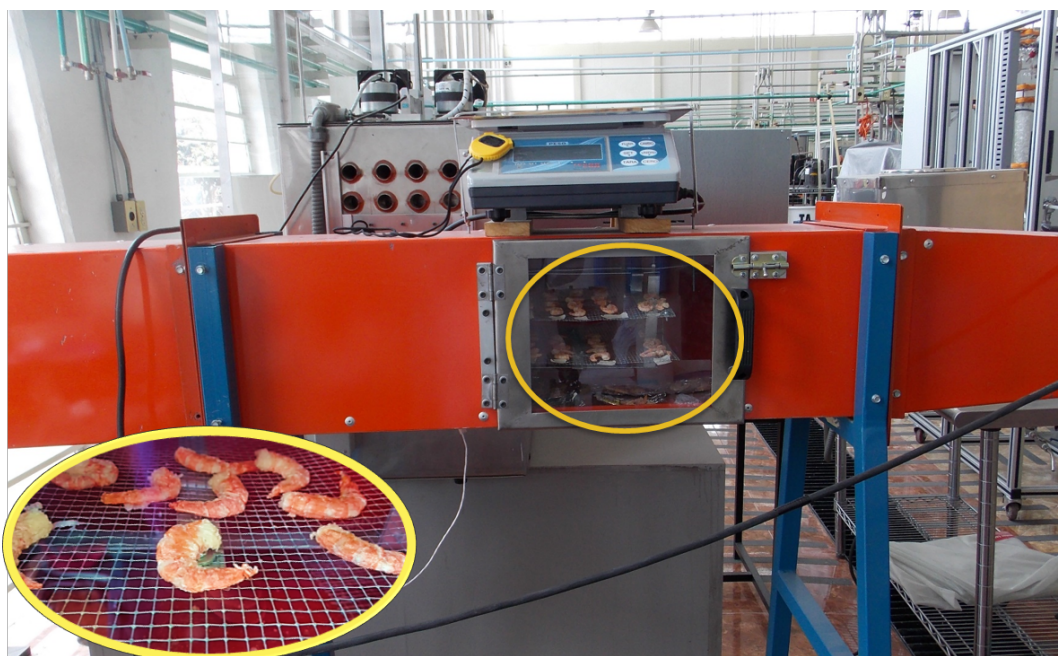


Figura 3.5. Proceso de secado convectivo en secador de túnel.

- El análisis de imagen se realizó mediante la toma de fotografías con una cámara Nikon COOPLIX L810; las muestras se colocaron al lado de un objeto de referencia (arandela de 3.7cm de diámetro) sobre un fondo color azul para tener un contraste de imagen a una distancia de 25 cm del objetivo como se muestra en la Figura 3.6, la resolución de las imágenes fue de 4608×3456 píxeles. Mediante el uso del programa Matlab se realizó el análisis de imagen de acuerdo a los siguientes pasos:
 1. Mediante el programa Paint se mide el diámetro del objeto en píxeles y se divide la fotografía en la parte de la muestra (se registra el ancho y alto de la imagen) y otra del objeto de referencia.

2. La imagen de la muestra se reduce a sus tres colores principales. En este caso se obtuvieron dos colores para el fondo y uno para la muestra, de esta manera se determina la fracción de color correspondiente a la muestra.
3. Mediante la herramienta cuentagotas de Paint se obtiene el color de la muestra mediante la mezcla por adición de los tres colores de luz primarios (modelo RGB) obteniendo un valor para cada color (rojo, verde y azul).
4. A través de los datos de RGB se mantiene la imagen de la muestra y se retira el fondo quedando en blanco (para determinar redondez, se dibuja un círculo alrededor de la muestra y se rellena de azul, se repite el paso 2 para determinar la fracción de color correspondiente al círculo); posteriormente se pasa a escala de grises.
5. Finalmente se determina el contorno de la imagen definiendo las coordenadas de los píxeles por los que está conformada, este proceso se puede observar en la Figura 3.7.



Figura 3.6. Captura de imágenes. (a) Distancia de la muestra al objetivo, (b) arreglo de la muestra y el objeto de referencia.

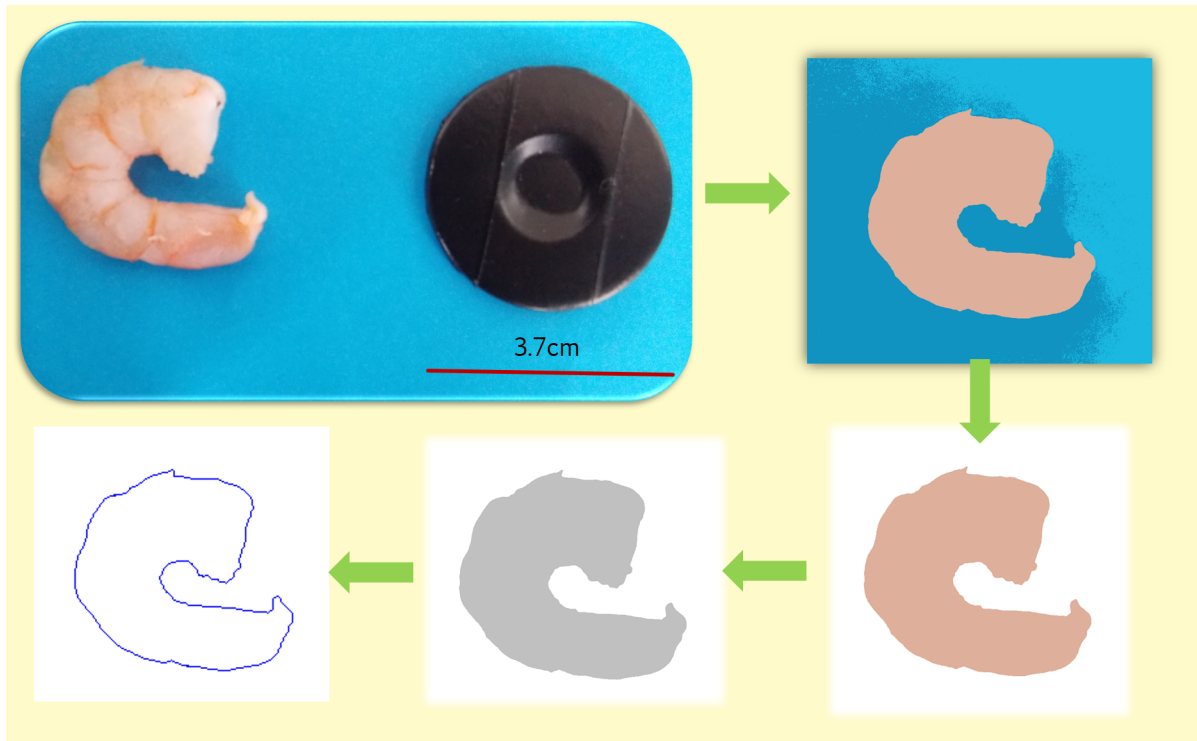


Figura 3.7. Proceso de análisis de imagen.

Con los datos recopilados del análisis de imagen se calculó el área del objeto en pixeles por medio de la Ecuación (3.9), el área del objeto en cm mediante la Ecuación (3.10), área de la muestra en pixeles y en cm a partir de las ecuaciones (3.11) y (3.12), las coordenadas obtenidas en pixeles x_i y y_i se pasan a cm empleando la Ecuación (3.13) y posteriormente se calcula el perímetro de la muestra, relación perímetro-área, redondez y compactabilidad mediante las ecuaciones (3.14), (3.15), (3.17) y (3.16), respectivamente. Los resultados fueron normalizados.

$$Aop = \frac{\pi(D_{po})^2}{4} \quad (3.9)$$

$$A_{oc} = \frac{\pi D_o^2}{4} \quad (3.10)$$

$$Amp = fcm * bi * hi \quad (3.11)$$

$$A = \frac{Amp * A_{oc}}{A_{op}} \quad (3.12)$$

$$x'_i = \frac{x_i D_o}{D_{po}}; \quad y'_i = \frac{y_i D_o}{D_{po}} \quad (3.13)$$

$$P = \sqrt{(x'_{i,j+1} - x'_{i,j-1})^2 + (y'_{i,j+1} - y'_{i,j-1})^2} \quad (3.14)$$

$$\frac{P}{A} \quad (3.15)$$

$$Cd = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (3.16)$$

$$Rz = \frac{A}{f_{cm} + f_{cc}} \quad (3.17)$$

3.3. Desarrollo teórico

3.3.1. Modelo en coordenadas cilindro-elíptico

El modelo para el transporte de masa para la difusión de humedad en el interior de un material homogéneo e isotrópico durante el salado en seco y secado convectivo de camarón se desarrolló a partir de la segunda ley de Fick descrita por la Ecuación (3.18), donde el gradiente de un campo escalar se desarrolla a partir de las coordenadas del sistema (u_1, u_2, u_3) y los factores de escala (h_1, h_2, h_3) toman diferentes valores de acuerdo al sistema estudiado.

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} = \nabla \cdot [D_j \nabla (C_j)] \quad (3.18)$$

$$C_j = \rho W_j \quad (3.19)$$

Para la Ecuación (3.18) se desglosa la concentración C_j de acuerdo a la Ecuación (3.19) para obtener las unidades deseadas y se sustituye en la Ecuación (3.18) quedando de la siguiente forma:

$$\frac{\partial (\rho W_j)}{\partial t} = \nabla \cdot [D_j \cdot \nabla (\rho W_j)] \quad (3.20)$$

El gradiente de un campo escalar se realiza en base a la Ecuación (3.21), donde v_1, v_2 y v_3 representan los componentes del vector resultante. Si las coordenadas del sistema elíptico-cilíndrico están dadas por la Ecuación (3.22) y los factores de escalares por la Ecuación (3.23), se desarrolla el gradiente de campo escalar de acuerdo a la Ecuación (3.25).

$$\nabla s = \frac{1}{h_1} \frac{\partial s}{\partial u_1} + \frac{1}{h_2} \frac{\partial s}{\partial u_2} + \frac{1}{h_3} \frac{\partial s}{\partial u_3} = v_1 + v_2 + v_3 \quad (3.21)$$

$$u_1 = u \quad u_2 = v \quad u_3 = z \quad (3.22)$$

$$h_1^2 = h_2^2 = a^2(\sinh^2 u + \sin^2 v) \quad h_3^2 = 1 \quad (3.23)$$

$$x = a \cosh(u) \cos(v) \quad y = uv \sin(\phi) \quad z = \frac{1}{2}(u^2 - v^2) \quad (3.24)$$

$$\nabla (\rho W_j) = \frac{1}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial u} + \frac{1}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial v} + \frac{1}{1} \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial z} \quad (3.25)$$

Agregando el coeficiente de difusión, el gradiente de campo escalar se escribe como:

$$D_j \nabla (\rho W_j) = \frac{D_j}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial u} + \frac{D_j}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial v} + D_j \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial z} \quad (3.26)$$

A continuación, la divergencia del campo vectorial se expresa como se muestra en la Ecuación (3.27) después de definir las coordenadas del sistema, los factores de escala y v_1, v_2, v_3 .

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [D_j \nabla (\rho W_j)] &= \frac{1}{\left(a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)^2} \left[\frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} D_j \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial u} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{\left(a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)^2} \left[\frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} D_j \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial v} \right) \right] \\ &+ \frac{1}{\left(a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right)^2} \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\left(a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right) \left(a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}\right) D_j \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.27)$$

Realizando una reducción de términos y considerando a D_j como una variable, se

obtiene que la divergencia de campo vectorial se puede expresar finalmente como se muestra en la Ecuación (3.28).

$$\begin{aligned} \nabla [D_j \nabla (\rho C_j)] = & \frac{1}{a^2(\sinh^2 u + \sin^2 v)} \frac{\partial}{\partial u} \left(D_j \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial u} \right) + \\ & \frac{1}{a^2(\sinh^2 u + \sin^2 v)} \frac{\partial}{\partial v} \left(D_j \frac{\partial (\rho W_j)}{\partial v} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (k D_j \partial (\rho W_j)) \end{aligned} \quad (3.28)$$

El caso de la condición de frontera se obtiene la Ecuación (3.30) a partir de retomar la expresión matemática obtenida para el gradiente de campo escalar descrito en la Ecuación (3.26), y evaluar ésta en la condición dada para la Ecuación (3.29):

$$-D_j \nabla (\rho C_j) = h (C_{ji}^* - C_j^*) \quad (3.29)$$

$$-\frac{D_j}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho C_j)}{\partial u} - \frac{D_j}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho C_j)}{\partial v} - k \frac{\partial (\rho C_j)}{\partial z} = h (C_{ji}^* - C_j^*) \quad (3.30)$$

Adimensionalización

La adimensionalización del modelo del proceso a estudiar es de gran importancia, ya que mediante el reemplazo conveniente de las variables, permite organizar y mostrar los resultados en forma más compacta y ordenada, reduciendo la cantidad de experimentos computacionales y numéricos a realizar.

Para la adimensionalización de la Ecuación (3.28), se realizan las siguientes con-

sideraciones:

- Se considera que ρ y D_j son constantes.
- Se desprecia la coordenada axial (z).
- Finalmente se plantean los siguientes términos adimensionales definidos por las ecuaciones (3.31) y (3.33) para la concentración (ψ) y el tiempo (τ). El foco de la elipse en el eje x (a) que puede ser definido en coordenadas rectangulares mediante la forma $x = a \cosh u \cos v$ donde $u = u_{max}$ y $v = 0, \pi$, es decir para el eje de las x se define un valor máximo establecido como $x_{max} = \pm X_{max}$, y de esta forma se obtiene el término adimensional de la Ecuación (3.32).

$$\psi = \frac{W_j - W_\infty}{W_0 - W_\infty} \quad W_j = \psi (W_0 - W_\infty) + W_\infty \quad \partial W_j = \partial \psi (W_0 - W_\infty) \quad (3.31)$$

$$a = \frac{X_{max}}{\cosh u_{max}} \quad (3.32)$$

$$\tau = \frac{D_j t}{x_{max}^2} \quad t = \frac{\tau x_{max}^2}{D_j} \quad \partial t = \frac{x_{max}^2}{D_j} \partial \tau \quad (3.33)$$

Sustituyendo los términos adimensionales y realizando el álgebra correspondiente, se obtiene la Ecuación (3.34).

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\cosh^2 u_{max}}{\sinh^2 u + \sin^2 v} \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial v^2} \right] \quad (3.34)$$

Esta ecuación es discretizada a partir de diferencias finitas centradas obteniendo la siguiente expresión.

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} = \frac{\cosh^2 u_{max}}{\sinh^2 u + \sin^2 v} \left[\frac{\psi_{j+1} - 2\psi_j + \psi_{j-1}}{(\Delta u)^2} + \frac{\psi_{j+1} - 2\psi_j + \psi_{j-1}}{(\Delta v)^2} \right] \quad (3.35)$$

Para la simulación de la geometría completa se utiliza solo un cuarto de la elipse, de tal manera que se obtienen 4 condiciones de frontera, una condición de frontera convectiva descrita por la Ecuación (3.29) que se desarrolla sólo para la dirección angular u y se sustituye el término de concentración de la Ecuación (3.19) de tal forma que la expresión se reduce a la Ecuación (3.36) y 3 fronteras simétricas: (1) en $u = 0$ para cualquier v , (2) en $v = 0$ y $v = \pi/2$ para cualquier u y (3) para el foco de la elipse, cuando $u = 0$ y $v = 0$.

$$-\frac{D_j}{a\sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}} \frac{\partial (\rho C_j)}{\partial u} = h (\rho_0 W_{ji}^* - \rho_0 W_j^*) \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial u} = 0 \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial v} = 0 \quad (3.38)$$

La adimensionalización de la frontera convectiva se realiza a partir de una constante de distribución en equilibrio (k_{eq}) que relaciona la concentración del producto W_j y

la concentración en el medio W_j^* y está determinada por la Ecuación (3.39), además se sustituyen los términos adimensionales de las ecuaciones (3.31) y (3.32) obteniendo un Biot másico determinado por la expresión (3.40) y la frontera adimensional de la Ecuación (3.41).

$$k_{eq} = \int_{w_0}^{w_\infty} dw / (w_0 - w_\infty) \quad (3.39)$$

$$Bi_m = \frac{hk_{eq}\beta X_{max} \sqrt{\sinh^2 u + \sin^2 v}}{D_j \cosh u_{max}} \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial u} = -Bi_m \psi \quad (3.41)$$

3.3.2. Solución numérica del modelo

La solución del proceso de salado en seco se realizó a partir de las coordenadas u y v , a partir de un cuarto de la figura y bajo las consideraciones mencionadas anteriormente, proponiendo un número de Biot grande para que la superficie del producto alcance la concentración instantáneamente.

- Como se puede ver la Ecuación (3.35) está definida en u_{max} , donde este término involucra la redondez de la elipse, definido como elipticidad. Este término se calculó a partir de los datos obtenidos de la caracterización del camarón y se analizaron de la siguiente forma:

- Se realizó la normalización de las distancias, definida como ξ para la distancia longitudinal del camarón .
- Se calculó la elipticidad ϕ mediante la Ecuación (3.42).
- Se gráfica ϕ con respecto a ξ .
- Se ajusta un modelo para describir el comportamiento observado y se integra de acuerdo a la Ecuación (3.43) para obtener un $\phi_{promedio}$; la tangente hiperbólica inversa de este valor da como resultado u_{max} , que es el valor máximo que puede alcanzar la elipse, se puede ver en la Figura 3.8.
- Finalmente el valor obtenido de u_{max} se alimenta a la simulación y se calcula un $\Psi_{promedio}$ para las direcciones angulares u y v con respecto a un rango de tiempo adimensional τ de acuerdo a la Ecuación (3.44).

$$\phi = \frac{d_i}{D_i} \quad (3.42)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_0^1 y(\xi) d\xi}{\int_0^1 d\xi} \quad (3.43)$$

$$\Psi_{uv} = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^{u_{max}} \psi(u, v) \frac{x_{max}^2}{\cosh^2 u_{max}} (\sinh^2 u + \sin^2 v) dudv}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{u_{max}} \frac{x_{max}^2}{\cosh^2 u_{max}} (\sinh^2 u + \sin^2 v) dudv} \quad (3.44)$$

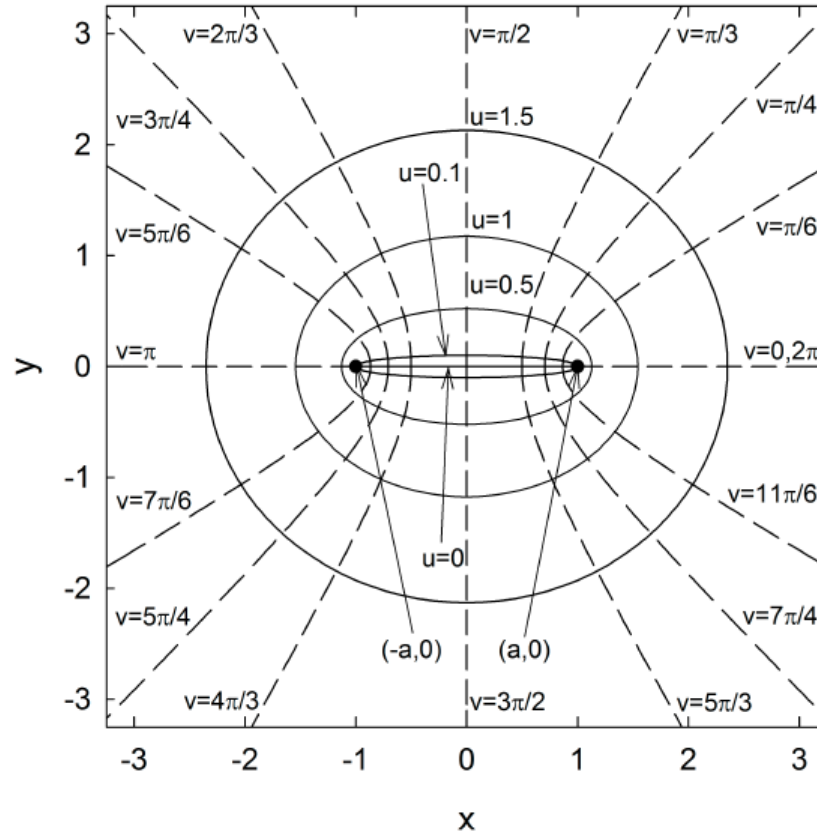


Figura 3.8. Representación de las coordenadas elíptico-cilíndricas. $u \in (0, 1)$ define una serie de elipses confocales centradas en el origen, $v \in (0, 2)$ representa hipérbolas asintóticas simétricas alrededor del eje x y a define los focos de las elipses sobre el eje x .

El sistema de EDO resultante se integró con 100 nodos en cada dirección angular ($n_u=100$ y $n_v=100$) utilizando un método de orden variable basado en las fórmulas de diferenciación numérica con la rutina ode15s del software Matlab R2012a (MathWorks Inc, Natick, MA, USA), para un valor de $u_{max} = 0.867$.

Para tomar en cuenta como cambia el área a lo largo del camarón, se calculó el área del elipse en cada punto usando la Ecuación (3.45) y graficandola contra ξ ; se ajustó un modelo y se integró para calcular el área promedio de la geometría, con base a lo anterior se realiza una sustitución de ϕ definido por la Ecuación (3.46) en

la formula del área y de esta manera se calculan $x_{max}(r)$ y $y_{max}(R)$.

$$A = \pi Rr \quad (3.45)$$

$$\phi = \frac{r}{R} \quad (3.46)$$

$$r = R\phi \quad (3.47)$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi\phi}} \quad (3.48)$$

El cálculo de ψ_z en dirección axial se realiza de manera analítica para una sola dirección en base a la Ecuación (3.49), para poder aplicar el principio de superposición es necesario que las concentraciones adimensionales ψ_{uv} y ψ_z estén en función de un mismo tiempo por lo que es necesario realizar la equivalencia de un nuevo Fourier definido por la Ecuación (3.50) donde se igualan los números de Fourier axial y en dirección uv , la equivalencia entre los dos esta definida por κ .

$$\Psi_z = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left(\frac{-(2n-1)^2 \pi^2}{4} \tau_z\right) \quad (3.49)$$

$$\tau_z = \frac{D_j t}{L_z^2} = \frac{D_j t}{\kappa^2 x_{max}^2} = \frac{1}{\kappa^2} \tau_{uv} \quad (3.50)$$

De esta manera se aplica el principio de superposición de la simulación resultante de las Ecuaciones (3.44) y (3.49) y se realiza la estimación de la difusividad y las condiciones en equilibrio, proponiendo valores iniciales en base a los datos experimentales y siguiendo el algoritmo mostrado en la Figura 3.9.

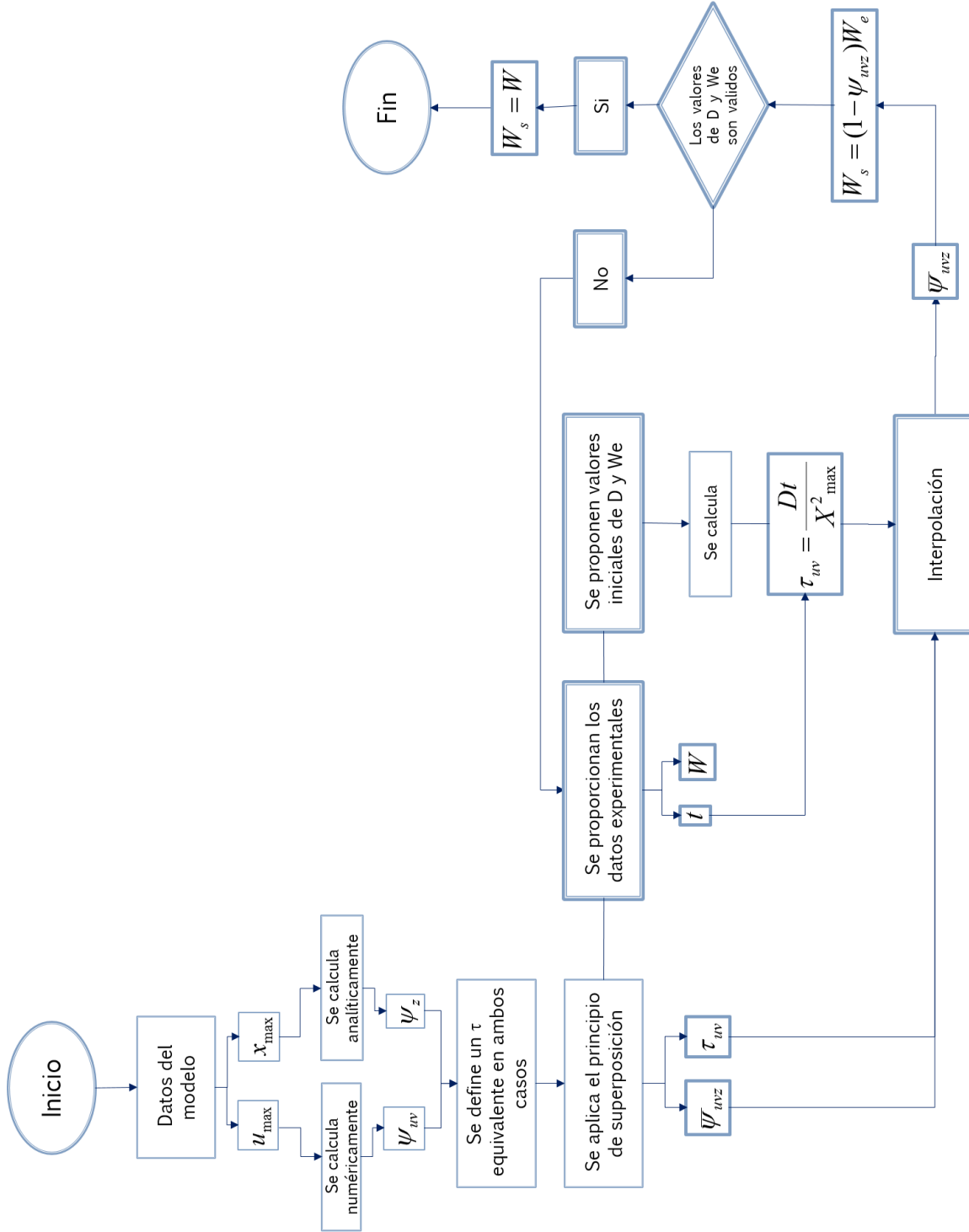


Figura 3.9. Algoritmo para la estimación de difusividad y condiciones en equilibrio con base a las coordenadas cilindro elípticas

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la solución matemática adecuada y partiendo de la ecuación general de difusión fue posible generar un modelo para describir de manera correcta el comportamiento de la transferencia de masa durante el salado en seco de camarón que puede ser descrito de forma precisa mediante una geometría no tradicional, en este caso, la del cilindro elíptico completo. En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en base al modelo y la metodología experimental.

4.1. Caracterización de área y geometría del camarón

En la Figura 4.1 se muestran los datos experimentales del cambio del área y la elipticidad adimensional con respecto a la longitud normalizada del camarón, como se observa son parámetros proporcionales, ya que al disminuir el área, la geometría se vuelve mas elíptica hasta valores de $A = 0,28 \text{ cm}^2$ y $\phi = 0,57$, al ajustar los datos se obtuvieron modelos cuadráticos descritos en las ecuaciones (4.1) y (4.2) y su integración proporciono valores de 0.87 cm^2 y 0.69 para el área y elipticidad promedio. El ajuste de estos datos permite obtener los parámetros $u_{max} = 0.86$ y $x_{max} = 0.53$ que definen al modelo cilindro elíptico.

$$\phi = -0,0631x^2 - 0,1597x + 0,8008 \quad (4.1)$$

$$A = -0,2992x^2 - 0,6793x + 1,3167 \quad (4.2)$$

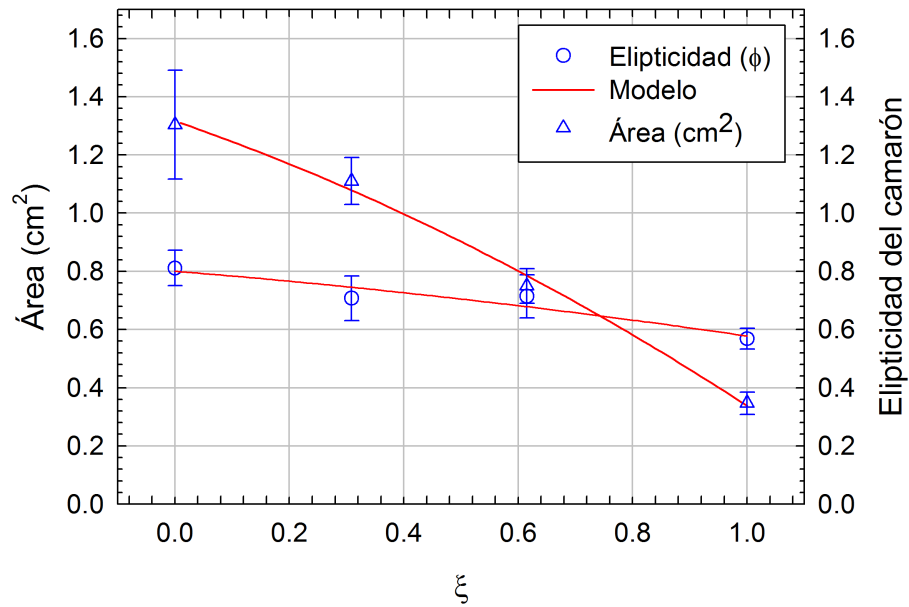


Figura 4.1. Cambio del área y forma elíptica en dirección longitudinal del camarón

4.2. Proceso de salado en seco

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos durante el proceso de salado en seco y su comparación con el ajuste del modelo propuesto.

4.2.1. Evolución del contenido de humedad adimensional para la direcciones uv y z

El calculo numérico de la concentración adimensional ψ_{uv} se muestra en la Figura 4.2, percibiendo un menor tiempo para alcanzar el equilibrio en comparación con la transferencia de masa en dirección axial Figura 4.3, esto debido a que el modelo tiene una mejor aproximación al cambio de la geometría en sus direcciones angulares. Por esta razón fue necesario realizar el cálculo del τ_{uvz} equivalente del tal manera que los tiempo se unificaran y con ello realizar el principio de superposición para ψ_{uv} y ψ_z .

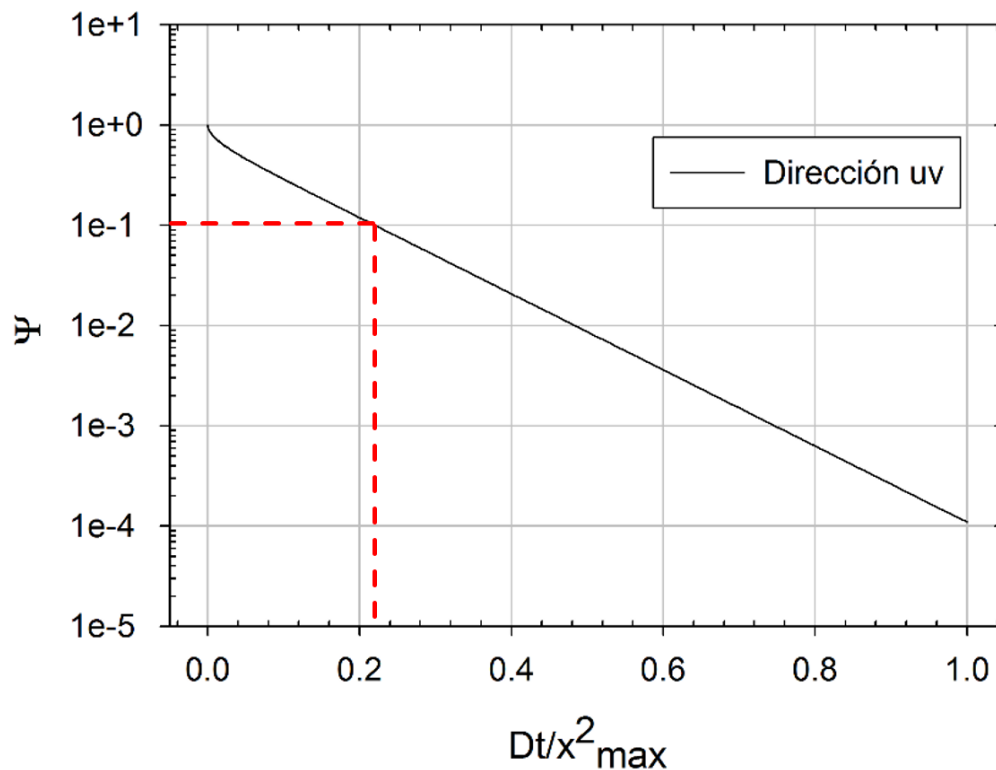


Figura 4.2. Evolución del contenido de humedad adimensional en dirección angular uv para el sistema coordenado cilindro elíptico ($\phi = 0,69$).

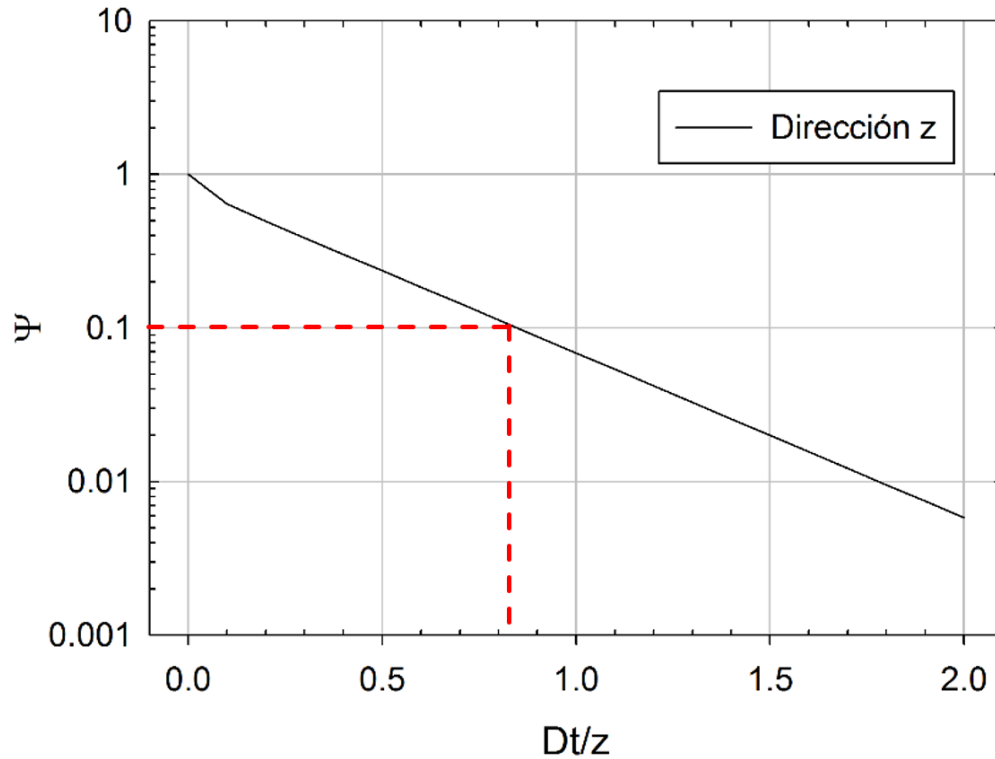


Figura 4.3. Evolución del contenido de humedad adimensional en dirección axial z para el sistema coordenado cilindro elíptico.

Al realizar el principio de superposición se obtuvo un modelo capaz de describir la transferencia de masa en tres direcciones, la solución del modelo se realizó considerando el valor de la elipse $u_{max} = 0,87$ y a modo de comprobación se realizó la simulación considerando la geometría como un cilindro completo, con un valor de $u_{max} = 5$, los datos obtenidos para ambas consideraciones fueron estadísticamente los mismos, sin embargo en la Figura 4.4 se observa que el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio es menor en la geometría cilindro-elíptica comparada con el cilindro completo debido a la mejor aproximación del cambio y tamaño de la elipse a lo largo del camarón, ofreciendo resultados con un mejor ajuste a los experimentales.

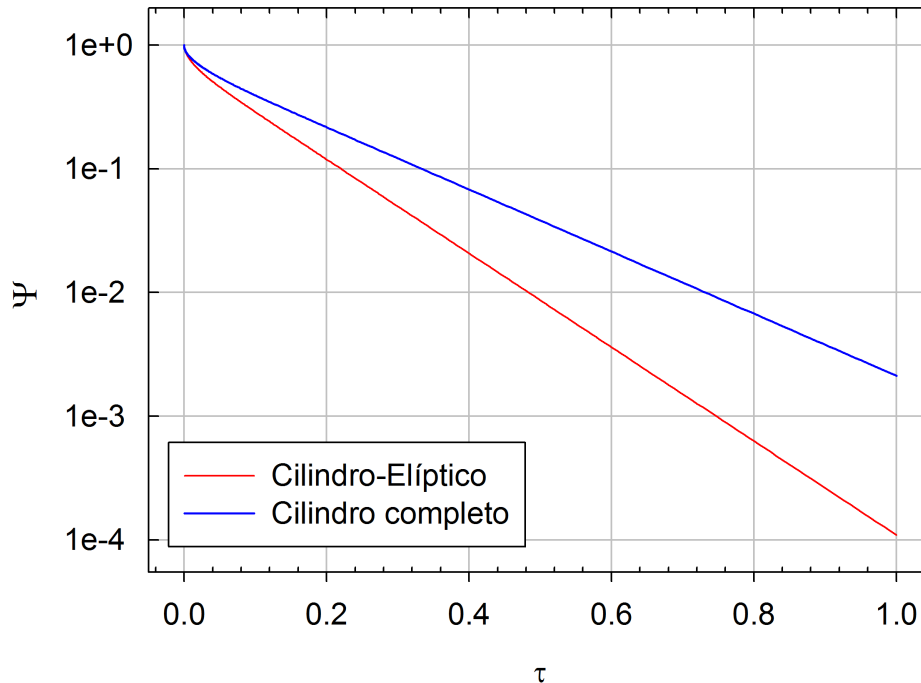


Figura 4.4. Evolución del contenido de humedad adimensional en dirección angular uv para el sistema coordenado cilindro elíptico y cilindro completo

4.2.2. Contenido de humedad y pérdida de agua

El contenido de humedad inicial del camarón usado como materia prima fue de 0.75 (g de agua/g de producto) resultado que se encuentra dentro del rango reportado por otros autores como Hosseinpour *et al.* (2014) y Namsanguan *et al.* (2004) quienes utilizaron camarón fresco como materia prima con rangos de humedad de 80 % (g de agua/g de producto), en la Figura 4.5 se observa el rápido descenso de humedad en las primeras horas de tratamiento, a partir de la hora 4 tiende a estabilizarse hasta alcanzar un valor aproximado de 0.58 (g de agua/g de producto), disminuyendo el contenido de humedad en un 20 % y obteniendo una reproducción del comportamiento experimental adecuada. Es importante tener en cuenta

que el proceso de salado en seco es capaz de deshidratar completamente el alimento, incluso hasta dañar su estructura de manera irreversible (Bellagha *et al.*, 2012), debido a esto es necesario tener un control del tiempo ya que como se observa en la Figura 4.6 la pérdida de agua requiere de tiempos largos de proceso para obtener el equilibrio. Autores como Bellagha *et al.* (2007) han reportado hasta 48 horas de tratamiento para filetes de sardina. Los valores de difusividad y ajuste del modelo se muestran en la el Tabla 4.1.

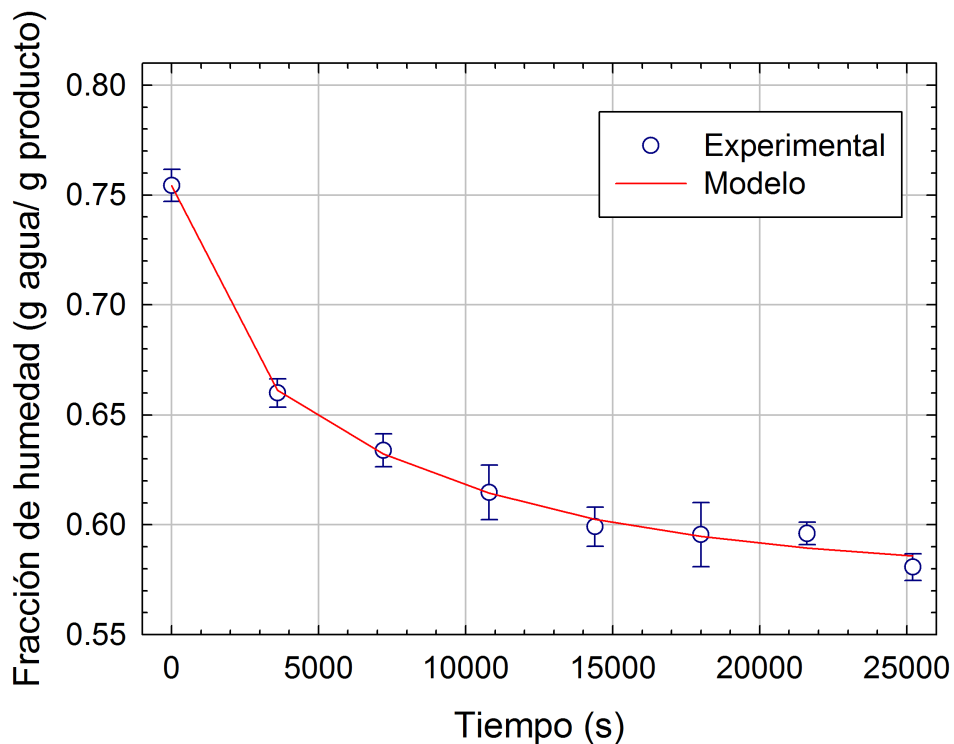


Figura 4.5. Evolución del contenido de humedad (experimental y ajustado) durante el salado en seco de camarón.

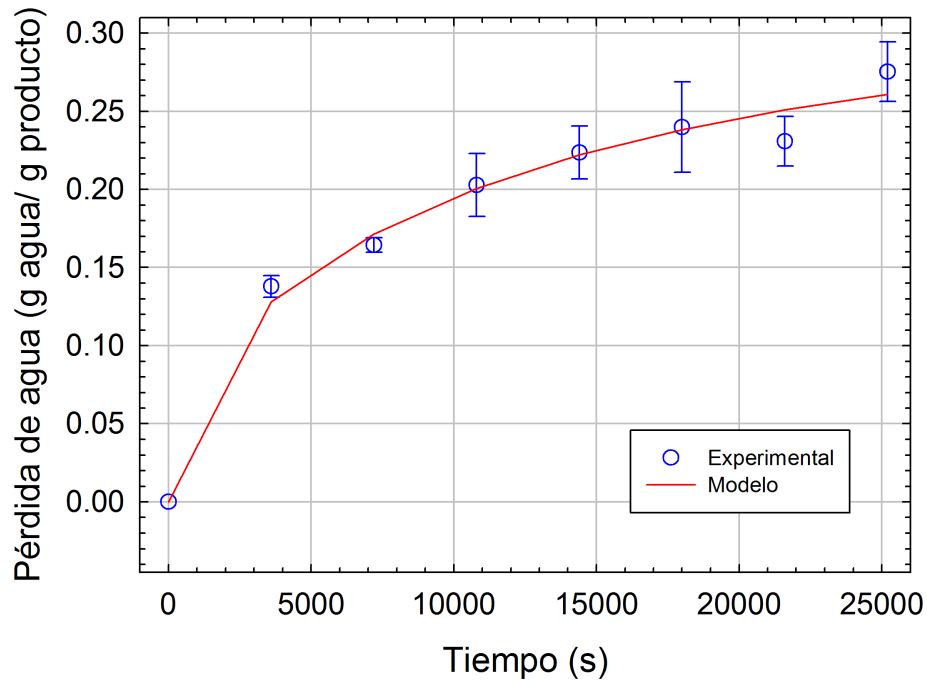


Figura 4.6. Pérdida de agua (experimental y ajustado) durante el salado en seco de camarón.

4.2.3. Ganancia de sólidos totales y cloruros

El contenido de sal del camarón fresco es de 0,028 (g NaCl/g producto). En la Figura 4.7 se muestra la ganancia de sólidos totales y NaCl con respecto al tiempo, tendiendo al equilibrio en un periodo de 4 h, de la misma forma la ganancia de solutos se desacelera hasta alcanzar su estado estacionario. En la Tabla 4.1 se reportan los valores de difusividad estimados mediante el modelo cilindro elíptico, los valores obtenidos para la ganancia de cloruros son similares a los reportados para el salado en seco de lomo de bacalao donde Boudhrioua *et al.* (2009) obtuvieron valores de $4,45 \times 10^{-9} m^2/s$ estimando que el incremento de la difusividad puede ser debido al contenido de grasa de la muestra. El coeficiente de determinación R^2 que

demuestra en todos los casos el modelo propuesto logró una excelente reproducción del comportamiento experimental.

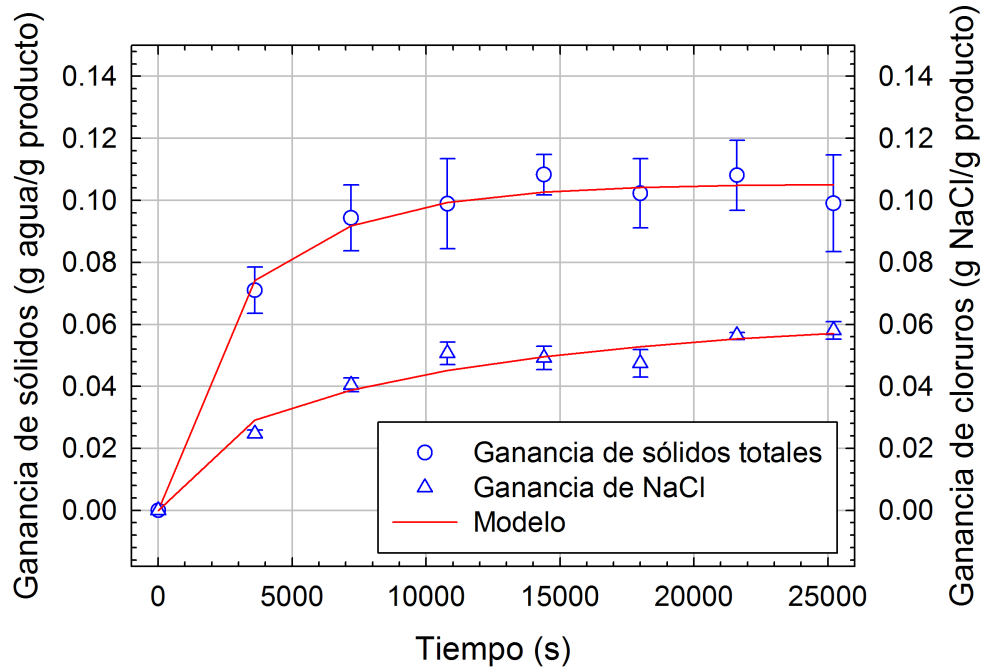


Figura 4.7. Ganancia de sólidos totales y cloruros (experimental y ajustado) durante el salado en seco de camarón.

Tabla 4.1. Difusividades y nivel de equilibrio alcanzado durante el salado en seco de camarón.

Curva	$D \times 10^{10} (m^2/s)$	Δ_e	R^2
Ganancia de sólidos totales	10.00	0.105	0.916
Pérdida de agua	3.00	0.296	0.952
Ganancia de NaCl	3.57	0.062	0.992

4.3. Proceso de secado convectivo

Las curvas de secado para el camarón fresco obtenidas a diferentes temperaturas se muestran la Figura 4.8. Se puede observar un tiempo de secado de aproxima-

damente de 7 horas; la disminución del tiempo de secado con el aumento de las temperaturas se observa a partir de los 30 minutos del proceso, notando una mayor diferencia entre las cinéticas de 80°C y 90°C, el proceso a una mayor temperatura se realiza más rápido hasta un tiempo de 200 minutos después de este periodo se observa una misma tendencia para las tres temperaturas. Las cinéticas de secado para el camarón pretratado con salado en seco se muestran en la Figura 4.9; la tendencia de las curvas es muy similar teniendo una menor diferencia de tiempo en comparación con el secado de camarón fresco, pero se aprecia que el tiempo de secado para las muestras pretratadas es mayor, esto es debido a la cantidad de sal que tienen las muestras dentro de su estructura lo que permite que durante el proceso se forme una costra la cual dificulta la transferencia de masa en el producto pero garantizan un mejor ajuste del modelo debido a que la transferencia de masa se realiza de una forma más lenta y permite conservar la forma de la geometría del alimento. Donsí *et al.* (2001) obtuvieron resultados similares al aplicar deshidratación osmótica y secado en estufa de vacío como pretratamientos seguido por un proceso de liofilización, obteniendo un mayor tiempo de secado para el proceso combinado con deshidratación osmótica asumiendo que la absorción de sólidos durante el pretratamiento forman una capa impermeable en la superficie de la muestra reduciendo la velocidad de difusión de vapor de agua durante la liofilización y como consecuencia incrementando el tiempo de proceso. Por otra parte, se han utilizado otros métodos combinados aplicados a camarón como el uso de vapor sobrecalentado seguido por una etapa de secado por bomba de calor y aire caliente obteniendo un menor tiempo de proceso de hasta 200 minutos (Namsanguan *et al.*, 2004); pero que consideran un mayor gasto energético comparado con el uso de una técnica de salado en seco.

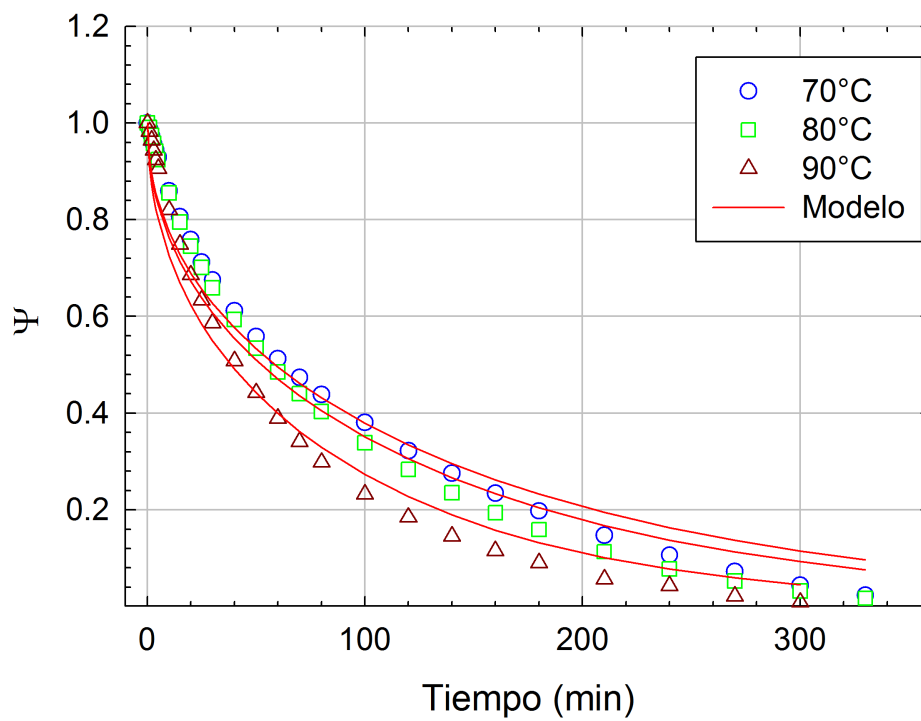


Figura 4.8. Proceso de secado convectivo de camarón fresco.

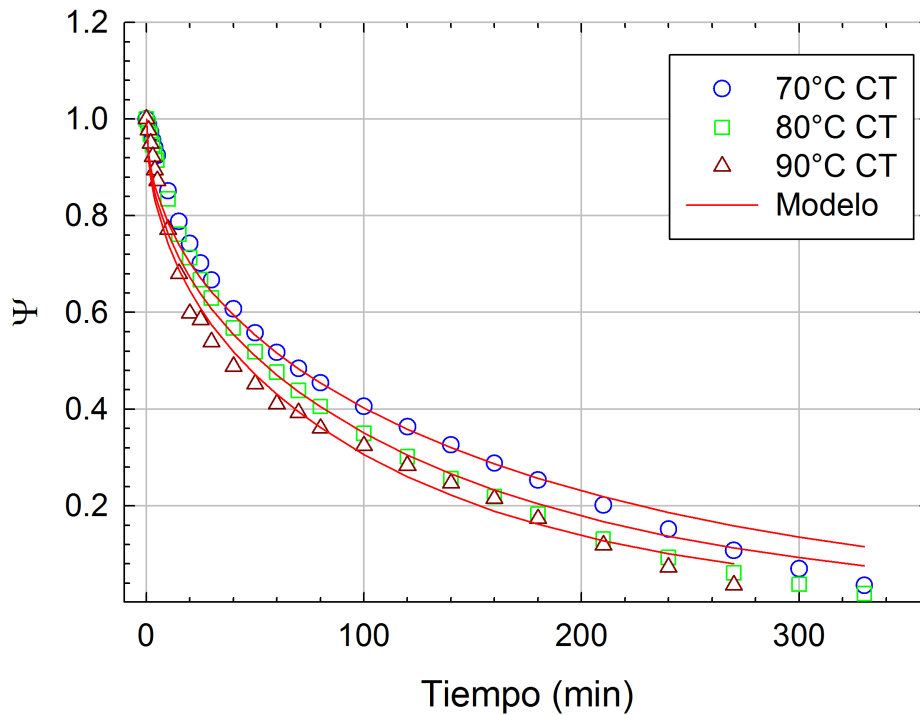


Figura 4.9. Proceso de secado convectivo en camarón pretratado.

Mediante la aplicación del salado en seco como pretratamiento de secado se logró disminuir el contenido de humedad base seca inicial. En la 4.10 se puede apreciar como el contenido de humedad presenta un rápido decaimiento del minuto 0 al minuto 200, posterior a éste la pérdida de humedad es mínima dada la baja concentración de humedad presente en las muestras.

Los coeficientes de difusividad obtenidos para cada temperatura se muestran en la Tabla 4.2, los valores se encuentran dentro del rango establecido para productos del mar. De acuerdo a lo reportado por Scala *et al.* (2010) se encuentran en rangos de 10^{-11} a $10^{-9} m^2/s$, ellos obtuvieron valores similares para el secado de calamar, además se han reportado valores para filetes de tilapia, carpa y tiburón.

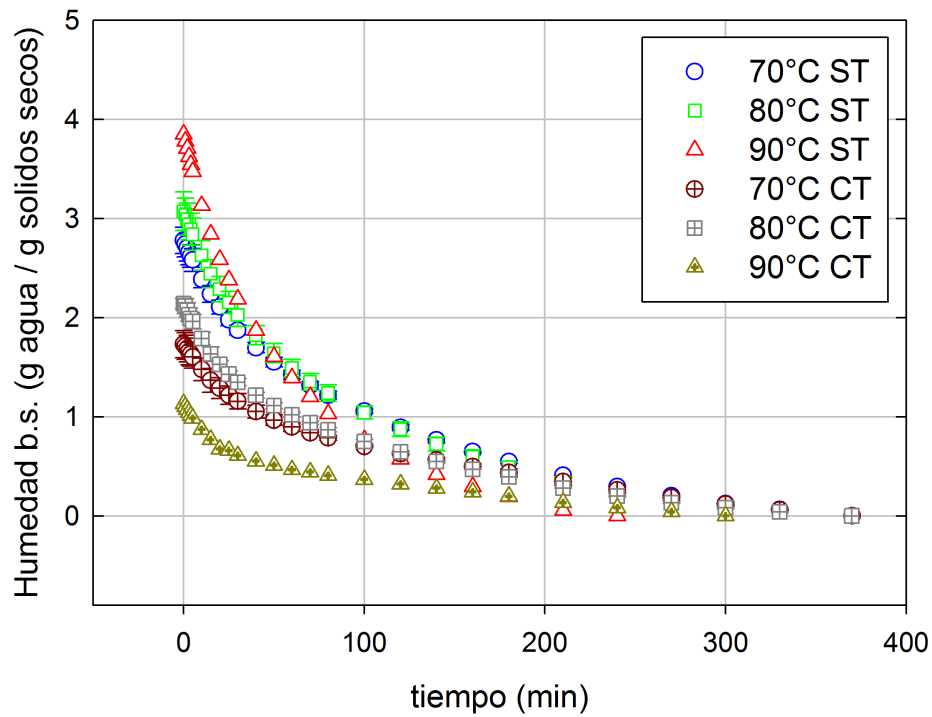


Figura 4.10. Disminución del contenido de humedad b.s. durante el proceso de secado convectivo de camarón.

Tabla 4.2. Difusividades obtenidas durante el proceso de secado convectivo de camarón.

Curva	$D \times 10^{10} (m^2/s)$	R^2
70 °C	4.28	0.971
80 °C	4.80	0.969
90 °C	6.56	0.982
70 °C con tratamiento	3.88	0.977
80 °C con tratamiento	4.81	0.980
90 °C con tratamiento	5.75	0.992

4.3.1. Encogimiento durante el proceso de secado convectivo

Mediante el proceso de digitalización de imágenes se obtuvo el cambio de área lateral del camarón, Figura 4.11, mostrando una mayor disminución para las mues-

tras que solo se sometieron al proceso de secado convectivo con valores de 0.5 a 0.6, mientras que para las muestras pretratadas con salado en seco los valores finales fueron de 0.8 a 0.9 es decir, el cambio de tamaño fue menor en las muestras pretratadas.

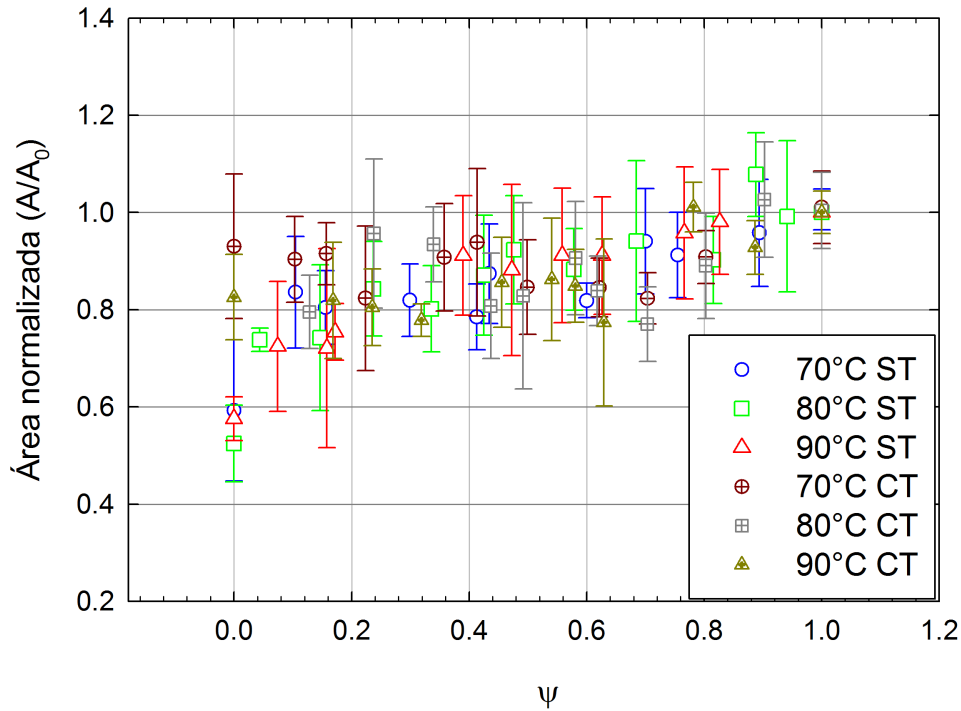


Figura 4.11. Cambio de área con respecto a la fracción de humedad libre.

El encogimiento de la muestra se puede observar mediante el cambio de perímetro, para el caso del camarón la disminución es mínima considerando que se trata de un biomaterial que se compone de una matriz sólida que contiene una gran fase líquida con humedades de hasta 80% base húmeda, esto es debido a que el cambio principal de tamaño se ve reflejado en la dirección angular definida como u_{max} , mientras que los datos obtenidos en la Figura 4.12 se muestran para la dirección axial del camarón, autores como Namsanguan *et al.* (2004) obtuvieron un porcentaje de

encogimiento de aproximadamente 37.5%. Por otra parte Devahastin *et al.* (2008b) aseguran obtener una menor pérdida de volumen de encogimiento para temperaturas superiores a 80°C debido a la disminución de tiempo del proceso de secado; mediante la Figura 4.13 se puede determinar que durante el proceso de secado el área del camarón disminuye pero su perímetro se conserva además, de acuerdo a las Figuras 4.14 y 4.15 durante el proceso de secado de camarón, las muestras tienden a encogerse sin sufrir deformación, esto se comprueba debido a que su redondez y compactibilidad se mantienen alrededor de 1.

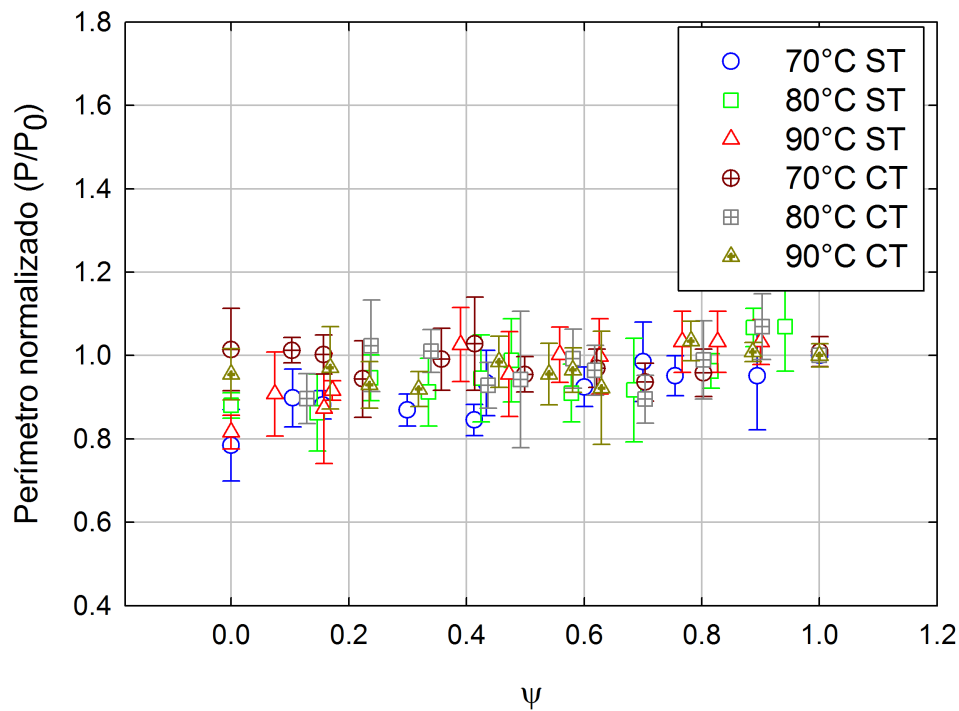


Figura 4.12. Cambio de perímetro con respecto a la fracción de humedad libre.

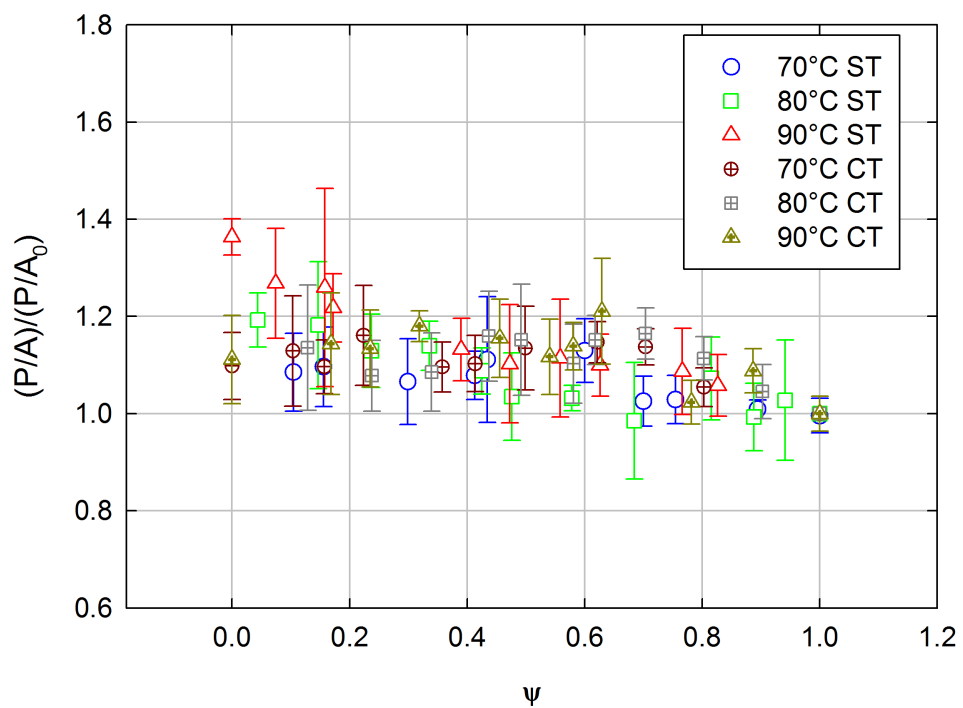


Figura 4.13. Relación del perímetro y área con respecto a la fracción de humedad libre.

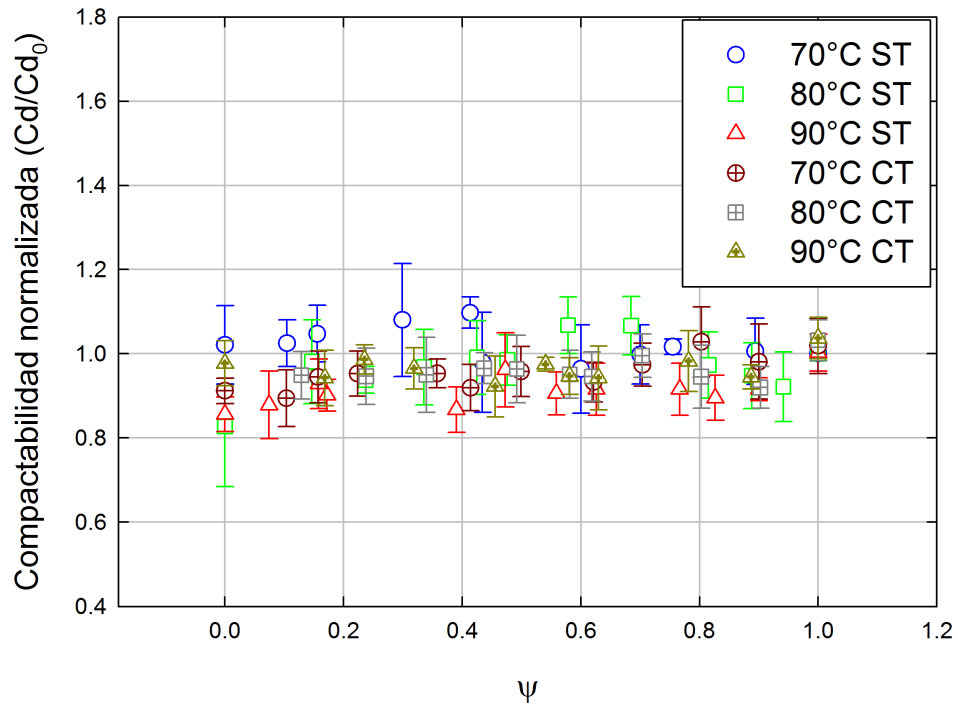


Figura 4.14. Evolución de la compactabilidad con respecto a la fracción de humedad libre

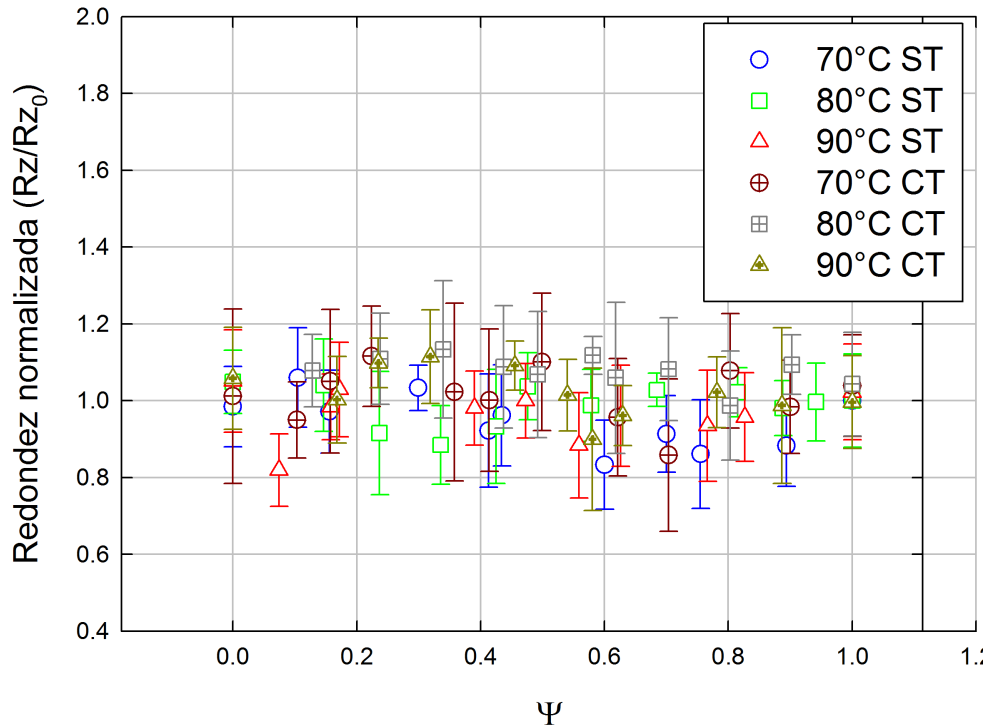


Figura 4.15. Evolución de la redondez con respecto a la fracción de humedad libre.

4.4. Proceso combinado de secado de camarón

En la Figura 4.16 se observa el porcentaje de rehidratación para las muestras con y sin pretratamiento, mostrando una misma tendencia, iniciando con un 80% hasta alcanzar valores de 97% de rehidratación, no existe diferencia significativa entre las muestras previamente tratadas con respecto a las muestras sin tratar. Donsí *et al.* (2001) observaron un mismo comportamiento en sus muestras mediante el uso de métodos combinados, con valores de 3.82 de capacidad de rehidratación (peso después de la rehidratación / peso inicial) para el proceso de liofilización y 3.69 para el proceso combinado, sin embargo notaron una diferencia significativa en la tex-

tura con valores de 0.37 N/mm^2 para un solo tratamiento y 0.67 a 0.95 N/mm^2 para métodos combinados; por otra parte Namsanguan *et al.* (2004) obtuvieron una diferencia marcada, iniciando con valores de 60 % de rehidratación para muestras sometidas al secado por aire caliente hasta un valor máximo del 75 % y para los métodos combinados iniciaron con valores de 80 % hasta alcanzar el 97 % de rehidratación; sin embargo la variación de cambio de color y textura que obtuvieron entre cada tratamiento no fue significativa, mientras que para los procesos aplicados en este trabajo la principal característica sensorial afectada fue la textura, en la Tabla 4.3 se muestran los valores obtenidos para las muestra rehidratadas después de los diferentes tratamientos aplicados consiguiendo mejores resultados para muestra pretratadas con valores cercanos al camarón fresco.

Considerando que el color es la principal característica sensorial del camarón y que el cambio de color neto observado en la Tabla 4.3 es significativo es importante destacar que ΔE sólo indica la magnitud de la diferencia total de color pero no indica cuán correcta es; en este caso el principal parámetro a medir es la tonalidad de rojo a , teniendo una disminución en su valor para todos los procesos, pero principalmente para las muestras sometidas a un sólo proceso de secado. Devahastin *et al.* (2005) obtuvieron valores de Δa similares para secado por aire caliente a temperaturas de 70, 100 y 120°C.

Tabla 4.3. Efecto de la aplicación de procesos de secado en el cambio de color y textura de camarón.

Tratamiento	L*	a*	b*	ΔE	Esfuerzo (N/mm^2)
Fresco	64.056	9.71	15.25		2.646
70°C ST	53.273	7.073	25.653	15.213	0.753
80°C ST	55.01	5.75	25.83	14.472	0.773
90°C ST	51.843	9.603	27.646	17.402	0.730
70°C CT	53.686	6.49	25.653	15.037	2.353
80°C CT	52.886	7.49	25.596	15.386	2.350
90°C CT	54.633	11.406	27.086	15.223	1.620

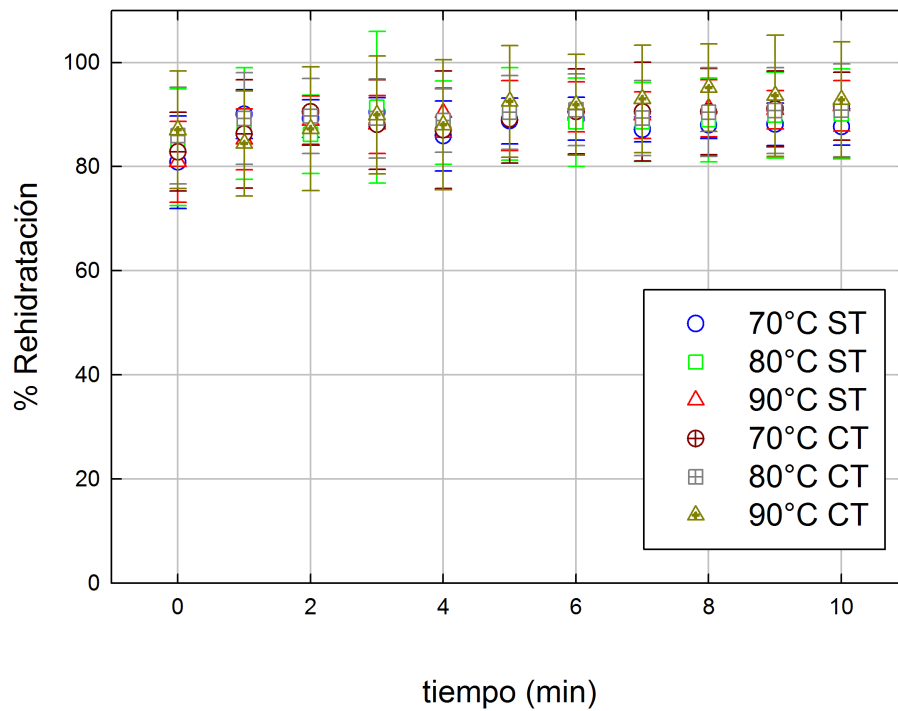


Figura 4.16. Curvas de rehidratación obtenidas para camarón sin pretratamiento (ST) y pretratado (CT)

V. CONCLUSIONES

Mediante el modelo propuesto cilindro-elíptico se logró describir adecuadamente el comportamiento experimental del salado en seco y secado convectivo de camarón comparado con otras geometrías, además se ajustó apropiadamente a la forma poco convencional del alimento con un $R^2 > 0.9$ lo que permitió estimar las propiedades de transporte de masa del producto obteniendo valores de difusividad en rangos de 10^{-11} a $10^{-9} m^2/s$ correspondientes a los alimentos del mar.

El análisis de imagen proporcionó la información necesaria para determinar que la geometría del camarón se mantiene durante del proceso de secado convectivo (no presenta deformación), y que el encogimiento lateral del camarón es mínimo.

La aplicación de los métodos combinados de secado permitió obtener un menor tiempo de secado para una humedad base seca de hasta 1 g agua/g sólidos secos y aunque no mostró una diferencia significativa en la capacidad de rehidratación si logró mejorar las características sensoriales mas importantes como color y textura comparadas con la aplicación de un solo método de secado. Además el salado en seco permitió obtener una mejor calidad del producto final comparado con otros métodos reportados en la bibliografía.

Teniendo en cuenta que la diferencia de temperaturas no afecta de una manera drástica la cinética del secado de camarón, y que al aplicar el proceso combinado se mantiene el mismo comportamiento además de que la disminución de tiempo de secado es de solo minutos, y de acuerdo con Benjakul *et al.* (2007) las proteínas del camarón principales como la miocina y la actina soportan temperaturas máximas de 52 y 74 °C respectivamente antes proceder a su desnaturalización; se puede decir que el mejor método combinado de secado es la aplicación de salado en seco como

pretratamiento seguido por secado convectivo a una temperatura de 70°C.

Bibliografía

- NMX-F-559-1999. *NMX-F-559-1999 Productos de la pesca. Camarón fresco refrigerado. Especificaciones. Norma mexicana. Dirección general de normas.*
- Alzate, Carlos Eduardo Orrego (ed). 2003. *Procesamiento de alimentos.* Universidad Nacional de Colombia.
- Baker, Christopher G. J. (ed). 1997. *Industrial Drying of foods.* Chapman and Hall.
- Barros-Velázquez, J., Pascoal, A., Ortega, I., Cepeda, A., Gallardo, J. M., & Calomata, P. 2011. Molecular identification of the black tiger shrimp (*Penaeus monodon*), the white leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) and the Indian white shrimp (*Fenneropenaeus indicus*) by PCR targeted to the 16S rRNA mtDNA. *Food Chemistry*, **125**, 1457–1461.
- Bellagha, S., Sahli, A., Farhat, A., Kechaou, N., & Glenza, A. 2007. Studies on salting and drying of sardine (*Sardinella aurita*): Experimental kinetics and modeling. *Journal of Food Engineering*, **78**, 947–952.
- Bellagha, S., Chabbouh, M., Hadj, S. B., & Farhat, A. 2012. Studies on the Salting Step of Tunisian Kaddid Meat: Experimental Kinetics, Modeling and Quality. *Food Bioprocess Technology*, 1882–1895.
- Benjakul, Soottawat, & Nirmal, Nilesh Prakash. 2009. Melanosis and Quality Changes of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*) Treated with Catechin during Iced Storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **57**, 3578–3586.
- Benjakul, Soottawat, Sriket, Pisal, Visessanguan, Wonnop, & Kijroongrojana, Kongkarn. 2007. Comparative studies on chemical composition and thermal properties of black tiger shrimp (*Penaeus monodon*) and white shrimp (*Penaeus vannamei*) meats. *Food Chemistry*, **103**, 1199–1207.

- Bertelsen, G., Bak, L.S., Andersen, E.M., & Andersen, A.B. 1999. Effecte of modified atmosphere packaging on oxidative changes in frozen stored cold water shrimp (*Pandalus borealis*). *Food Chemistry*, **64**, 169–175.
- Boudhrioua, Nourhéne, Djendoubi, Nadia, Bellagha, Sihem, & Kechaou, Nabil. 2009. Study of moisture and salt transfers during salting of sardine fillets. *Journal of Food Engineering*, **94**, 83–89.
- Chabbouh, Meriem, Ahmed, Sami Ben Hadj, Farhat, Abdelhamid, Sahli, Ali, & Bellagha, Sihem. 2012. Studies on the Salting Step of Tunisian Kaddid Meat: Experimental Kinetics, Modeling and Quality. *Food Bioprocess Technol*, **5**, 1882–1895.
- Clark, Stephanie, Jung, Stephanie, & Lamsal, Buddhi (eds). 2014. *Food Processing Principles and Applications*. Second edn. Wiley Blackwell.
- da Silva Pena, Rosinelson, Martins, Mayara Galvao, & Martins, Déborah Elena Galvao. 2015. Drying kinetics and hygroscopic behavior of pirarucu (*Arapaima gigas*) fillet with different salt contents. *LWT - Food Science and Technology*, **62**, 144–151.
- de Lima, A. G. B., Queiroz, M. R., & Nebra, S. A. 2002. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chemical Engineering Journal*, **86**, 85–93.
- Delgado, João M. P. Q., & de Lima, A. G. Barbosa (eds). 2014. *Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials*. Springer.
- den Besten, Heidy M.W., Dabade, D. Sylvain, Paulin Azokpota a, M.J. Robert Nout, Hounhouigan, D. Joseph, & Zwietering, Marcel H. 2015. Spoilage evaluation, shelf-life prediction, and potential spoilage organisms of tropical brackish water shrimp (*Penaeus notialis*) at different storage temperatures. *Food Microbio-*

- logy*, **48**, 8–16.
- Devahastin, Sakamon, Tapaneyasin, Rungtip, & Tansakul, Ampawan. 2005. Drying Methods and Quality of Shrimp Dried in a Jet Spouted Bed Dryer. *Journal of food process Engineering*, 35–52.
- Devahastin, Sakamon, Niamnuya, Chalida, & Soponronnaritb, Somchart. 2008a. Changes in protein compositions and their effects on physical changes of shrimp during boiling in salt solution. *Food Chemistry*, **108**, 165–175.
- Devahastin, Sakamon, Niamnuy, Chalida, SomchartSoponronnarit, & G.S.VijayaRaghavan. 2008b. Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. *Chemical Engineering & Technology*, **63**, 5503–5512.
- Donsí, G., Ferrari, G., & MAteo, P. DI. 2001. Utilization of combined processes in freeze-drying of shrimps. *Institution of Chemical Engineers*, **79**, 152–159.
- García, Hugo S., Becerra, Josafat A. Hernández, Flores, Angélica A. Ochoa, Valerio-Alfaro, Gerardo, Soto-Rodríguez, Ida, & Rodríguez-Estrada, María T. 2014. Cholesterol oxidation and astaxanthin degradation in shrimp during sun drying and storage. *Food Chemistry*, **145**, 832–839.
- García-Alvarado, M.A., Hernández-Díaz, W.N., Ruiz-López, I.I., Salgado-Cervantes, M.A., & Rodríguez-Jimenes, G.C. 2008. Modeling heat and mass transfer during drying of green coffee beans using prolate spheroidal geometry. *Journal of food engineering*, **86**, 1–9.
- Giner, Sergio A., Gastón, Analía L., & Abalone, Rita M. 2002. Wheat drying kinetics. Diffusivities for sphere and ellipsoid by finite elements. *Journal of food engineering*, **52**, 313–322.
- Gonzalez-Félix, Mayra L., IIIIn, Delbert M. Gatlin, Lawrence, Addison L., & Perez-

- Velazquez, Martin. 2002. Effect of dietary phospholipid on essential fatty acid requirements and tissue lipid composition of *Litopenaeus vannamei* juveniles. *Aquaculture*, **207**, 151–167.
- Gudjónsdóttir, María, Arason, Sigurjón, & Rustad, Turid. 2011. The effects of pre-salting methods on water distribution and protein denaturation of dry salted and rehydrated cod-A low-field NMR study. *Journal of Food Engineering*, **104**, 23–29.
- Guerrero, Isabel, Rosmini, Marcelo R., & Armenta, Roberto E. (eds). 2009. *Tecnología de productos de origen acuático*. Limusa.
- Hii, C.L., Law, C.L., & Law, M.C. 2013. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, **54**, 264–271.
- Hosseinpour, Soleiman, Rafiee, Shahin, Aghbashlo, Mortaza, & Mohtasebi, Seyyed Saeid. 2014. A novel image processing approach for in-line monitoring of visual texture during shrimp drying. *Journal of food engineering*, **143**, 154–166.
- Hui, Y. H., Clary, C., Farid, M. M., Fasina, O. O., Noomborm, A., & Welti-Chanes, J. (eds). 2008. *Food Drying Science and Technology: Microbiology, Chemistry, Applications*. DEStech Publications, Inc.
- Jain, Dilip. 2006. Determination of Convective Heat and Mass Transfer Coefficients for Solar Drying of Fish. *Biosystems Engineering*, **94**(3), 429–435.
- Jaturonglumlert, Somkiat, & Kiatsiriroat, Tanongkiat. 2010. Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*, **100**, 254–260.
- Kituu, G.M., Shitanda, D., Kanali, C.L., Mailutha, J.T., Njoroge, C.K., Wainaina, J.K.,

- & Silayo, V.K. 2010. Thin layer drying model for simulating the drying of Tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in a solar tunnel dryer. *Journal of Food Engineering*, **98**, 325–331.
- Kreith, Frank, Manglik, Raj M., & Bohn, Mark S. 2012. *Principios de Transferencia de calor*. Séptima edn. Cengage Learning.
- Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., & Saravacos, G. B. 2001. The effect of method of drying on colour of dehydrated product. *Food Science and Technology*, **36**, 23–59.
- Levenspiel, Octave. 2014. *Engineering Flow and Heat Exchange*. Third edn. Springer.
- Lewicki, Piotr P. 1998. Effect of pre-drying treatment, drying and re-hydration on plant tissue properties: a review. *Journal of Food Engineering*, **1**, 1–22.
- Markowski, Marek, Bialobrzewski, Ireneusz, & Modrzewska, Agnieszka. 2010. Kinetics of spouted - bed drying of barley: Diffusivities for sphere and ellipsoid. *Journal of Food Engineering*, **96**, 380–387.
- Massoud, Mahmoud. 2005. *Engineering Thermofluids Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*. Springer.
- Maupoey, Pedro Fito, Grau, Ana M. Andrés, Sorolla, Ana María Albors, & Baviera, José Manuel Barat (eds). 2001. *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Univ. Politéc. Valencia.
- Méndez, José A. Barreiro, & Briceño, Aleida J. Sandoval. 2006. *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*. Equinoccio.
- Namsanguan, Yuvanaree, Tia, Wuarunee, Devahastin, Sakamon, & Soponronnarit, Somchart. 2004. Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two- stage drying processes. *Drying Technology*, **22**(4), 759–778.
- Parjikolaei, Behnaz Razi, El-Houri, Rime Bahij, Fretté, Xavier C., & Christensen,

- Knud Villy. 2015. Influence of green solvent extraction on carotenoid yield from shrimp (*Pandalus borealis*) processing waste. *Journal of Food Engineering*, **155**, 22–28.
- Perry, Robert H. 1994. *Manual del Ingeniero Químico*. McGraw-Hill.
- Pinto, L. A. A., & Tobinaga, S. 2007. Diffusive model with shrinkage in the thin-Layer Drying of fish muscles. *Drying Technology*, **24**, 509–516.
- Roberti, D.E. 2001. Cinética del secado convectivo del camarón dulceacuícola (*Macrobrachium jelskii*) a dos temperatura y dos velocidades de aire. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 158–172.
- Roselli, Robert J., & Diller, Kenneth R. 2011. *Biotransport: Principles and Applications*. Springer.
- Ruiz-López, I.I., Córdova, A.V., Rodríguez-Jimenes, G.C., & García-Alvarado, M.A. 2004. Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties. *Journal of Food Engineering*, **63**, 117–124.
- Sagar, V.R., & Suresh, P. Kumar. 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *Food Science and Technology*, **1(47)**, 15–26.
- SAGARPA. 2009. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación. [http :
//www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/CAMARONCON](http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/CAMARONCON)
- Sahin, A.Z., & Dincer, I. 2005. Prediction of drying times for irregular shaped multi-dimensional moist solids. *Journal of Food Engineering*, **71**, 119–126.
- Scala, Karina Di, Gálvez, Antonio Vega, Miranda, Margarita, Clavería, Rodrigo, Quispe, Issis, Vergara, Judith, Uribe, Elsa, & Paez, Hector. 2010. Effect of air temperature on Drying and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid. *Food Science and Technology*, **30**, 1–8.

- Sobukola, O.P., & Olatunde, S.O. 2011. Effect of salting techniques on salt uptake and drying kinetics of African catfish (*Clarias gariepinus*). *Food and Bioproducts Processing*, **89**, 170–177.
- Toledo, Romeo T. 2007. *Fundamentals of Food Process Engineering*. Aspen Publishers.
- Vega-Gálvez, A., Andrés, A., Gonzalez, E., Notte-Cuello, E., Chacana, M., & Lemus-Mondaca, R. 2009. Mathematical modelling on the drying process of yellow squat lobster (*Cervimunida jhoni*) fishery waste for animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, **151**, 268–279.
- Yanar, Yasemen, & Celik, Mehmet. 2006. Seasonal amino acid profiles and mineral contents of green tiger shrimp (*Penaeus semisulcatus* De Haan, 1844) and speckled shrimp (*Metapenaeus monoceros* Fabricus, 1789) from the Eastern Mediterranean. *Food Chemistry*, **94**, 33–36.
- Zhang, Bin, kai Ma, Lu, gui Deng, Shang, Xie, Chao, & hua Qiu, Xiao. 2015. Shelf-life of paci?c white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) as affected by weakly acidic electrolyzed water ice-glazing and modi?ed atmosphere packaging. *Food Control*, **51**, 114–121.
- Zhao, Yanyun, Wang, Yuegang, Luo, Yali, & Deng, Yun. 2015. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets. *Food Chemistry*, **171**, 168–176.
- Zhengyu, Jin, Xueming, Xu, & Aiquan, Jiao. 2014. Modelling of dehydration-rehydration of instant rice in combined microwave-hot air drying. *Food and Bioproducts Processing*, **92**, 259–265.