ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

"Diseño de una herramienta predictiva en lenguaje *visual basic .net* en procesos de transferencia de masa aplicada a alimentos"

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERA DE ALIMENTOS

Presentada por:

Ingrid Paola Avegno Reyes

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2007

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiar mi camino con su luz, a mi mami por su amor y por su rigor, a mi papi por su apoyo incondicional, a mi hermano por su ayuda, a mi enamorado Alfredo por su apoyo en todo este tiempo, a mi mami Mary y querida prima Denisse por sus oraciones, en especial a la Msc. Priscila Castillo, Ing Sandra Acosta e Ing Luis Miranda por su guía y ayuda en este proyecto y a mis amigas Andrea, Karina y Estefania por estar ahí siempre.

DEDICATORIA

A mis Padres y Hermano por su dedicación y por todo su amor. A mi enamorado Alfredo Barros por su amor y comprensión.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

_____	_____
Ing. Eduardo Rivadeneira P.	Ing. Priscila Castillo S.
DECANO DE LA FIMCP	DIRECTOR DE TESIS
PRESIDENTE	
_____	_____
Ing. Sandra Acosta D.	Ing. Luis Miranda S.
VOCAL	VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

" La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

_____

Ingrid Paola Avegno Reyes

RESUMEN

En el área de Ingeniería en alimentos el estudio de la transferencia de masa juega un papel muy importante en diferentes procesos aplicados a la industria de alimentos, tales como lo son: secado, deshidratación osmótica, permeabilidad de empaques alimenticios, entre otros.

En la mayoría de los casos el transporte o movimiento de agua, es primordial para lo principios de conservación, que consisten en la reducción del contenido de agua del producto, sirviendo de indicador de estabilidad y de calidad para que el producto se conserve. En el caso de la deshidratación osmótica, el transporte o movimiento de solutos hacia el alimento, ayuda a la conservación del mismo, debido que estos solutos contribuyen a ”ligar “ el agua, reduciendo la disponibilidad de agua presente. Así también, el movimiento de vapor de agua u oxigeno, del exterior hacia un alimento empacado esta dado por la permeabilidad o resistencia al paso del gas en los materiales de empaque.

El objetivo de esta tesis propone diseñar una herramienta predictiva que pueda ser aplicada a procesos de nuestro interés, para facilitar el estudio de la transferencia de masa en sistemas alimenticios.

El trabajo comenzará con la búsqueda de modelos matemáticos de Transferencia de masa aplicados a Secado, Deshidratación Osmótica y Permeabilidades en Materiales de empaques para de esta manera seleccionar el modelo a utilizar en la herramienta. A continuación se realizara un banco de datos experimentales relacionados con los procesos en estudio. Por último se diseñará una herramienta en lenguaje Visual Basic.NET para que por medio de la data experimental evaluar y conocer la eficiencia de la misma.

Se espera obtener de este trabajo una herramienta que permita calcular con mayor facilidad tiempos de secado y de deshidratación osmótica a una concentración deseada y así mismo la determinación de la velocidad de transmisión de gases a través del material de empaque.

INDICE GENERAL

Pág.

RESUMEN …….. I

INDICE GENERAL …… III

ABREVIATURAS …….. VI

SIMBOLOGÍA ……. VIII

INDICE DE FIGURAS ……... IX

INDICE DE TABLAS ……. X

INTRODUCCIÓN ……... 1

CAPITULO 1

1. GENERALIDADES DE LA TRANSFERENCIA DE MASA

1.1 Ley de Fick …….. 8

1.2 Segunda Ley deFick …….. 11

1.3 Transferencia de masa en sistemas alimenticios ……. 12

1.3.1 Usos y Aplicaciones …….. 13

1.4 Justificación …… 23

CAPITULO 2

2. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1 Modelos Matemáticos aplicados a sistemas alimenticios …….. 27

2.1.1 Secado …… 27

2.1.2 Deshidratación Osmótica ……... 47

2.1.3 Permeabilidad en materiales de empaques …… 65

2.2 Elaboración de banco de datos experimentales ……. 80

CAPITULO 3

3. DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA

3.1 Selección del programa …….. 84

3.2 Elaboración del manual del usuario …….. 85

3.3 Consideraciones y limitaciones del programa ……. 105

CAPITULO 4

4. VALIDACION

4.1 Selección de Información Requerida ……. 108

4.2 Pruebas y Ajustes del Programa …….. 111

4.2.1 Secado ……. 112

4.2.2 Deshidratación Osmótica ……. 114

4.2.3 Permeabilidad en materiales de empaque …….. 115

4.3 Comparación de los Resultados con los valores experimentales … 117

CAPITULO 5

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES …….. 121

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

ρ	Densidad
V	Volumen
X	Contenido de Agua
t	Tiempo
k_y	Coeficiente de Transferencia de masa
A	Área
Y	Contenido de agua en el aire
Y^*	Contenido de agua en el aire en equilibrio
h	Coeficiente de transferencia de calor
y_w	Fracción mol del vapor de agua en la superficie
y	Fracción mol del vapor de agua en el gas
M_A	Peso molecular del agua
M_B	Peso molecular del aire
H_w	Humedad de la superficie
H	Humedad del gas
R_C	Velocidad de secado
T	Temperatura del aire
T_W	Temperatura del alimento
X_1	Contenido inicial de humedad
X_2	Contenido crítico de humedad
P	Presión Total
R	Constante de gas
P_x	Presión parcial
p	Presión parcial del agua en el aire
p_w	Presión parcial del agua en el alimento
c	Contenido de humedad
c_e	Contenido de humedad de equilibrio
c_0	Contenido de humedad inicial
D_{ef}	Difusividad efectiva

L	Espesor de la placa
K	Coeficiente de velocidad de secado
PA	Perdida de agua
GS	Ganancia de solutos
M_0	Masa inicial de fruta antes de ser sometida al tratamiento osmótico
M	Masa de fruta luego del tratamiento osmótico
m_0	Masa seca inicial de la muestra de fruta
m	Masa seca de la fruta luego del tratamiento osmótico
d_c	Dimensión de la muestra
D	Coeficiente de Difusividad
k	Conductividad Térmica
k	Conductividad Térmica
k	Conductividad Térmica
k	Conductividad Térmica
LDPE	Polietileno de baja densidad
HDPE	Polietileno de alta densidad
PP	Polipropileno
PCTFE	Policlorutriflúoretileno
PET	Politereftalato de Etileno
PVC	Poli cloruro de vinilo
PA 11	Polímero del ácido amino-11-undecanoico
PS	Poliestireno
PVDC	Poli cloruro de vinilideno

SIMBOLOGÍA

λ_W	Calor latente
$\bar{N}_{Bi}$	Número de Biot de transferencia de masa
$\bar{N}_{Fo}$	Número de Fourier de transferencia de masa
$\bar{f}$	Constante de la velocidad de difusión
$\bar{j}$	Coeficiente lag
α	Difusividad térmica
$\dot{m}$	Flujo de masa del componente B
c	Concentración del componente B,

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág
Figura 1.1	Diagrama esquemático del proceso de difusión molecular ….	6
Figura 2.2	Curva de Velocidad de Secado Vs Humedad……	30
Figura 3,1	Selección del Programa…….	86
Figura 3,2	Cálculo del Tiempo de secado……..	87
Figura 3,3	Gráfica Humedad libre Vs Tiempo ……..	89
Figura 3,4	Reporte de Tiempo Total de Secado ……..	91
Figura 3,5	Selección del alimento……	92
Figura 3,6	Cálculo de Tiempo de Deshidratación osmótica ……...	93
Figura 3,7	Selección de Forma de la muestra……..	94
Figura 3,8	Ayuda para Coeficiente de Difusión…….	95
Figura 3,9	Reporte de Deshidratación Osmótica ……	96
Figura 3,10	Cálculo de Tiempo de Deshidratación osmótica……	97
Figura 3,11	Ayuda para Coeficiente de Difusión ……	98
Figura 3,12	Tiempo de deshidratación osmótica ……	99
Figura 3,13	Reporte de Deshidratación Osmótica …….	100
Figura 3,14	Cálculo de Velocidad de Transferencia de un gas ……...	101
Figura 3,15	Ingreso de Permeabilidades y espesores ……..	102
Figura 3,16	Ayuda para Valores de Permeabilidades ……...	103
Figura 3,17	Velocidad de Transferencia del Gas a través del empaque …	104
Figura 3,18	Reporte de Velocidad de Transferencia del Gas……...	105

ÍNDICE DE TABLAS

Pág

Tabla 1 Coeficiente de Difusión Efectivo en Diferentes iones en en tejidos de cerdo …….. 17
Tabla 2 Permeabilidad al Vapor de Agua para Películas Plásticas ……63
Tabla 3 Permeabilidad a Gases en Películas Plásticas …… 65
Tabla 4 Procesos, Datos Experimentales y Validación ……....111
Tabla 5 Datos de características de la muestra …… 113
Tabla 6 Datos utilizados en el Secado…… 114
Tabla 7 Datos para Cálculo del Tiempo de Deshidratación Osmótica..... 115
Tabla 8 Datos para Cálculo de Velocidad de Transferencia de Vapor de Agua a través de empaques ……...116
Tabla 9 Comparación de Resultados ……118
Tabla 10 Porcentaje de error en calculo de tiempo de secado……119
Tabla 11 Porcentaje de error en calculo de Tiempo de deshidratación osmótica ……...……119
Tabla 12 Porcentaje de error en cálculo de velocidad de transferencia de Un gas a través del empaque ……...120
Tabla 13 Porcentaje de error promedio y Eficiencia del Simulador de Transferencia de masa ……....120

INTRODUCCION

La transferencia de masa en los sistemas alimenticios se produce por dos fases que contienen diferentes concentraciones locales. Por ejemplo cuando se conserva carne con sal comúnmente llamado salado, la sal se transporta desde la superficie hacia la carne por medio del proceso de transferencia de materia hasta alcanzar el equilibrio y conseguir una concentración uniforme. La materia se mueve de un lado a otro bajo la influencia de una diferencia o gradiente de concentración existente en el sistema.

Sin embargo, este proceso de trasferencia de masa es difícil de modelarlo matemáticamente en los alimentos ya que las ecuaciones que describen este proceso se basan en sistemas homogéneos, lo que es una limitante en el momento de aplicar dichas ecuaciones en los alimentos, ya que estos poseen diferentes formas, tamaños y estructuras.

Por lo tanto para obtener resultados efectivos se parte de ecuaciones semi-empíricas en las que se puede asumir que el proceso de transferencia de masa en alimentos se presenta como un sistema homogéneo.

Una de las maneras en que se puede asumir un sistema homogéneo es relacionando a los alimentos con formas geométricas características sean estas formas esféricas, cilíndricas, placas infinitas, etc las que permitirán facilitar el calculo de transporte de materia.

Este trabajo tiene el objetivo de presentar una herramienta predictiva en lenguaje Visual Basic.NET que proporcione una guía para poder calcular tiempos de secado y deshidratación osmótica de alimentos y velocidad de transferencia de gases a través del empaque.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES DE LA TRANSFERENCIA DE MASA

La transferencia de masa se refiere al transporte de materia el cual se produce en presencia de un cierto movimiento en el seno del fluido que depende tanto de las propiedades de la transferencia como de las características del fluido. (13,35)

Esta presenta una característica particular que es la de transferir una sustancia a través de otra a escala molecular, es decir dos fases que están en contacto con diferente composición, una de ellas la cual se

difunde, migra de una región de alta concentración a una región de baja concentración.

El mecanismo de transferencia de masa, depende de la dinámica del sistema en que se lleva a cabo. (32)

Hay dos mecanismos de transferencia de masa:

- **Molecular:**

  Si relacionamos la transferencia de materia con la transferencia de calor, podemos decir que la energía se transfiere de una región de alta temperatura a una región de baja temperatura debido al movimiento al azar de las moléculas del gas o del líquido. Similarmente, en la difusión molecular, la materia se transfiere de una región de alta concentración a una región de una baja concentración durante el movimiento al azar de las moléculas de la sustancia. (9, 18, 33)

  El proceso de transferencia molecular de masa, al igual que la transferencia de calor están caracterizados por el mismo tipo de ecuación general: (17)

$$Velocidad\ de\ un\ proceso\ de\ transferencia = \frac{Fuerza\ impulsora}{Resistencia} \quad \ldots(Ec.1.1)$$

La ecuación describe la velocidad de transferencia de masa, la cual depende de una fuerza impulsora que en este caso sería la diferencia de concentración, sobre una resistencia, lo que produce una dificultad para transferirse en el medio. Esta resistencia se la denomina Difusividad de masa ya que es una constante de proporcionalidad entre la velocidad de transferencia y la diferencia de concentraciones. (17, 32)

Entonces podemos definir que la difusión es el proceso por el cual la materia es transportada desde una parte de un sistema a otro como resultado de un movimiento molecular. (19)

En la Figura 1.1 se muestra esquemáticamente el proceso de difusión molecular Podemos observar que se produce una trayectoria desordenada que la molécula *A* puede seguir al difundirse del punto (1) al punto (2) a través de las moléculas de *B*. Si hay un número mayor de moléculas de *A* cerca del punto (1) con respecto al punto (2), entonces, y puesto que las moléculas se difunden de manera desordenada en ambas direcciones, habrá más moléculas de *A* difundiéndose de (1) a (2) que de

(2) a (1). La difusión neta de *A* va de una región de alta concentración a otra de baja concentración. (17, 32)

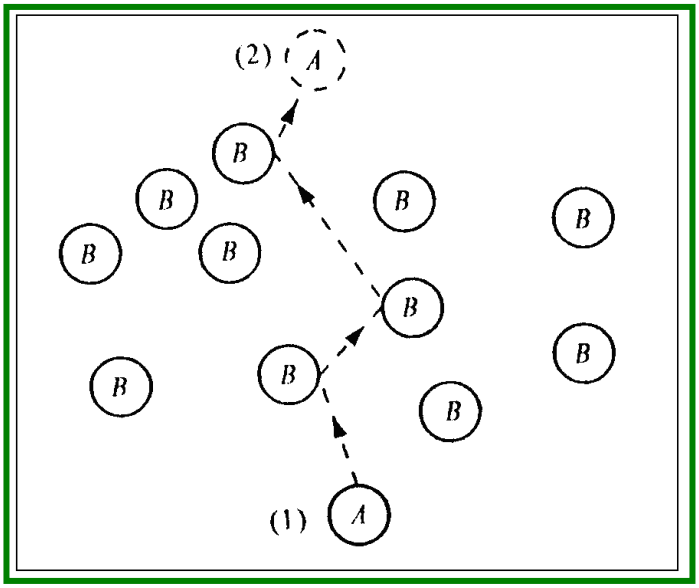


FIGURA 1.1 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL PROCESO DE DIFUSIÓN MOLECULAR

- **Convectiva:**

  Antes de definir a la transferencia de masa por convección es importante recordar lo que sucede en la transferencia de calor y es que en esta se debe de realizar una diferencia entre dos tipos de flujo.

  Cuando se utiliza algún dispositivo como por ejemplo una bomba externa para provocar el movimiento del fluido se conoce a este proceso como convección forzada. El otro tipo de proceso por el que puede existir un

movimiento del fluido se debe por una diferencia en densidad la cual es provocada por una diferencia de concentraciones o temperatura y se la conoce como convección libre o natural. (41)

Entonces podemos decir que la transferencia de masa por convección es la transferencia entre un fluido en movimiento y una superficie o entre los fluidos y esta transferencia depende tanto de las características dinámicas del fluido como de las propiedades del transporte.

La ecuación de rapidez para la transferencia de masa por convección (41)

$$\boxed{N_A = k_c \Delta c_A} \quad \text{..... (Ec. 1.2)}$$

Donde:

$N_A =$ es la transferencia de masa molar de la especie *A*

$\Delta c_A =$ es la diferencia entre la concentración en la superficie límite y la concentración promedio de la corriente del fluido de la especie que se difunde

$k_c =$ es el coeficiente convectivo de transferencia de masa.

1.1 Ley de Fick

La ley de Fick es una ley cuantitativa en forma de ecuación diferencial que describe diversos casos de difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico. (42)

En situaciones en las que existen gradientes de concentración de una sustancia, o de temperatura, se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogenizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura. El flujo homogenizador es una consecuencia estadística del movimiento de las partículas que da lugar al segundo principio de la termodinámica, conocido también como movimiento térmico causal de las partículas. Así los procesos de difusión pueden ser vistos como procesos físicos o termodinámicos irreversibles.

La termodinámica irreversible indica que si hay un movimiento relativo de moléculas con respecto a cada una será por un gradiente potencial termodinámico debido a la fricción de un cierto tipo de moléculas contra las otras. Debido a esto, los sistemas se

esfuerzan por alcanzar el equilibrio y el estado del equilibrio esta caracterizado por la igualdad en el potencial químico. (9)

Un gradiente en el potencial químico provocará un movimiento molecular del potencial químico más alto hacia el más bajo. Dicho concepto se puede aplicar en los sistemas químicamente definidos donde todas las moléculas se conocen, pero en sistemas complejos como algunos de los alimentos como por ejemplo la carne es muy difícil aplicarlo debido a que existe muy poca información sobre las moléculas y sus características. (9)

La primera ley de Fick en condiciones de estado estacionario para la difusión presenta el flujo de la humedad (j) en Kg/m^2s, la concentración local de humedad (C) en Kg/m^3, el espacio coordinado (x) en m y la difusividad de humedad (D) en m^2/s. (10)

$$\boxed{j = -D\frac{\partial C}{\partial x}} \quad \text{.....(Ec.1.2) (11)}$$

El signo negativo en la ley de Fick indica que el flujo de la materia está en la dirección en la que la concentración disminuye.

El fenómeno de difusión que en nuestro caso la aplicamos a los alimentos, no dependen de la estructura propia del sólido. El análisis de la difusión se realiza cuando el soluto o el flujo se dirigen hacia el alimento y este se disuelve para formar una solución más o menos homogénea con diferentes concentraciones.

Para poder realizar los cálculos y conocer como es el comportamiento del soluto dentro del alimento se utilizan ecuaciones simplificadas que nacen a partir de la ecuación general de Fick. Por ejemplo:

Para la difusión a través de una placa plana de espesor z da como resultado (17)

$$N_A = \frac{D_{AB}(c_{A1} - c_{A2})}{z_2 - z_1} \quad \text{.....(Ec.1.3)}$$

Donde; c_{A1} y c_{A2} que son las concentraciones en los lados opuestos de la placa.

Para otras formas sólidas, en el caso de una difusión radial a través de la pared de un cilindro de radio interno r_1 y radio externo r_2 con longitud L. La difusión de masa se define como: (17)

$$N_A = D_{AB}(c_{A1} - c_{A2}) \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \quad \text{.....(Ec.1.4)}$$

Y finalmente para el caso que el alimento presente forma esférica de diámetro D tenemos la siguiente ecuación:

$$N_A = \frac{2D_{AB}}{D}(c_{A1} - c_{A2}) \quad \text{.....(Ec.1.5)}$$

1.2 Segunda Ley de Fick

La Segunda Ley de Fick conocida también como la ecuación de difusión es una ecuación diferencial la cual nos indica como la concentración de una sustancia se difunde en función de la distancia y del tiempo. (16)

$$\frac{\partial c_A}{\partial t} = D_A \frac{\partial^2 c_A}{\partial x^2} \quad \text{.....(Ec.1.6)(21)}$$

Por medio de la segunda Ley de Fick se puede obtener modelos matemáticos semi-empíricos para diferentes operaciones como por ejemplo de secado y de deshidratación osmótica que sirven para la determinación del coeficiente de difusión efectivo en los alimentos con formas geométricas características tomando en consideración las condiciones del medio tanto para le pérdida de agua como para la ganancia de sólidos. (20, 23)

1.3 Transferencia de masa en sistemas alimenticios

En el área de Ingeniería en Alimentos, el fenómeno de transferencia de masa juega un papel muy importante en diferentes aplicaciones, como por ejemplo:

- En productos secos (pérdida de agua)
- Productos deshidratados osmóticamente (pérdida de agua – ganancia de solutos).
- Permeabilidades a través de materiales de empaque (pérdida o ganancia de gas en el empaque)

En el estudio de la transferencia de masa de los alimentos, existe un fenómeno que domina esta operación que es el movimiento del agua. En muchos procesos de conservación se requiere bajos contenidos de agua presente en el alimento. La actividad del agua en el alimento puede ser un indicador de la estabilidad y calidad del producto conservado.

A continuación se presentará una breve introducción de cómo se puede estudiar la transferencia de masa en diferentes operaciones sean estas de secado o deshidratación osmótica que intervienen en las carnes, pescados, frutas y vegetales.

1.3.1 Usos y Aplicaciones

Carnes

La transferencia de masa en las carnes se presenta en diferentes procesamientos como secado, conserva en vinagre, deshidratación, curado. Cuando se realiza el secado de carne, el agua deja la carne y migra al ambiente. Así mismo, durante las primeras etapas de la conservación de la carne en sal, la sal se transporta desde la superficie

hacia la carne. Durante el procesamiento de los productos seco-curados, el agua migra al ambiente mientras que la sal y otros compuestos se están distribuyendo en el producto. (9)

Los ejemplos antes mencionados, entre otros, hacen evidente que la transferencia de masa es un fenómeno común, importante en el proceso de carne industrializada.
La carne se considera ser un sólido coloidal, poroso y capilar, y el paso del agua en la carne se puede realizar por diferentes mecanismos. Cada uno de estos mecanismos es difícil de estudiar independientemente.

Por lo tanto, para poder interpretar la transferencia de masa en la carne se debe de considerar que está ocurriendo una difusión molecular el cual se relaciona con la ley de Fick que describe solamente observaciones experimentales.

Dependiendo de la cantidad de solutos y de agua la carne puede cambiar por ser un cuerpo no homogéneo y durante

el proceso de secado puede tener un rendimiento a los cambios estructurales. Por esta razón se considera todos estos diferentes efectos y se define a la difusividad en productos como la carne como un coeficiente efectivo (D_e) el cual explica que durante el proceso existe una pérdida de peso. (9) El término de Difusividad efectiva se utiliza como característica total del transporte, si se asume que en el sistema la masa es transportada por un gradiente de concentración.

El coeficiente de difusión efectivo se encuentra más pequeño en los contenidos de humedad más bajo, aumentando con humedad, y llegando a ser eventualmente constantes en humedades suficientemente altas, aunque para los materiales menos hidrofílicos la difusividad de la humedad disminuye por el incremento del contenido en agua, y en otras ocasiones el coeficiente de difusión efectivo puede parecer independiente de la concentración. (9)

Estudios anteriores demuestran que por ejemplo en carne de cerdo el contenido de NaCl modifica la difusividad del agua. La sal en la carne es un soluto que aunque se encuentra en pequeñas cantidades es muy importante ya que la mayoría de sus productos son salados y curados. (9)

Estudios demuestran que por efecto de la temperatura, el pH, diversas proporciones de grasa en la carne, el contenido proteico y la presencia de iones como el Cl^- y el Na^+ pueda provocar un cambio del coeficiente de difusividad efectivo. En la tabla 1.1 se presenta coeficientes de difusión efectivo de diferentes iones en tejidos de cerdos.

TABLA 1

COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVO DE DIFERENTES IONES EN TEJIDOS DE CERDO

Tipo de Tejido	De NaCl (xE-10) m2/s	°T (°C)	Proceso de Salado
Carne de Cerdo Cruda	1.2	-2	Salmuera
	330.0	2 a 4	Sal en grano
	2.3	1 a 4	Sal en grano
	2.1	2	Sal en grano
	1.8	3.2	Salmuera
	2.2	5	Salmuera
Salchicha De Cerdo	8.5 a 13.6	55	
	8.8 a 13.8	55	
Espalda de Cerdo con Grasa	0.1	-2	
	0.3	5	Salmuera

Fuente: Comaposada Joseph, Sorption Isotherms and Water Diffusivity in Muscles of Pork Ham at Different NaCl Contents, 1999 (9)

Pescados

En productos también perecibles como el pescado existe un proceso en el cual se puede realizar un estudio de la operación de transferencia de masa que es el Salado; esta es una técnica de preservación muy antigua debido a la disponibilidad en el proceso y es muy conveniente ya que no presenta altos costos, asegura la estabilidad del producto a temperatura ambiente desarrollando en el

pescado características sensoriales aceptables en el sabor, textura y color.

El salado puede ser estudiado como una operación de deshidratación osmótica ya que el procedimiento de esta técnica se basa en la inmersión del pescado en una solución de sal concentrada en un cierto tiempo permitiendo la salida de humedad y la infiltración del soluto en el tejido fino del pescado.

El comportamiento típico del salado del pescado puede describirse en 2 pasos(39, 29):

- Durante la primera etapa de la DO, el músculo pierde agua drásticamente por la pérdida rápida del agua inicial. Las fibras musculares son colapsadas por la presión atmosférica y conduce al sistema a un pseudo-equilibrio, en el cual el tejido pierde mayor cantidad de agua .
- En la segunda etapa se relajan las fibras musculares, lo que permite un flujo hacia el interior de una cierta

cantidad de solución osmótica hasta alcanzar el verdadero equilibrio. Cuando la concentración de sal en la fase acuosa del tejido es igual al de la solución finaliza la penetración de sal dentro del músculo.

Con el aumento de la pérdida de agua y la ganancia del soluto se reduce la actividad de agua del alimento y por lo tanto mejora la conservación del producto. (38)

Frutas y vegetales

Las frutas y vegetales se caracterizan por su alto contenido inicial de humedad, siendo considerados productos altamente perecederos. Por eso, se deben buscar alternativas que posibiliten la industrialización del producto y la reducción de los altos índices de desperdicio. (16)

La transferencia de agua en las frutas y vegetales es el mecanismo más importante en el que podemos estudiar el fenómeno de transferencia de masa ya que podemos

destacar que para que estas puedan tener mayor tiempo de vida útil y para que nos presente menos costos de inversión se debe de eliminarla.

Las posibles tecnologías que pueden ser aplicadas en las frutas son el secado, congelado, enlatado, etc, pero previo a estas operaciones se puede realizar una deshidratación osmótica como pre-tratamiento. La deshidratación osmótica resulta ventajas muy buenas en estos procesos por lo que es un método de conservación factible de adaptarse en países que produzcan frutas tropicales que normalmente se consumen frescas por ser productos perecederos y que al someterse a tratamientos de proceso, mínimo puedan conservarse y exportarse manteniendo muchas de sus propiedades.

Antes de realizar un secado convencional se puede utilizar una deshidratación osmótica que va a incrementar la estabilidad de los pigmentos por la ganancia de sólidos por medio de la acción protectora de

los sacáridos y de esta manera se puede eliminar o reducir el uso de dióxido de azufre. (21) Además este proceso da muy buenos resultados ya que aumenta el rendimiento de los productos terminados y aumenta la capacidad de los secadores. Por lo tanto va haber un ahorro de energía y de la misma manera se mejora la calidad de los productos naturales, especialmente aquellos con características termolábiles. (33)

Al utilizar la deshidratación osmótica previa a la congelación esta presenta una ventaja ya que se remueve una gran cantidad de agua lo cual muestra un beneficio económico al proceso ya que se reduce el calor latente de congelación por lo tanto habrá menor demanda energética y además habrá mayor velocidad de congelación y existirán menores pérdidas por goteo al descongelar y a su vez habrá una reducción del volumen y del peso de los productos congelados al almacenar y transportar. (21)

Una de las ventajas de poder realizar una deshidratación osmótica en las frutas es que son las materias primas ideales para poder disminuir cambios en sus características sensoriales por presentar contenido de sólidos muy favorables y por su estructura celular. (11)

Actualmente el uso del aire caliente en los vegetales sigue siendo un método de deshidratación comúnmente usado en la industria alimentaria. Las ventajas de los vegetales deshidratados es que se reduce el contenido de humedad, las reacciones que deterioran al alimento y se previene el crecimiento de microorganismos. Además reducen el peso y volumen lo que es importante de considerar en los costos del empaque, almacenamiento y transporte. (34)

Las altas temperaturas de trabajo pueden acelerar el proceso de secado pero además puede presentar desventajas ya que esta variable afecta las propiedades organolépticas del producto, su valor nutricional y se

pueden presentar los fenómenos de endurecimiento y encogimiento. (34)

1.4 Justificación

Las ecuaciones que describen la transferencia de masa se basan en sistemas homogéneos y ese es un problema en el momento de aplicar dichas ecuaciones en los alimentos, ya que estos presentan sistemas heterogéneos que poseen diferentes estructuras, formas y tamaños lo cual es de mucha importancia tomarlo en consideración en el estudio de la transferencia de masa.

Si por ejemplo pensamos en una manzana y analizamos lo que contiene nos damos cuenta que su cáscara, la pulpa, el centro y sus semillas presentan diferentes estructuras lo cual va a dificultar en el cálculo de uno de las variables del fenómeno de difusión que sería el coeficiente de difusividad.

Por lo tanto para obtener resultados efectivos se asume siempre que el proceso de transferencia de masa en alimentos se presenta

como un sistema homogéneo para de esta manera facilitar el cálculo de transferencia de masa a partir de ecuaciones semi-empíricas.

De la misma manera los alimentos no presentan una geometría específica lo cual dificulta el cálculo de la velocidad de transferencia de la solución.

Para poder describir como es el proceso de transferencia de masa que se produce en diferentes procesos en los alimentos se asume también que ellos presentan una geometría específica para poder facilitar el cálculo de transporte de materia como por ejemplo:

- Forma esférica
- Forma placa infinita
- Forma cilíndrica infinita

Luego de haber analizado estos importantes puntos que se dan en los sistemas alimenticios, esta tesis tiene el objetivo de presentar una propuesta que se basa en una herramienta predictiva en

lenguaje “ Visual Basic .NET ” que pueda facilitar el cálculo de tiempos de deshidratación de alimentos y velocidad de transferencia de gases a través del empaque que son tomados en consideración en la transferencia de masa en procesos como secado, deshidratación osmótica y permeabilidades de materiales de empaques.

CAPITULO 2

2. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRAFICA

Una vez revisado los fundamentos de la transferencia de masa en el capítulo 1, se podrá estudiar mediante investigación bibliográfica de textos y revistas científicas modelos matemáticos de transferencia de masa utilizados en operaciones de secado, deshidratación osmótica y además en permeabilidades de materiales de empaques para luego armar un banco de datos para que estos sean analizados y utilizados en la herramienta computacional utilizando el lenguaje Visual Basic .NET.

2.1 Modelos Matemáticos aplicados en sistemas alimenticios

A continuación se estudiará la importancia de las 3 operaciones de transferencia de masa en los sistemas alimenticios que son:

- Secado
- Deshidratación Osmótica
- Permeabilidad de materiales de empaque

2.1.1 Secado

El secado es un proceso fundamental en el estudio de la transferencia de masa. (10) La conservación de alimentos mediante secado es una operación imprescindible en la industria de producción de alimentos. La extracción del agua de estos productos tiene la ventaja de inhibir el crecimiento microbiano, bajando los costos de envasado, almacenamiento y de transporte.

El proceso de secado puede llevarse a cabo por diversos sistemas, pero la elección va a depender siempre de la

naturaleza del producto, forma y calidad requerida, costo del procesamiento y condiciones de operación.

Una de las ventajas que presenta el secado es que por medio de este se obtiene mejoras en las condiciones organolépticas, fisicoquímicas y microbiológicas por lo que por medio de esta operación se puede reducir total o parcialmente el volumen del agua libre que se encuentra presente en el alimento; es por esta razón que la operación de secado permite un período largo de almacenamiento y comercialización. (16)

Los cálculos generalmente usados en la Ingeniería para operaciones como el secado se convierten en complicados y complejos ya que se produce una simultánea transferencia de calor y transferencia de masa (agua). (17, 33)

Para poder realizar un modelo en el secado se debe de tener presente que no solo se produce una difusión dentro

del alimento si no que también existe una transferencia de masa desde la superficie del alimento al medio ambiente lo cualdepende de las condiciones del flujo de aire (temperatura, humedad, velocidad del aire, presión) y de la geometría del material. La transferencia de masa es caracterizada por el coeficiente de la transferencia de masa k_y, definido por el siguiente balance de masa, (9)

$$\rho V \frac{dX}{dt} = -k_y A(Y - Y^*) \quad \text{.....(Ec.2.1)}$$

Donde:

$\rho =$ densidad

$V =$ volumen

$X =$ contenido de agua

$t =$ tiempo en seg

$k_y =$ coeficiente de la transferencia de masa

$A =$ área

$Y =$ contenido de agua en el aire

$Y^* =$ contenido de agua en el aire en equilibrio con la superficie del producto.

Curva de secado

La relación del contenido de humedad del material versus el tiempo se conoce como la curva cinética de secado. En la figura 2.2 se puede observar dos partes de la curva de secado en las que muestra un período de velocidad constante y un período de velocidad decreciente, aunque realmente en la teoría existen tres etapas del proceso de secado y estas se describen a continuación.

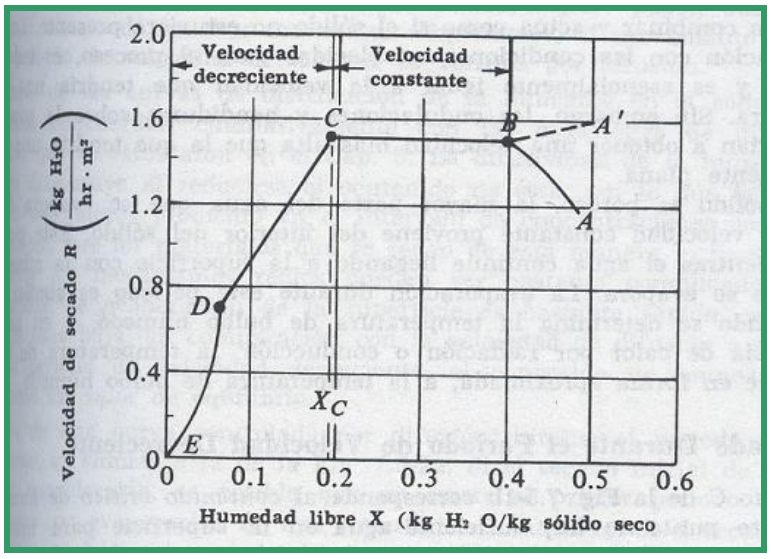


FIGURA 2.2

CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO VS HUMEDAD

Etapa A-B y A'-B

Tiene muy poca duración es la que inicialmente el sólido se calienta y en la que su evaporación no tiene importancia su cantidad y su intensidad. El sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que alcance la temperatura de equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Y este equilibrio es igual a la temperatura del bulbo húmedo del gas. (9)

Etapa B-C

Se la conoce como Período de velocidad de secado constante donde predominan las condiciones externas y además se evapora el agua libre del sólido. En este periodo el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. (3) Al principio la superficie del sólido se encuentra muy mojada y en ella hay una película de agua continua que está combinada la cual actúa como si el sólido no estuviera presente. (17)

Si el gas tiene un estado estacionario y dependiendo de las propiedades y de su velocidad se mantendrá constante. Si el gas se enfría la velocidad de secado decrece pero se sigue manteniendo en este período pero dependiendo de factores externos del sólido. La temperatura del sólido es igual a la temperatura del bulbo húmedo. (10)

Para deducir la ecuación de secado a velocidad constante se desprecia la presencia de la transferencia de calor por conducción o radiación. Suponiendo que la transferencia de calor solo se verifica del gas caliente a la superficie del sólido por convección tenemos la siguiente ecuación: (15)

La velocidad de transferencia convectiva de calor q en W (J/s) desde el gas a T °C a la superficie del sólido a Tw °C, donde $(T - Tw)$ °C , es

$$\boxed{q = h(T - Tw)A} \text{.....(Ec 2.2)}$$

Donde,

h = coeficiente de transferencia de calor W/m^2

A = área de secado expuesta en m^2

Etapa C-E

A esta etapa se la conoce como Período de velocidad de secado decreciente donde predominan las condiciones internas o simultáneamente las características internas y externas . En este periodo se evapora el agua ligada del sólido el cual tiene un comportamiento higroscópico. En esta etapa debido a que disminuye la velocidad de secado el cual rompe el equilibrio térmico que es el que mantiene la temperatura estable, la temperatura del material sobrepasará la del bulbo húmedo. La humedad a secar será la extraída del interior del sólido y consecuente a esto se dará un incremento de la resistencia a la evaporación. (10)

Es muy importante determinar en los materiales a secar un parámetro que es la humedad critica que es la que divide el periodo de velocidad constante con el período de velocidad decreciente la cual va a depender de la relación de secado en el primer período y del tipo de material.

Además la humedad crítica indica que en la superficie del sólido no hay suficiente agua para poder mantener una película continua. Por lo tanto la superficie del sólido no se encuentra en este punto totalmente mojada ya que esta humedad comienza a disminuir durante el proceso de velocidad decreciente hasta que la superficie del sólido permanezca seca totalmente. (9, 17)

Dependiendo de las características del sólido a secar la curva del segundo período va a cambiar es decir no todas las curvas de secado van a presentar la misma forma. Existen curvas típicas de sólidos capilar-porosos con grandes superficies específicas y de pequeñas superficies específicas así como de cuerpos coloidales. (10)

Por medio de la curva de secado podemos estudiar un método que por medio de la misma se puede relacionar a la transferencia de calor con la transferencia de masa y de esta manera poder realizar predicciones de los cálculos de coeficientes de transferencia.

A continuación se presentará diferentes modelos de transferencia de masa que pueden ser aplicados en la operación de Secado y de esta manera analizar cada uno de ellos para así poder seleccionar el modelo a utilizar en la herramienta predictiva ya mencionada en el capítulo 1.

- **Primer Modelo de transferencia de masa aplicado a secado de alimentos**

Esta primera alternativa de modelo de transferencia de masa se basa en el cálculo del tiempo total de secado a partir de la curva de secado en los períodos de velocidad constante y el período decreciente. En este modelo se estudiará la pérdida de agua del producto. Cabe destacar que durante el periodo decreciente la humedad en la superficie está en equilibrio con el medio de secado y no hay agua libre y es posible que la eliminación de humedad sea muy pequeña sin embargo el tiempo requerido puede ser largo. (20)

Tiempo en secado de velocidad constante

Cuando se opera en estado estacionario, la velocidad de transferencia de masa equivale a la velocidad de transferencia de calor. (20)

Además de suponer que la transferencia de calor solo se verifica del gas caliente a la superficie del sólido por convección. Podemos suponer también que la transferencia de calor se verifica de la superficie del sólido al gas por transferencia de masa. Por lo tanto es posible escribir ecuaciones similares a las obtenidas para la temperatura del bulbo húmedo. (20)

Entonces partiendo de la ecuación 2.2 podemos obtener la ecuación del flujo específico del vapor de agua desde la superficie que corresponde a,

$$\boxed{N_A = k_y\,(y_w - y)} \quad \text{..... (Ec 2.3)}$$

Donde,

$y_w =$ Fracción mol del vapor de agua en la superficie

$y =$ Fracción mol del vapor de agua en el gas

Si se establece como aproximación que,

$$y \cong \frac{HM_B}{M_A} \quad \text{.....(Ec. 2.4)}$$

Donde,

M_B = Peso molecular del aire

M_A = Peso molecular del agua

Si utilizamos la aproximación de la ecuación 2.4 y la sustituimos en la ecuación 2.5 entonces tenemos que, (16)

$$N_A = k_Y \frac{M_B}{M_A} (H_W - H) \quad \text{..... (Ec.2.5)}$$

Donde,

$H_w =$ Humedad de la superficie

$H =$ Humedad del gas

La cantidad de calor necesario para vaporizar N_A kg mol / m^2 de agua despreciando los pequeños cambios de calor sensible, es,

$$q = M_A\, N_A\, \lambda_W A \quad \text{.....(Ec. 2.6)}$$

Donde,

$\lambda_w =$ Es el calor latente a T_W en J/Kg

Si se igualan las ecuaciones 2.2 y 2.3 y sustituyendo N_A por la ecuación 2.5, es posible calcular la velocidad de secado R_C (kg de agua/ hm^2) mediante la ecuación de transferencia de calor $q = h(T - Tw)A$ o la ecuación de transferencia de masa

$$R_C = \frac{q}{A\lambda_W} = \frac{h(T - T_W)}{\lambda_W} = k_y M_B (H_W - H) \quad \text{.....(Ec. 2.7)}$$

Para predecir el valor Rc se debe de conocer el coeficiente de transferencia de calor por medio de dos condiciones:

(17)

- Si el aire fluye paralelo a la superficie de secado se puede aplicar la ecuación 2.8

  Como la forma del borde de la entrada de la superficie de secado causa más turbulencia, es posible calcular la siguiente expresión para una temperatura del aire de 45 a 150 °C y una velocidad de masa *G* de 2450 – 29300 kg/ hm^2 o una velocidad de 0.61 a 7.6 m/s (17)

$$\boxed{h = 0.0204 G^{0.8}} \text{.....(Ec. 2.8)}$$

  - Cuando el aire fluye perpendicularmente a la superficie para un valor de *G* de 3900 – 19500 kg /hm^2 o una velocidad de 0.9 – 4.6 m/s se utiliza la ecuación 2.9

$$\boxed{h = 0.0128 G^{0.8}} \text{..... (Ec 2.9)}$$

  Para calcular el tiempo en el período de velocidad constante a partir de ecuaciones de transferencia de calor y transferencia de masa, podemos sustituir la ecuación 2.7

en la ecuación obtenida por el método de la curva de secado para el periodo de velocidad constante que es: (17)

$$t = \frac{L_S}{AR_C}(X_1 - X_2) \quad \text{.....(Ec 2.10)}$$

Tiempo de secado de velocidad decreciente

Durante este período la velocidad de secado no es constante, si no que disminuye cuando el secado pasa por la zona de contenido crítico de humedad libre.

Para poder calcular el tiempo de velocidad decreciente se lo puede realizar mediante la integración gráfica de la ecuación 2.12 para cualquier forma de la curva de secado decreciente, trazando 1/R en función de X determinando el área bajo la curva.

$$t = \frac{Ls}{A}\int_{x_2}^{x_1}\frac{dx}{R} \quad \text{..... (Ec.2.12)}$$

En el período de velocidad decreciente se pueden presentar casos especiales en donde el tiempo de secado puede integrarse analíticamente.

- **Segundo Modelo de transferencia de masa aplicado a secado de alimentos**

Como en varios tipos de secado, el calor es transferido por convección. Si se parte de la ecuación 2.2 (velocidad de transferencia de calor por convección) esta es relacionada con otra ecuación de transferencia de masa que muestra como se transporta el agua evaporada y tenemos la siguiente expresión: (19)

$$q = h(T - Tw)A \quad \text{.....(Ec 2.2)}$$

$$m = k_g \frac{M_o P}{RT} \ln \frac{P - p}{p_x - p_w} \quad \text{.....(Ec. 2.13)}$$

Donde,

m = Flujo de velocidad de masa (Kg/ m^2s)

$k_g =$ Coeficiente de transferencia de masa (m^2/ s)

$M_o =$ Peso molecular del agua (Kg /Kmol)

$P =$ Presión total (N /m^2, Pa)

$R =$ Constante de gas (Ws/ m, K)

$T =$ Temperatura (K, °C)

$p_x =$ Presión parcial (N /m^2, Pa)

$p =$ Presión parcial del agua en el aire (N /m^2, Pa)

$p_w =$ Presión parcial del agua en el alimento (N /m^2, Pa)

La presión parcial del agua en el aire se la podrá determinar mediante la tabla termodinámica de vapor saturado la cual se muestra en el Anexo D. De la misma manera para determinar la presión parcial del agua en el alimento se utilizará la misma tabla termodinámica de vapor saturado ya que como el alimento se encuentra húmedo, se asume que su superficie esta saturada.

- **Tercer Modelo de transferencia de masa aplicado a secado de alimentos**

El tercer modelo de transferencia de masa aplicado a secado se basará en un método que ha sido probado en el estudio de los sólidos porosos como por ejemplo en frutas y carnes para el tiempo de secado y se trata de una ecuación que toma en consideración el período de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente donde todos los parámetros que se tomen en consideración en esta ecuación se los obtendrá a partir de la curva cinética de secado. (10)

$$t = \frac{1}{k(x_0 - x_{eq})} \ln \frac{(x_0 - x_i)(x_{leq} - x_{eq})}{(x_0 - x_{leq})(x_i - x_{eq})} \quad \text{..... (Ec. 2.14)}$$

Donde,

$t =$ Tiempo

$k =$ coeficiente de velocidad de secado (min-1)

$x_i =$ humedad del material en un instante de tiempo (kg/kg)

$x_{eq} =$ humedad de equilibrio (kg/kg)

$x_{1eq} =$ contenido de humedad del material durante el período inicial de secado o humedad crítica (kg/kg)

$x_0 =$ humedad inicial del material (kg/kg)

Novoa (1995) estima el coeficiente de transferencia de masa mediante la expresión:

$$K_g = \frac{(ms * k)(x_i - x_{eq})}{A} \quad \text{.....(Ec 2.15)}$$

Donde.

$K_g =$ coeficiente de transferencia de masa (kg/m2 · min)

$ms =$ peso del material seco(kg)

- **Cuarto Modelo de transferencia de masa aplicado a secado de alimentos**

En el secado existen varias dificultades en el momento de analizar los datos una de ellas corresponde a que no hay una distribución uniforme de humedad en el sólido. Si asumimos que en el secado convectivo existe una

distribución inicial uniforme de humedad y que la superficie está en equilibrio con el medio de secado, podemos utilizar la siguiente ecuación : (20)

$$\frac{c - c_e}{c_0 - c_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \exp(-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{L^2}) \quad \text{.....(Ec.2.16)}$$

Donde

$c =$ Contenido de humedad (kg de agua/kg de sólido seco, base seca);

$c_e =$ Contenido de humedad de equilibrio (kg de agua/kg de sólido seco, base seca);

$c_0 =$ Contenido de humedad inicial (kg de agua/kg de sólido seco, base seca);

$D_{ef} =$ Difusividad efectiva (m^2/s)

$t =$ Tiempo (s)

$L =$ Espesor de la placa (m)

Usualmente se puede realizar una simplificación utilizando una solución asintótica que consiste en reducir la serie infinita al primer término ya que los términos superiores se hacen muy pequeños en tiempos largos y se obtiene la siguiente expresión: (20)

$$\frac{c - c_e}{c_0 - c_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{\pi^2 D_{ef} t}{L^2} \right) \quad \text{.....(Ec.2.17)}$$

Debido a la simplicidad de la ecuación 2.17 no describe de una manera más precisa el estudio de la relación que puede existir entre la transferencia de calor con la transferencia de masa ya que el modelo presentado ha sido utilizado para describir el secado en capa delgada pero es muy útil para poder estimar o predecir tiempo de secado y además utilizarlo como una ecuación cinética diferencial para el modelado y simulación de secadores.

Además la ecuación 2.17 describe la evolución de la humedad media temporal de un sólido sometido a una operación de secado que es formada a partir de la segunda ley de Fick y toma en consideración lo siguiente:

- Geometría de placa plana infinita
- Transferencia unidireccional de masa

- La resistencia externa convectiva es mucho menor que la resistencia difusional interna, lo que permite suponer un contenido de agua en la interfase constante e igual al valor de equilibrio con el aire circundante
- El coeficiente efectivo de difusión constante
- Distribución inicial de humedad uniforme
- Condiciones externas (velocidad, temperatura y humedad relativa del aire) constantes
- No se considera retracción del sólido debido al cambio de volumen durante el secado
- Difusión de sólo un componente a través del sólido

2.1.2 Deshidratación Osmótica

Como fue mencionado en el Capítulo 1 la deshidratación osmótica es un proceso de pre- tratamiento que se presenta como una tecnología alternativa. Usualmente se utilizan soluciones de carbohidratos o sales de bajo peso molecular y en dicha solución el sólido es sumergido y se verifican tres fenómenos de transferencia de masa que son: (20)

- El flujo de agua desde el alimento a la solución

- La transferencia de soluto desde la solución al alimento (que hace posible la incorporación de componentes fisiológicamente activos, preservativos y saborizantes)
- La transferencia de solutos del propio alimento hacia la solución de impregnación, siendo este último fenómeno cuantitativamente despreciable en comparación con los dos primeros

Mediante este proceso se pueden reducir altos costos de producción porque se la utiliza generalmente antes de un proceso de secado o congelado para de esta manera poder mejorar características sensoriales en diferentes productos.

El paso del agua desde el alimento a la superficie del producto se ve favorecida por el uso de la solución osmótica que debido a esta, la actividad del agua va a disminuir en el producto. Es por esta razón que se debe de tomar en cuenta factores como: la concentración de la solución, características del producto, el costo de los solutos, el peso molecular de los solutos y los agentes osmóticos más

utilizados comúnmente como por ejemplo la sacarosa que es para frutas y cloruro de sodio para vegetales, pescado y carnes . (21)

Existen diferentes métodos en los cuales podemos calcular el tiempo requerido en el que un producto puede alcanzar las características necesarias para que este pueda conservarse y además podemos calcular la pérdida de agua y lo que se ha ganado de solutos. A continuación presentaré diferentes alternativas en las que se puede estudiar la transferencia de masa por medio de la deshidratación osmótica.

- **Primer Modelo de transferencia de masa aplicado a la deshidratación osmótica de alimentos.**

Como antes fue mencionado existen tres fenómenos de transferencia de masa que se dan durante el proceso de deshidratación osmótica. Los principales fenómenos macroscópicamente son evidenciados por medio de la

ganancia de solutos y la pérdida de agua definiéndose como: (23)

La cantidad de agua que se difunde desde la fruta hacia la solución y la cantidad de solutos que se desplaza desde la solución hacia la fruta menos la cantidad de sólidos de fruta que se difunden hacia la solución, Siendo estos sólidos despreciables.

$$PA = \frac{(M_0 - m_0) - (M - m)}{M_0} \quad \text{..... (Ec. 2.18)}$$

$$GS = \frac{m - m_0}{M_0} \quad \text{.....(Ec. 2.19)}$$

Donde,

$PA =$ Pérdida de agua

$GS =$ Ganancia de solutos

$M_0 =$ Masa inicial de fruta antes de ser sometida al tratamiento osmótico

M = Masa de fruta luego del tratamiento osmótico

m_0 = Masa seca inicial de la muestra de fruta

m = Masa seca de la fruta luego del tratamiento osmótico

- **Segundo Modelo de transferencia de masa aplicado a la deshidratación osmótica de alimentos.**

Existen factores muy importantes que tienen que ser tomados en consideración para poder realizar el estudio de la deshidratación osmótica en los alimentos que son la geometría del producto y las condiciones que se necesitan para describir las condiciones en la superficie del producto. (33)

Se han desarrollado gráficos de curvas por medio de experimentos para poder facilitar el cálculo del tiempo en estado no estacionario en la que una solución puede difundirse a través de un producto. Una de las herramientas que es el gráfico presentado por Treybal (1968) y es presentado en el anexo A, el cual presenta un cociente de

concentración contra el cociente sin dimensiones para tres geometrías estándares: (33)

- placa infinita
- cilindro infinito
- esfera

Al usar el gráfico, el cociente de concentración contiene la concentración de masa media C_{ma}, en cualquier tiempo t, la concentración del componente que se difunde en el medio rodeando el alimento, C_m, y la concentración inicial del componente que se difunde dentro del alimento, C_i. (33)

$$\frac{C_{ma} - C_m}{C_i - C_m} \quad \text{..... (Ec. 2.20)}$$

Luego de haber obtenido el valor dado por medio del gráfico este se lo iguala en la siguiente ecuación para finalmente poder calcular el tiempo requerido que se necesita para llegar a una concentración final deseada.

$$\frac{Dt}{d_c^2}$$ ..... (Ec. 2.21)

En la transferencia de masa como en la transferencia de calor la característica de la dimensión, d_c, depende de la geometría del alimento: la mitad del espesor para la placa infinita, radio en el cilindro infinito, y el radio de la esfera. Además, el gráfico asume que las condiciones de límite representarían resistencia insignificante a la transferencia de masa en la superficie del alimento, con respecto a la difusión dentro del mismo. Ésta es una asunción razonable en la mayoría de los usos del alimento desde las difusividades de masa, porque los líquidos o los gases dentro de las estructuras sólidas del alimento tienen magnitudes pequeñas con respecto a la transferencia de masa de los gases o de los líquidos en el límite.

- **Tercer Modelo de transferencia de masa aplicado a la deshidratación osmótica de alimentos.**

Una alternativa más en la que se puede calcular el tiempo de transferencia de masa en estado no estacionario por medio de la deshidratación osmótica puede ser relacionando la ecuación 2.20 con el números sin dimensiones de Biot y Fourier y podemos obtener una nueva ecuación para determinar el tiempo en que un producto puede deshidratarse osmóticamente. (33)

$$\frac{c - c_m}{c_i - c_m} = f(\bar{N}_{Bi}, \bar{N}_{Fo}) \quad \text{.....(Ec 2.22)}$$

Donde,

$\bar{N}_{Bi} =$ Número de Biot de transferencia de masa

$\bar{N}_{Fo} =$ Número de Fourier de transferencia de masa

La solución de la ecuación 2.22 puede describir la manera en que esta siendo distribuida la concentración de la solución dentro del alimento, la cual se basa en el

coeficiente convectivo de transferencia de masa en los límites del alimento y además de la difusividad de masa del gas o del líquido dentro de la estructura del mismo.

Una relación más cercana como el que es utilizado en el gráfico obtenido por Treybal (1968), el cual se basa en el transporte térmico, cuando está aplicada a la transferencia de masa, la expresión básica es la ecuación de la velocidad de difusión:

$$\log(c_m - c) = -\frac{t}{\bar{f}} + \log[\bar{j}(c_m - c_i)] \quad \text{.....(Ec. 2.23)}$$

Donde la constante de la velocidad de difusión, $\bar{f}$, representa el tiempo requerido para un cambio de un ciclo log en el gradiente de concentración, y el coeficiente lag, $\bar{j}$, describe la región de no linearilidad en la relación entre el gradiente de concentración y el tiempo durante las etapas iniciales de la difusión.

Los coeficientes $\bar{f}$ y $\bar{j}$ pueden ser calculados mediante el número de Biot por medio de la ecuación 2.24

$$\boxed{N_{BI} = \frac{h\, dc}{k}} \quad \text{..... (Ec. 2..24)}$$

Donde,

$d_c =$ Una dimensión característica

$h =$ Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W / m^2 K)

$k =$ Conductividad Térmica (W /m K)

Luego de haber calculado el número de Biot los valores de $\bar{f}$ y $\bar{j}$ finalmente son obtenidos mediante el gráfico de Pflug et al (1965) los cuales se muestran en los anexos B y C respectivamente y mediante a ellos se podrá obtener valores que se necesitan en la ecuación de velocidad de difusión.

Según Singh (2001), asume que el número de Biot es mayor o igual a 40 por lo que la resistencia en la transferencia de masa es insignificante ya que la concentración es medida en la superficie del sólido.

Luego de haber obtenido dicho valor este es igualado en la ecuación 2.25 para de esta manera poder obtener la constante de la velocidad de difusión $\bar{f}$ y así poder utilizarlo en la ecuación 2.23.

$$\frac{\bar{f}\,D}{d_c^2} \qquad \text{.....(Ec.2.25)}$$

Usando el gráfico del anexo B se podrá obtener la magnitud del coeficiente $\bar{j}$ que está influenciado por el numero de Biot de transferencia de masa, como se ilustra en los gráficos de los anexos C y D.

- El gráfico del anexo C del factor lag promedio, j_m, en la localización que define la concentración de masa media

que es influenciado por el número de Biot de transferencia de masa de una esfera, un cilindro infinito y una placa infinita.

- El gráfico del anexo D describe la relación del numero de Biot de la transferencia de masa en el coeficiente lag, j_c, en el centro geométrico de una esfera, cilindro infinito y una placa infinita.

Número de Fourier

El número sin dimensiones que expresa el tiempo se lo conoce como el Número de Fourier y se lo define de la siguiente manera:

$$N_{Fo} = \frac{\alpha t}{d_c^2} \quad \text{..... (Ec. 2.26)}$$

Donde,

$\alpha =$ Difusividad térmica (m^2/ s)

$t =$ tiempo (s)

Para el caso de los valores de Fourier, solamente se puede utilizar valores Fo > 0.2, debido que la ecuación 2.25 fue obtenida usando el primer término de las soluciones de la serie.

A partir de las magnitudes de la difusividad de masa y de las características del producto es analizada la magnitud de la velocidad de difusión constante.

Mediante los gráficos que son una posible alternativa de modelo para calcular tiempos de deshidratación osmótica nos permitirá predecir el tiempo requerido para la concentración media total de un alimento, o para la concentración en el centro del producto. (33)

- **Cuarto Modelo de transferencia de masa aplicado a la deshidratación osmótica de alimentos.**

El cuarto modelo de transferencia de masa que se va a proponer es el desarrollado por Crank el cual es un

procedimiento empírico para ajustar los datos experimentales que consiste en un grupo de soluciones de la ley de Fick para condiciones iniciales y límite y para diferentes geometrías y es el modelo más conocido para poder representar el mecanismo difusional. (27)

Por medio de este modelo se pueden calcular Difusividad efectiva del soluto y del agua, simulando con experimentos y resolviendo ecuaciones numéricamente y analíticamente, lo cual es difícil de suponer porque presentan grandes limitaciones.

Para propósitos prácticos las limitaciones del modelo de difusión pueden ser:

- La transferencia de masa es unidireccional por lo que se asume un cuerpo semi-infinito
- Se requiere una relación disolución / alimento muy grande por lo que se asume que el agente osmótico es un medio semi-infinito.

- Solo hay soluciones para láminas, cubos y esferas, cilindros por lo tanto se requieren técnicas matemáticas para formas irregulares.
- Experimentalmente se debe de determinar el punto de equilibrio.
- Se asume que sólo se presenta el mecanismo de difusión para la extracción de agua.
- Se desprecia el encogimiento y la resistencia externa
- No hay efectos de sólidos ganados ni de solutos perdidos sobre la pérdida de agua.

La solución que presenta Crack (1964) para láminas semi.infinitas se presentan en las siguientes ecuaciones:

- Para tiempos largos

$$\left(\frac{M_0^J - M_I^J}{M_0^J - M_\infty^J}\right) = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left\{-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 F_o}{4}\right\} \quad \text{..... (Ec. 2.27)}$$

Donde el número de Fourier (F_o) esta dado por:

$$F = D_e^j \frac{t}{l^2} \quad \text{.....(Ec. 2.28)}$$

- Para tiempos cortos

$$\left(\frac{M_0^J - M_I^J}{M_0^J - M_\infty^J}\right) = 2\left(F_o\right)^{0.5}\left\{\pi^{-0.5} + 2\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n \text{ierfc}\frac{n}{F_o}\right\} \quad \text{.....(Ec. 2.9)}$$

ierfc: integral de la función de error complementaria

Este modelo puede simplificarse usando el primer término de la serie, y obtenemos las siguientes ecuaciones:

- Para tiempos largos

$$\left(\frac{M_0^J - M_I^J}{M_0^J - M_\infty^J}\right) = 1 - \frac{8}{\pi^2}\exp\left\{-\frac{\pi^2 F_o}{4}\right\} \quad \text{.....(EC. 2.30)}$$

- Para tiempos cortos

$$\left(\frac{M_0^J - M_I^J}{M_0^J - M_\infty^J}\right) = 2\left(\frac{F_o}{\pi}\right)^{0.5} \quad \text{.....(EC. 2.31)}$$

Por medio de estas ecuaciones se determina el F_o para cada punto experimental y con una gráfica de F_o vs t se interfiere el valor de Difusividad efectiva.

- **Quinto Modelo de transferencia de masa aplicado a la deshidratación osmótica de alimentos.**

Un modelo más de transferencia de masa aplicado a la deshidratación osmótica es el propuesto por Hawkes y Flink (1978) pero algunos autores lo atribuyen a Magee (1978) quién realizó algunas modificaciones. (25)

$$\boxed{\frac{M_0^J - M_I^J}{M_I^0} = k\, t^{0.5} + k_0} \quad \text{.....(Ec. 2.32)}$$

k y k_0 son parámetros cinéticos empíricos. Pero se les puede asignar un significado físico:

- k se lo asocia con las velocidades de transferencia de solutos y de agua que ocurren a través del mecanismo osmótico difusional que es la constante cinética de

difusión dado que la transferencia de masa en este mecanismo difusional es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de procesos cortos de acuerdo a la ecuación de Crank.

- k_0 cuantifica la ganancia o pérdida de masa que ocurre después de tiempos de procesos muy cortos por la acción del mecanismo hidrodinámico (HDM) promovido por presiones impuestas.

Este modelo solo es válido para las primeras etapas de deshidratación (tiempos cortos).Crank no considera en sus ecuaciones para tiempos cortos las resistencias interna y externas en cambio Sereno (2001) toma en consideración estas resistencias y define a k y k_0 como coeficientes globales de transferencia de masa. (27)

2.1.3 Permeabilidad en materiales de empaques

Los empaques en el área de los alimentos son muy importantes de considerar ya que por medio de ellos se

podrá mantener un producto fresco y estable con condiciones aceptables y que no perjudique a la salud del consumidor.

Las funciones que ofrece un sistema de empaque son de contener, proteger, preservar, dispensar, informar, impactar, atraer y vender.

Existen requisitos previos muy importantes en la selección del empaque y pueden ser:

- Tipo de Producto
- Característica de la Barrera del empaque
- Maquinaria de llenado/ Empaque/ Embalaje
- Cantidad / Peso
- Transporte
- Distribución
- Objetivo del Consumidor Final

El requisito principal que se debe de considerar en la selección de los sistemas de empaquetado para los alimentos es la característica de la barrera que ofrece el material de empaque y estas deben de ofrecer: (5, 6, 25, 28)

1. El material de empaque debe de proporcionar una barrera a la humedad para prevenir efectos no deseados.

Efectos de la Humedad en los Alimentos

- Actúa como solvente diluyendo los substratos
- Oxida las grasas
- Actúa como reactivo promoviendo la hidrólisis
- Los alimentos pierden textura, color, olor, sabor
- Proliferan los microorganismos
- Incrementa la actividad enzimática
- Degrada las vitaminas A, B1, B2 y C

La variable de medición de la permeabilidad al vapor de agua se la conoce como WVTR (Tasa de transmisión de

vapor de agua) y se expresa dependiendo de las condiciones del medio como por ejemplo:

Gramos de H2O / 100 in^2 de área de película de 25 micrones de espesor por día a presión atmosférica y temperatura de 38 °C y humedad relativa del 90% (30)

En la tabla 2 se presenta valores de permeabilidades a diferentes temperaturas para películas plásticas con diferentes materiales

TABLA 2

PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA PARA PELÍCULAS PLÁSTICAS (ESPESOR 100 MM)

	Permeabilidad al vapor de agua (g / m2 d)						
MATERIAL	**- 20ºC**	**0ºC**	**10ºC**	**20ºC**	**30ºC**	**40ºC**	**50ºC**
LDPE (d=0,920)	0,007	0,09	0,27	0,77	2	5	-
HDPE (d	0,002	0,03	0,08	0,22	0,57	1,4	3,1

=0,946)							
PP	0,005	0,03	0,08	0,2	0,5	1,2	2,7
PCTFE	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,008	0,03	0,08	0,2
PET	0,08	0,42	0,83	1,6	2,9	5	-
PVC, hard	0,08	0,41	0,84	1,6	3	-	-
PA 11	0,07	0,51	1,2	2,6	5,4	11	20
PS	0,9	3,4	6,1	10	17	26	40
Papel / PVDC (80/50 g/m2)	< 0,005	0,009	0,03	0,11	0,39	1,3	3,9

Fuente: Noriega M., Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho. (25)

2. El material de empaque debe de tener una barrera al oxígeno. (12, 25)

Efectos del Oxígeno en los alimentos

- La oxidación de grasas y esto genera peróxidos e hidroperóxidos
- La oxidación produce el desarrollo de pardeamiento, decoloración, pérdida de aroma**.**
- La oxidación de vitaminas (Tiamina. B6, B12, Ácido Pantoténico, Vitamina D, Biotina)
- Disminuye el valor nutritivo de los alimentos a través de las reacciones de oxidación (grasas)

- Desarrollo de microorganismos aerobios lo que provoca mal sabor, aparición de manchas de hongos.

La variable de medición de la permeabilidad al oxígeno se la conoce como OTR (Tasa de transmisión de oxígeno) y se expresa dependiendo de las condiciones del medio como por ejemplo:

Centímetros cúbicos de oxígeno O_2 / 100 in^2 de área de película de 25 micrones de espesor por día a presión atmosférica y temperatura de 23 °C (30)

En la tabla 3 se presenta valores de permeabilidades a diferentes temperaturas para películas con diferentes materiales.

TABLA 3

PERMEABILIDAD A GASES EN PELICULAS PLASTICAS (ESPESOR 100 µm)

MATERIAL	GAS	Permeabilidad (cm3 /m2.d.bar)**				
		- 20ºC	0ºC*	20ºC	40ºC	60ºC
LDPE	N2	25	125	510	1740	5100
	O2	165	480	1350	3600	8500
	CO2	850	2750	7550	18300	39700
HDPE	N2	11	42	140	390	960
	O2	55	180	510	1200	3000

	CO2	320	860	2000	4200	8000
PP	N2	6	33	140	500	1500
	O2	93	200	630	2200	5800
	CO2	300	630	2270	6900	18500
PET	N2	0,1	0,4	1,5	4,3	11
	O2	1,8	3,7	8,6	21	49
	CO2	9,6	25	57	115	215
PVC duro	N2	0,1	0,5	1,8	5	13
	O2	2,9	8	19	41	80
	CO2	7,7	22	53	115	230
PA11	O2	7,9	21	62	160	450
PS	O2	540	730	1000	1540	2200
PVDC	O2	0,02	0,1	1,4	12	73

Fuente: Noriega M., Instituto de Capacitación e Investigación del Plástico y del Caucho. (25) ** Volumen medido a 0ºC y a 1 bar. * Humedad relativa 100% a 0ºC; 85% a 0% otras temperaturas.

3. Es muy importante también considerar que el alimento este protegido contra la luz.

Efectos de la luz en los alimentos

- Acelera la oxidación de las grasas, destruye vitaminas como la A, E, la Riboflavina, el Ácido Fólico y la Biotina. Descompone muchos aminoácidos.
- Promueve la de decoloración y los cambios de sabor

- Acelera el deterioro y los cambios nutricionales del alimento

4. El aroma y el sabor originales de un alimento pueden ser mantenidos usando un material de empaque que ofrezca una barrera a un aroma particular.

Así, los materiales de empaque correctamente seleccionados son beneficiosos en mantener la vida útil de los alimentos. Las características de la barrera de un material de empaque se pueden expresar en términos de permeabilidad. (33)

Alta Barrera $\longrightarrow$ Baja Permeabilidad

Baja Barrera $\longrightarrow$ Alta Permeabilidad

La permeabilidad de un material de empaque proporciona una medida de como un vapor o gas puede penetrar el material de empaque. En términos cuantitativos, la permeabilidad es la masa del vapor o del gas que por medio de una fuerza impulsora es transferido por la unidad del

tiempo, del área. En el caso de la transferencia de masa de la sustancia que se difunde, la fuerza impulsora es una diferencia en la concentración o en presiones parciales. Si la fuerza impulsora es una diferencia en la presión total, la transferencia de masa ocurre debido al flujo de un gas o de un vapor. (33)

$$\frac{\dot{m}}{A} = -D\frac{\partial c}{\partial x} \quad \text{.....(Ec. 2.33)}$$

Donde.

$\dot{m}$ = Flujo de masa del componente B (kg/s)

c = Concentración del componente B, masa por unidad de volumen (Kg/m^3)

D = Difusividad de masa (m^2/s)

A = Área (m^2)

X = espesor (m)

Si asumimos que la difusividad de masa no depende sobre la concentración de la ecuación 2.33 obtenemos lo siguiente:

$$\frac{\dot{m}_A}{A} = -D_{AB}\frac{dc_A}{dx}$$ .....(Ec. 2.34)

Donde D_{AB} es la difusividad efectiva de masa de un gas A o líquido A en un sólido B.

Como lo estudiamos en los procesos anteriores, los alimentos presentan diferentes formas y para poder realizar cálculos tanto de transferencia de masa como de transferencia de calor debemos asumir que estos presentan geometrías de placa infinita, cilindro infinito y esfera.

se integra la ecuación 2.34 obtenemos la siguiente expresión la cual se puede utilizar para calcular permeabilidades en alimentos que presenten forma rectangular.

$$\frac{\dot{m}_A}{A}\int_{x_1}^{x_2} dx = -D_{AB}\int_{c_{A1}}^{c_{A2}} dc_A \quad \text{..... (Ec. 2.35)}$$

$$\frac{\dot{m}_A}{A} = \frac{D_{AB}(c_{A1} - c_{A2})}{(x_2 - x_1)} \quad \text{.....(Ec. 2.36)}$$

Para alimentos los cuales se asume que presentan forma cilíndrica, con coordinadas radiales se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_A = \frac{D_{AB} 2\pi L(c_{A1} - c_{A2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad \text{.....(Ec.2.37)}$$

- **Primer Modelo de transferencia de masa aplicado en Permeabilidades en materiales de empaque**

Para poder desarrollar una expresión para el proceso del transporte de un gas a través un material de empaque podemos utilizar nuevamente la ley de Fick como lo

estudiamos en los procesos de Secado y Deshidratación Osmótica.

De la ecuación 2.36 se obtiene la siguiente ecuación:

$$\boxed{\frac{\dot{m}_B}{A} = \frac{D_B (c_{B1} - c_{B2})}{(x_2 - x_1)}} \quad \text{.....(Ec. 2.38)}$$

Esta ecuación sería suficiente para determinar el índice del flujo, $\dot{m}_B / A$ pero las concentraciones de un gas en las superficies de la película son más difíciles de medir que las presiones parciales. Las concentraciones se pueden convertir a las presiones parciales usando la Ley de Henry. (33)

$$\boxed{c = Sp} \quad \text{.....(Ec. 2.39)}$$

Donde,

$S =$ Solubilidad (moles/[cm^3 atm])

p = Presión parcial del gas (atm)

Entonces tenemos la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_B = \frac{D_B S A (p_{B1} - p_{B2})}{(x_2 - x_1)} \quad \text{.....(Ec.2.40)}$$

La cantidad $D_B S$ se conoce como el coeficiente de la permeabilidad, P_B

$$\text{P} = \frac{\text{(cantidad del vapor del gas)(espes or de la película)}}{\text{(área)(tie mpo)(difer encia de presiones a través de la película)}} \text{.(Ec.2.41)}$$

- **Segundo Modelo de transferencia de masa aplicado en Permeabilidades en materiales de empaque**

Una ecuación general para el cálculo de transferencia de un constituyente a través de una película de empaque es: (19)

$$G = \frac{P}{s} A t \Delta p \quad \text{.....(Ec.2.42)}$$

Donde,

$\frac{P}{s}$ = Constante de permeabilidad de la película,

normalmente dada en g/m^2.día.mmhg

$s =$ Espesor de la película

$A =$ Área del empaque (m^2)

$t =$ Tiempo en días

$\Delta p =$ Diferencia de Presión parcial

$G =$ transferencia de masa (g)

- **Tercer Modelo de transferencia de masa aplicado en Permeabilidades en materiales de empaque**

Varios autores concuerdan de que la difusión de los gases en sólidos no se dan como difusividades ni solubilidades, sino como permeabilidades. A continuación se presenta un punto de vista más en el cual se la relaciona la ley de Fick con otras ecuaciones para poder llegar a una opción final que permitirá el cálculo de la permeabilidad (17)

$$N_A = \frac{D_{AB}(c_{A!} - c_{A2})}{z_2 - z_1} \quad \text{.....(Ec.2.43)}$$

Si sustituimos la ecuación 2.42 con la siguiente ecuación 2.44:

$$\boxed{c_{A1} = \frac{Sp_{A1}}{22.414}} \qquad \boxed{c_{A2} = \frac{Sp_{A2}}{22.414}} \text{..... (Ec.2.44)}$$

Obtenemos:

$$\boxed{N_A = \frac{D_{AB}S\,(p_{A!} - p_{A2})}{22.414(z_2 - z_1)} = \frac{P_M(p_{A1} - p_{A2})}{22.414(z_2 - z_1)}} \text{ Kg mol/sm}^2 \text{ …(Ec.2.45)}$$

Donde la permeabilidad de la película plástica es P_M y se encuentra en: m^3 cm /s m^2 atm

$$\boxed{P_M = D_{AB}S} \text{.....(Ec.2.46)}$$

Cuando se trata de varios materiales de la película plástica 1, 2, 3…, en serie, y L_1 y L_2,…., representan los espesores de cada uno y la ecuación 2.45 se transforma en:

$$N_A = \frac{p_{A1} - p_{A2}}{22.414 \; L_1 / P_{M1} + L_2 / P_{M2} + \ldots}$$ .....(Ec. 2.47)

Donde $p_{A1} - p_{A2}$ es la diferencia total de presiones parciales

Si las unidades de la permeabilidad de la película plástica se encuentra en: g m / s m^2 Pa ; podemos utilizar la ecuación 2.48

$$N_A = \frac{P_M (p_{A1} - p_{A2})}{(z_2 - z_1)}$$ g / m^2 s..... (Ec.2.48)

Así mismo cuando se trata de varios materiales de la película plástica 1, 2, 3…, en serie, y L_1 y L_2,…., representan los espesores de cada uno podemos decir que:

$$N_A = \frac{p_{A1} - p_{A2}}{L_1 / PM_1 + L_1 / PM_1 + \ldots..}$$ ..... (Ec. 2.49)

2.2 Elaboración de Banco de datos experimentales

Por medio de investigación a partir de textos y revistas científicas se realizó un banco de datos a partir de una serie de experimentos de diferentes alimentos que han sido secados, de alimentos que han sido deshidratados osmóticamente utilizando soluciones a diferentes concentraciones y de diferentes películas plásticas utilizadas en los alimentos.

Secado

Los datos de Secado de Alimentos se presentan en el Anexo G.

- Desarrollo de Harina de Zapallo a una temperatura de 70 °C y una velocidad de aire de 4.19 m/s. (1)
- Secado de Banano sin tratamiento osmótico con una velocidad de 4.19 m/s (8)
- Secado de Quinua para Sopas Instantáneas (14)
- Secado de alverjitas a tres temperaturas de 30, 40 y 50 °C a una velocidad de aire de 4.19 m/s**.** (40)

Deshidratación Osmótica

Los datos de Deshidratación Osmótica de Alimentos se presentan en el Anexo H.

- Deshidratación osmótica del mango con concentraciones de sacarosa de 55 y 65 °BRix y temperaturas de 35 y 45 °C, (21)
- 3 datos experimentales de Deshidratación Osmótica del Banano a 55 °Brix con temperaturas de 50 y 70 °C. (8)
- Deshidratación osmótica del Salmón. Ejercicio de Aplicación (33)

Permeabilidad en materiales de empaque

Los datos de Permeabilidad se presentan en el Anexo I.

- Cereal envasado en una película plástica que esta compuesta de 3 materiales a 15 °C con una humedad relativa del 67.50%. (28)
- Tostito envasado en una película plástica que esta compuesta de 3 materiales a 15 °C con una humedad relativa del 67.50%. (28)

- Cachito envasado en una película plástica que esta compuesta de 3 materiales a 32 °C con una humedad relativa del 83.40%. (28)

CAPITULO 3

3. DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA

Luego de haber estudiado las generalidades de la transferencia de masa y su aplicación en los sistemas de alimentos se diseñará una herramienta computacional la cual mediante una selección de modelos matemáticos que se apliquen a los procesos de Secado, Deshidratación osmótica en alimentos, y permeabilidades en los materiales de empaque permitirá calcular, analizar y entender con

mayor rapidez el comportamiento de la transferencia de materia de una manera más fácil y didáctica.

3.1 Selección del programa

El programa recibe el nombre de SIMULADOR DE TRANSFERENCIA DE MASA, el cual permite calcular el Tiempo de Secado en periodos de velocidad constante y decreciente, el Tiempo en que un producto que presente tres formas geométricas específicas placa infinita, esfera y cilindro infinito pueda deshidratarse osmóticamente a una concentración deseada y la velocidad de transferencia de un gas a través del material de empaque.

El simulador de transferencia de masa ha sido elaborado en el lenguaje Visual Basic.NET por presentar las siguientes características

- Posee un lenguaje más simplificado y lo hace más coherente.
- Se pueden agregar nuevas características solicitadas por usuarios

- Posee códigos más sencillos de leer
- Ayuda a los programadores a evitar los errores de programación
- Crea aplicaciones más sólidas y más sencillas de depurar

3.2 Elaboración del manual del usuario

A continuación se presenta una descripción de cada uno de los pasos a seguir para poder utilizar la Herramienta predictiva.

Instalación del Simulador de Transferencia de masa

Para la ejecución del Simulador de Transferencia de masa se debe tener presente que el computador donde se va a trabajar debe contener lo siguiente:

- Visual Studio .net
- Sql Server 2000
- Far Point Spread for Windows Form
- Crystal Reports XI

Una vez en el programa se presentará la pantalla principal y es en la que el usuario deberá seleccionar el proceso donde desee trabajar haciendo un click en la figura del proceso, esta pantalla se muestra en la figura 3.1

FIGURA 3.1 SELECCIÓN DEL PROGRAMA

Secado

1.- Si el usuario eligió secado, la pantalla se muestra como la figura 3.2, en la primera parte se solicita que ingrese el peso del sólido contenido en la muestra, la Humedad de equilibrio obtenido de la isoterma y el área de su producto

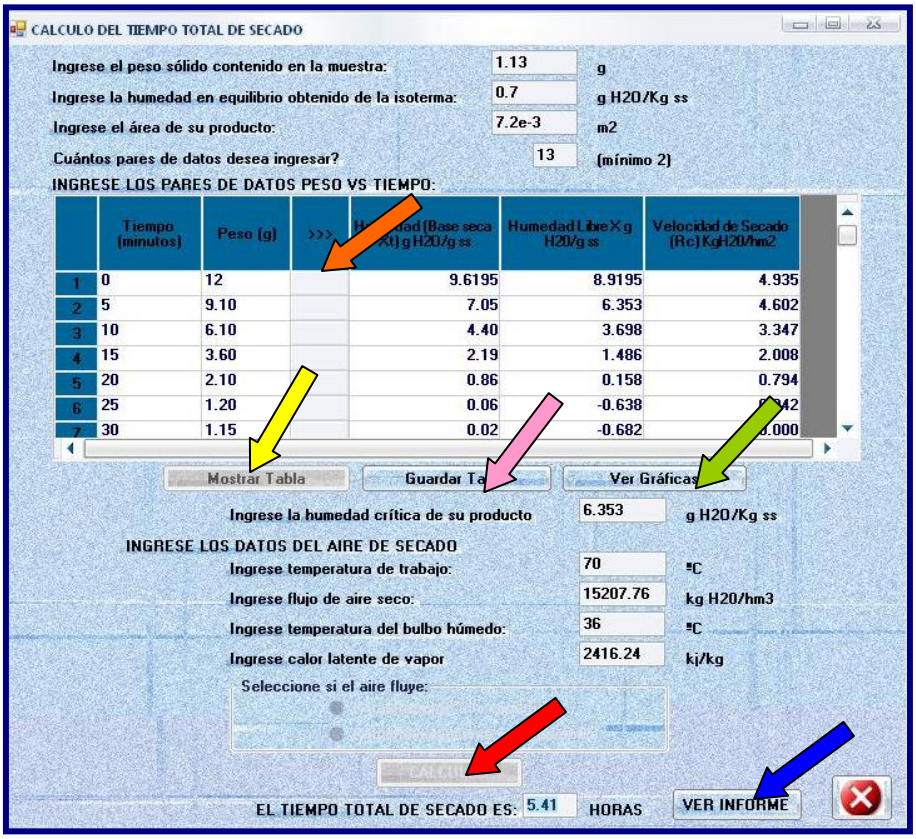


FIGURA 3.2 CALCULO DE TIEMPO DE SECADO

2.- Luego se le solicita que ingrese la cantidad de pares de datos peso vs tiempo para que así el programa permita ingresar esa cantidad de datos.

3.- Después el usuario deberá ingresar el primer par de datos. Para que el programa le permita ingresar el segundo par de datos, el tercero, el cuarto, etc deberá de hacer clic justo donde señala la flecha de color naranja y esto se debe de realizar hasta que se haya completado la cantidad de pares de datos previamente ingresados.

4.- Una vez ingresados los datos, el usuario deberá elegir *mostrar tabla* (Flecha amarilla), de no estar seguro con los datos ingresados se pueden realizar cambios de datos y volver a elegir mostrar tabla pero si esta seguro de que los datos ingresados están correctos deberá elegir *guardar tabla* (Flecha rosada) y no podrá hacer ningún cambio en los datos ingresados.

Automáticamente se le desactivará *mostrar tabla* y *guardar tabla* y se activará la opción *ver gráficas* (Flecha verde). En la opción *ver*

gráficas el usuario podrá visualizar las graficas de humedad libre vs tiempo y velocidad de secado vs humedad libre como se muestra en la figura 3.3. Cabe recalcar que si no aparece la gráfica velocidad de secado Vs tiempo, en la parte superior de la página hay una opción la cual dice *next page* (flecha naranja) se la selecciona y esta aparecerá

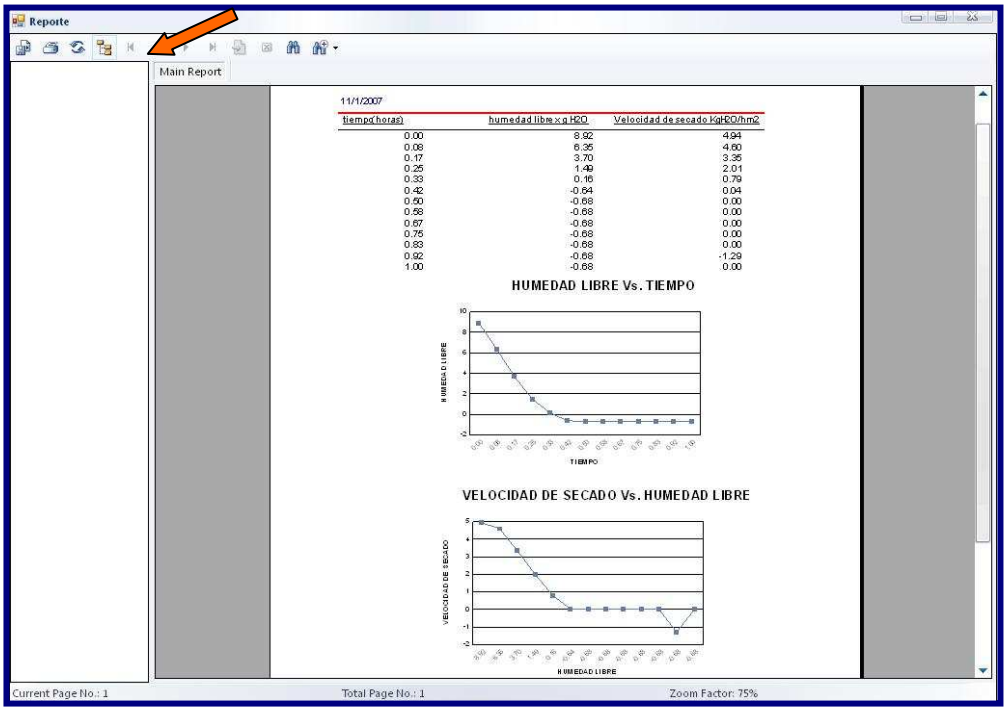


FIGURA 3.3 GRAFICA HUMEDAD LIBRE Vs TIEMPO

5.- Luego se solicita al usuario que ingrese la humedad crítica (la cual puede ser observada en la curva de velocidad de secado vs tiempo), la temperatura de trabajo, flujo de aire seco y la temperatura del bulbo húmedo.

6.- Después el usuario debe de elegir si el aire fluye paralelamente o perpendicularmente a la superficie para que finalmente seleccione la opción que dice calcular (flecha roja) y así el programa calcula el tiempo total de secado.

7.- Para poder observar los datos ingresados y el tiempo de secado se puede seleccionar *Ver informe* (flecha azul) y esta se presenta en la figura 3.4.

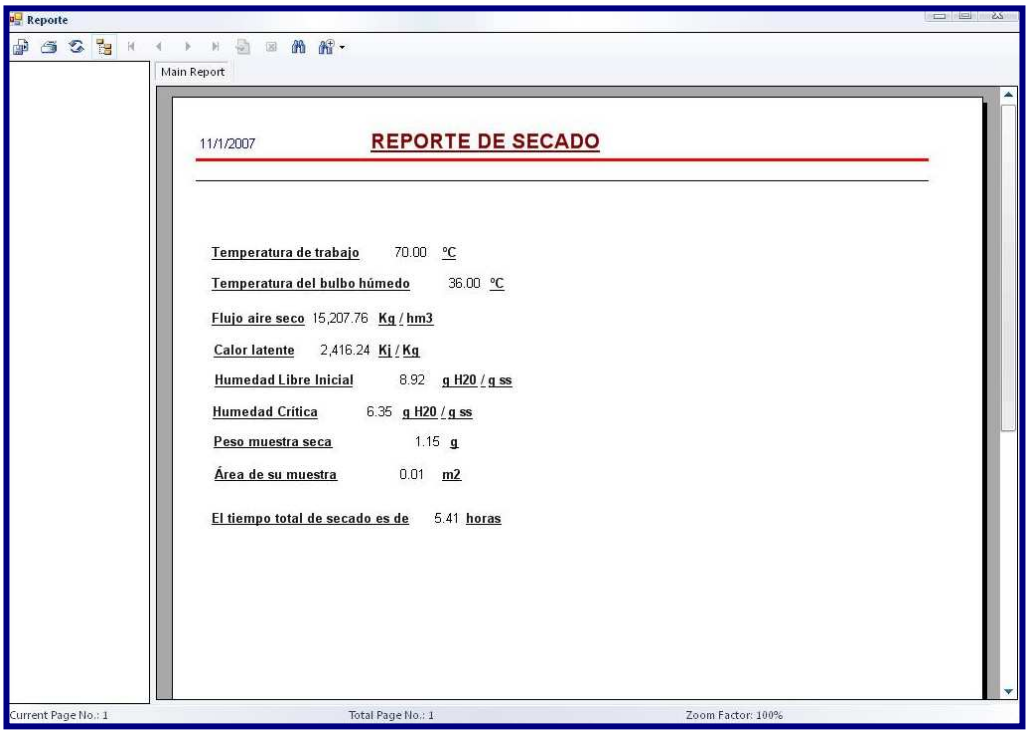


FIGURA 3.4 REPORTE DE TIEMPO TOTAL DE SECADO

Deshidratación Osmótica.

1.- Si el usuario desea trabajar con deshidratación osmótica, se le solicitará que seleccione el alimento con el que esta trabajando como se muestra en la figura 3.5.

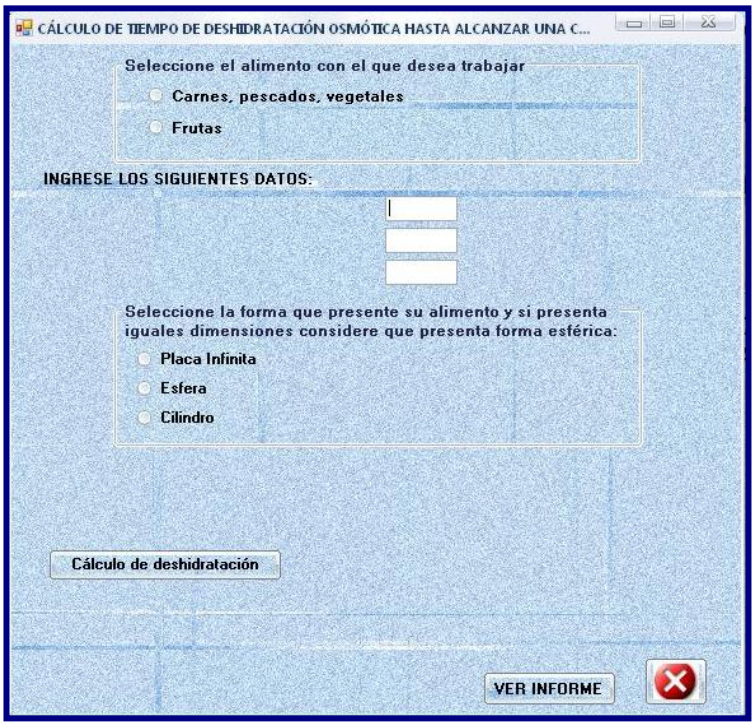


FIGURA 3.5 SELECCIÓN DEL ALIMENTO

2.- Si selecciono carnes, pescados y vegetales se le solicita que ingrese la concentración inicial, la concentración de la solución y la concentración deseada como se muestra en la figura 3.6

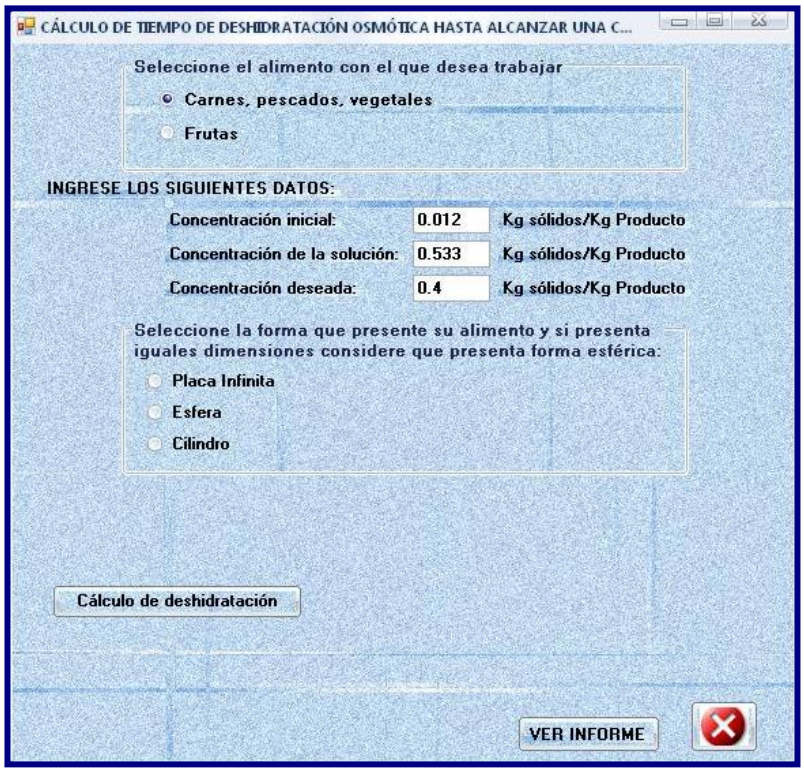


FIGURA 3.6 CALCULO DE TIEMPO DE DESHIDRTAACIÓN OSMÓTICA

3.- Luego se le solicita que seleccione la forma que presente su producto. Si por ejemplo seleccionó *placa infinita* el programa le solicitará que ingrese el espesor y el coeficiente de difusión de sólidos como se muestra en la figura 3.7. Pero si selecciona esfera o diámetro le va a pedir que ingrese el diámetro de su muestra.

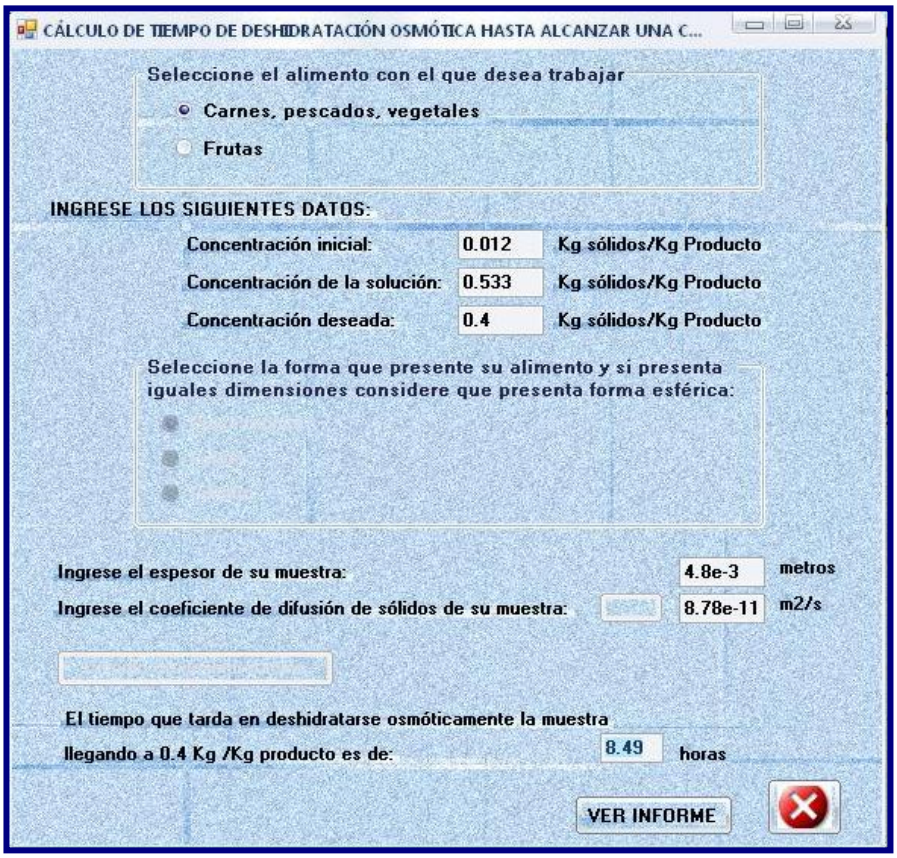


FIGURA 3.7 SELECCIÓN DE FORMA DE LA MUESTRA

4.- Si el usuario esta trabajando con carne de cerdo cruda, salchicha de cerdo, espalda de cerdo con grasa o pollo y desconoce el valor del coeficiente de difusión de sólidos, el programa ofrece una ayuda donde se muestra un cuadro con rangos de difusión de sólidos para estos alimentos y esta se muestra en la figura 3.8. La tabla con valores de coeficiente de

difusividad aparece seleccionando el icono el cual se muestra con flecha amarilla en la figura 3.8.

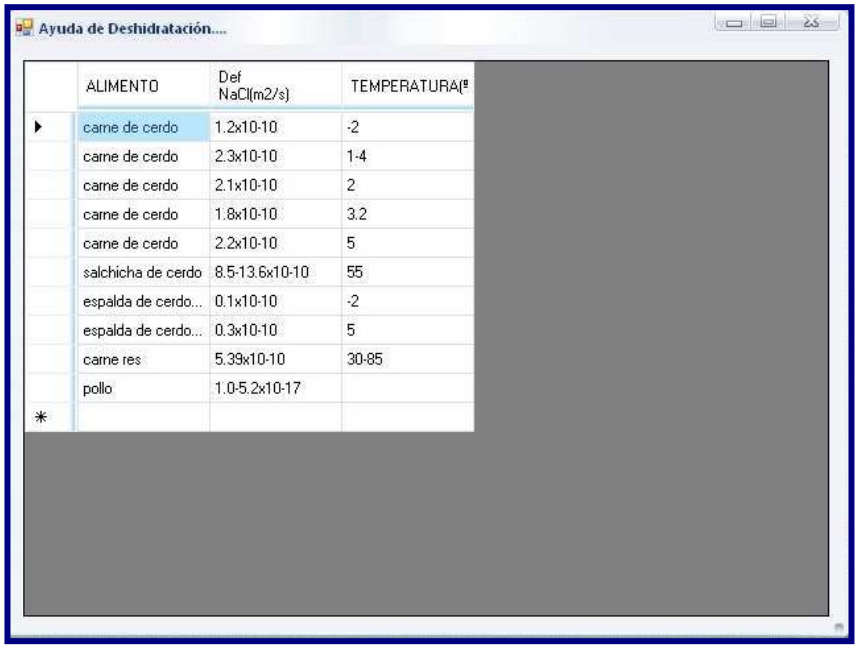


FIGURA 3.8 AYUDA PARA COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

5.- Luego el usuario deberá seleccionar cálculo de deshidratación para conocer el tiempo de deshidratación osmótica a una concentración deseada, como se muestra en la figura 3.7

6.- Finalmente el Simulador de Transferencia de Masa presenta el reporte de los datos ingresados por el usuario y el tiempo de

deshidratación osmótica a una concentración deseada tal como se muestra en la figura 3.9

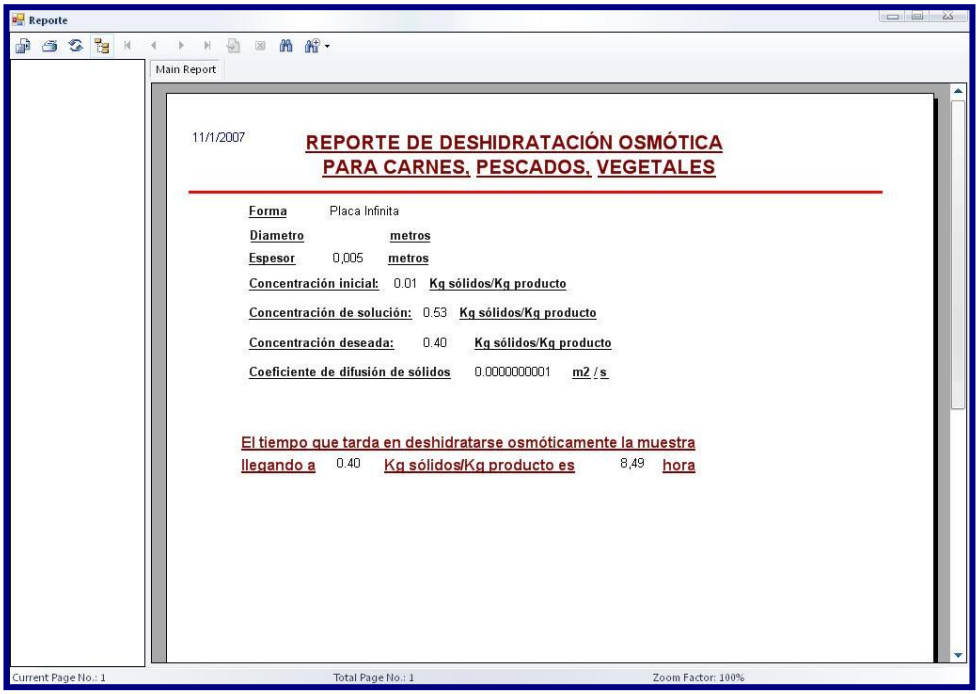


FIGURA 3.9 REPORTE DE TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

7.- Si selecciono frutas se le solicita que ingrese los ° Brix inicial, los °Brix de la solución y los sólidos ganados. Luego se le solicita que seleccione la forma que presente su producto. Si por ejemplo seleccionó *cilindro* el programa le solicitará que ingrese el diámetro y el coeficiente de difusión de sólidos como se muestra en la figura 3.10 .

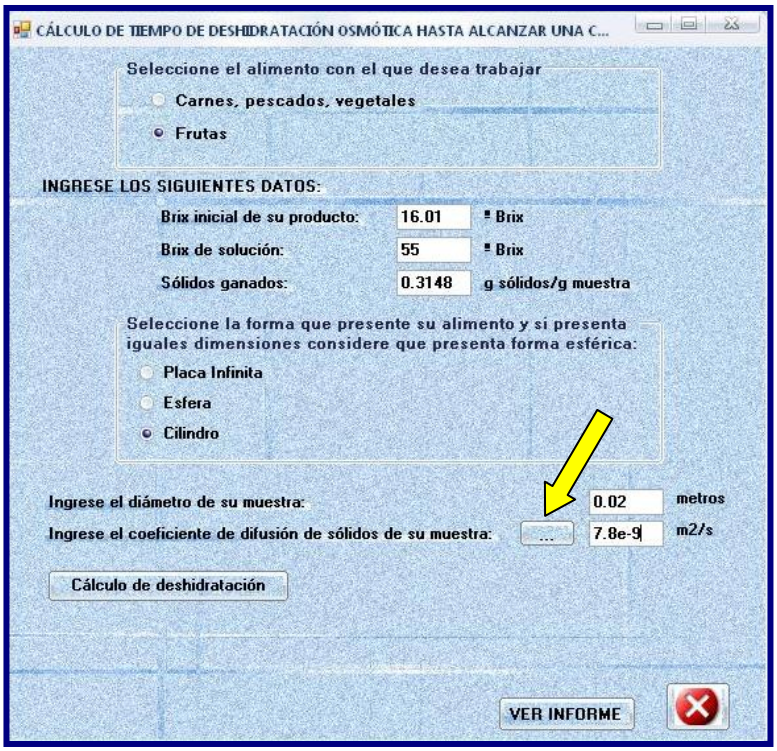
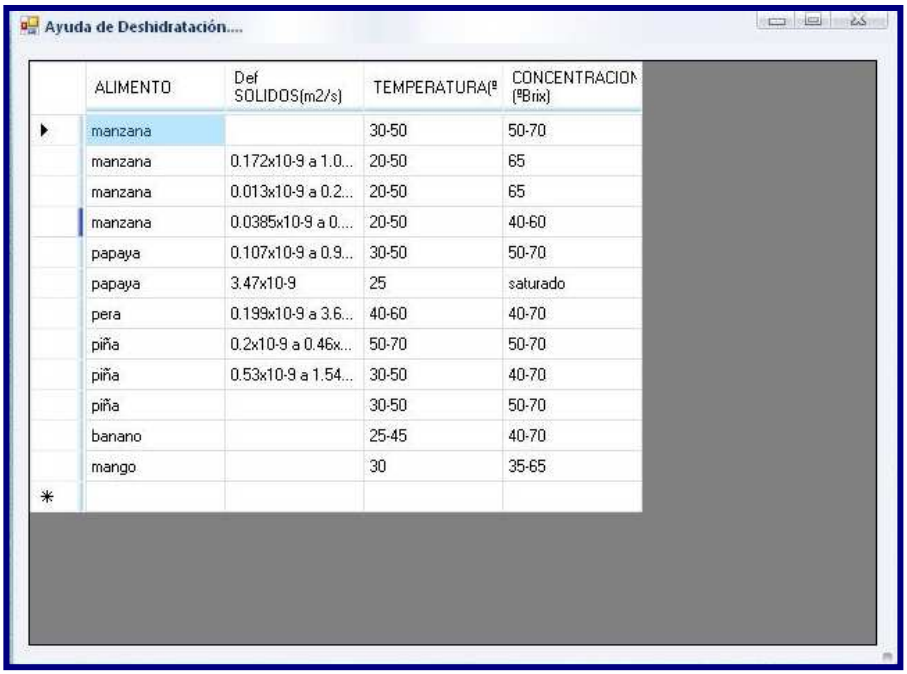


FIGURA 3.10 CALCULO DE TIEMPO DE DESHIDRTAACIÓN OSMÓTICA

8.- Si el usuario selecciona esfera, el programa le solicitará lo mismo pero si selecciona placa infinita le solicitará que ingrese el espesor de su muestra.

9.- Si el usuario esta trabajando con frutas como papaya, manzana, piña o banano y desconoce el valor del coeficiente de difusión de sólidos, el programa ofrece una ayuda donde se

muestra un cuadro con rangos de difusión de sólidos para estas frutas y esta se muestra en la figura 3.10. La tabla con valores de coeficiente de difusividad aparece seleccionando el icono el cual se muestra con flecha amarilla en la figura 3.11



	ALIMENTO	Def SOLIDOS(m2/s)	TEMPERATURA(º	CONCENTRACION (ºBrix)
▶	manzana		30-50	50-70
	manzana	0.172x10-9 a 1.0...	20-50	65
	manzana	0.013x10-9 a 0.2...	20-50	65
	manzana	0.0385x10-9 a 0....	20-50	40-60
	papaya	0.107x10-9 a 0.9...	30-50	50-70
	papaya	3.47x10-9	25	saturado
	pera	0.199x10-9 a 3.6...	40-60	40-70
	piña	0.2x10-9 a 0.46x...	50-70	50-70
	piña	0.53x10-9 a 1.54...	30-50	40-70
	piña		30-50	50-70
	banano		25-45	40-70
	mango		30	35-65
*				

FIGURA 3.11 AYUDA PARA COEFICIENTE DE DIFUSIÓN

10.- Luego el usuario deberá seleccionar cálculo de deshidratación para conocer el tiempo de deshidratación osmótica a una concentración deseada, como se muestra en la figura 3.12

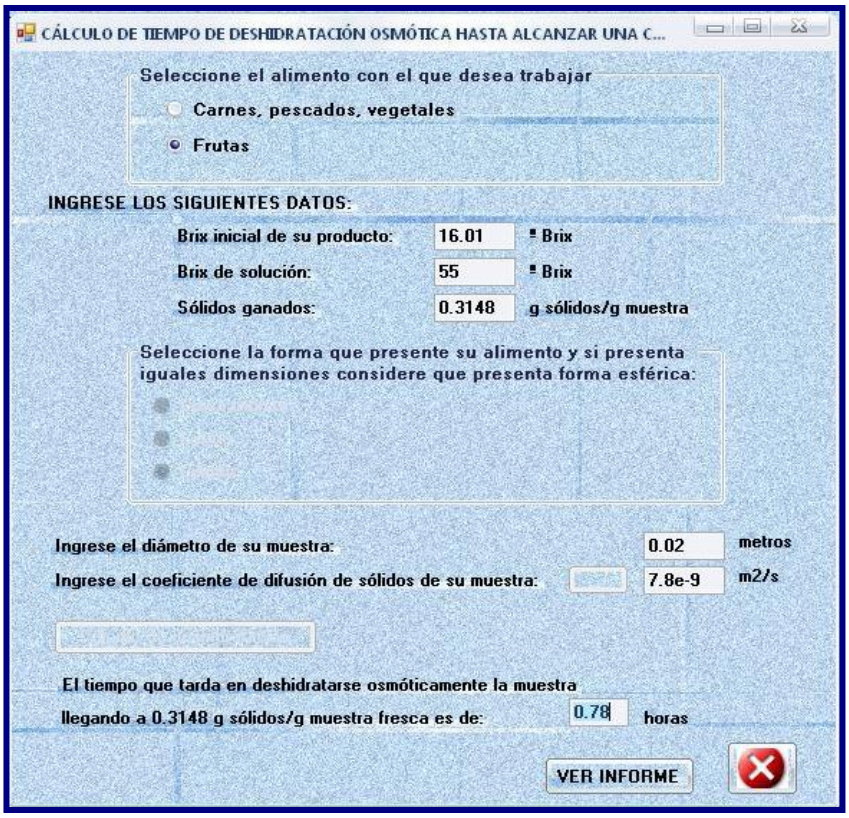


FIGURA 3.12 TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN OSMOTICA

11.- Finalmente el Simulador de Transferencia de Masa presenta el reporte de los datos ingresados por el usuario y el tiempo de deshidratación osmótica a una concentración deseada tal como se muestra en la figura 3.13

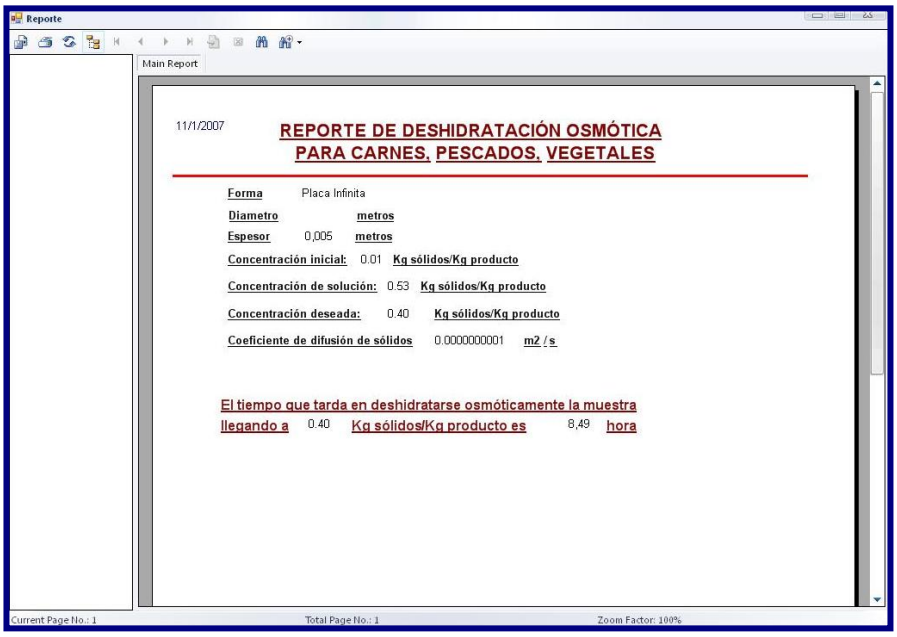


FIGURA 3.13 REPORTE DE TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

Permeabilidad en materiales de empaques

1.- Si el usuario desea trabajar con permeabilidades en materiales de empaques, la pantalla se muestra en la figura 3.14, se le solicitará al usuario ingresar la temperatura del medio, la humedad relativa y la actividad de agua del producto y que ingrese la cantidad de materiales que presenta la película plástica .

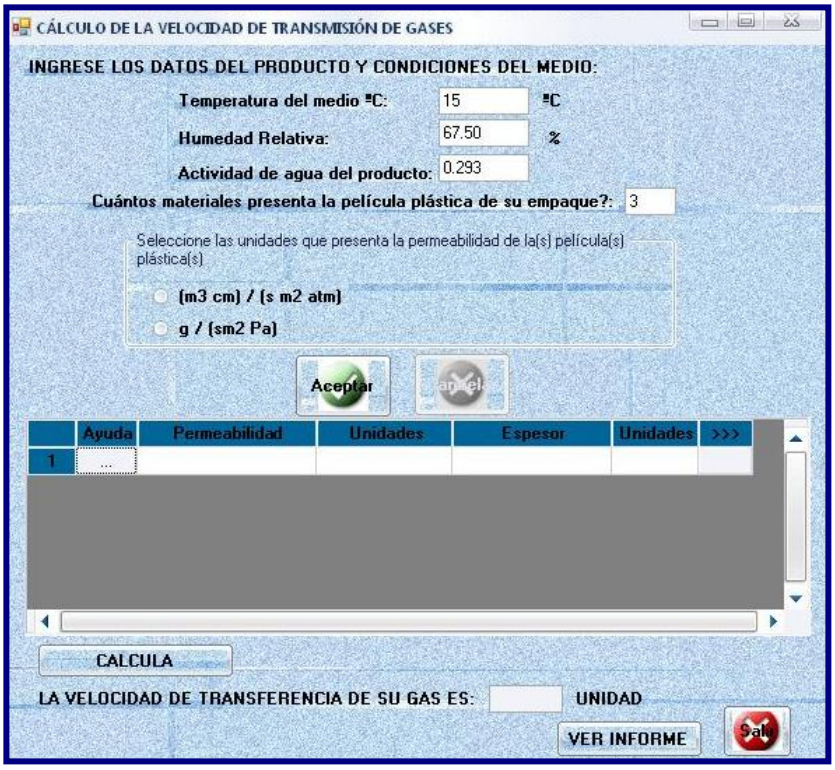


FIGURA 3.14 CALCULO DE VELOCIDAD DE TRANSFRENCIA DE UN GAS

2.- Luego el usuario debe de seleccionar las unidades que presenta la permeabilidad de su película plástica. Después deberá seleccionar *aceptar,* para así poder ingresar la permeabilidad y el espesor de la cantidad de materiales que ingresó como se muestra en la figura 3.15.

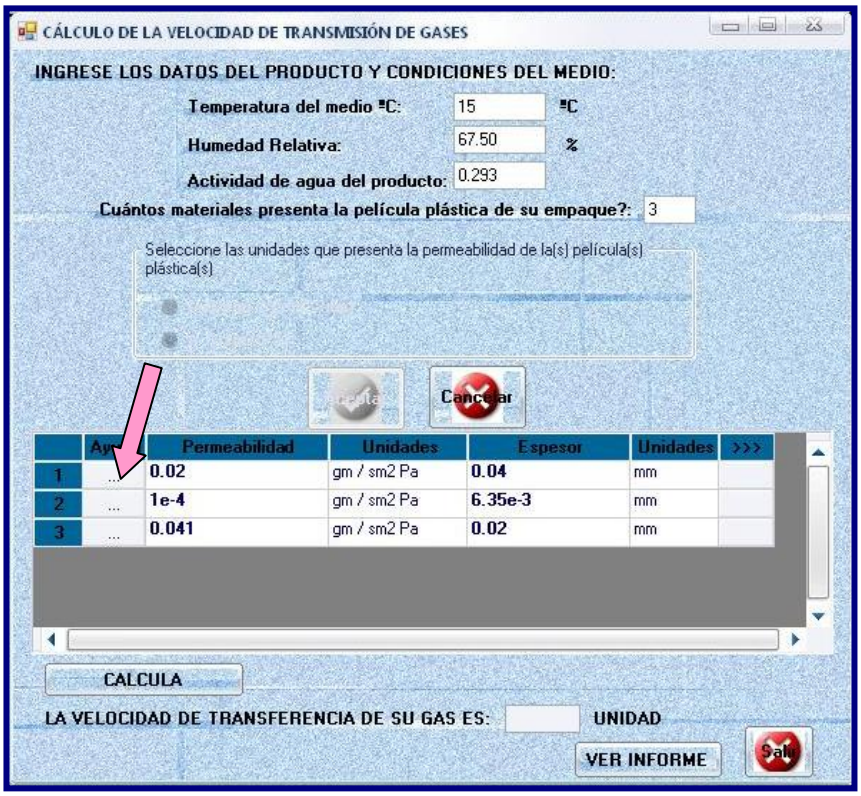
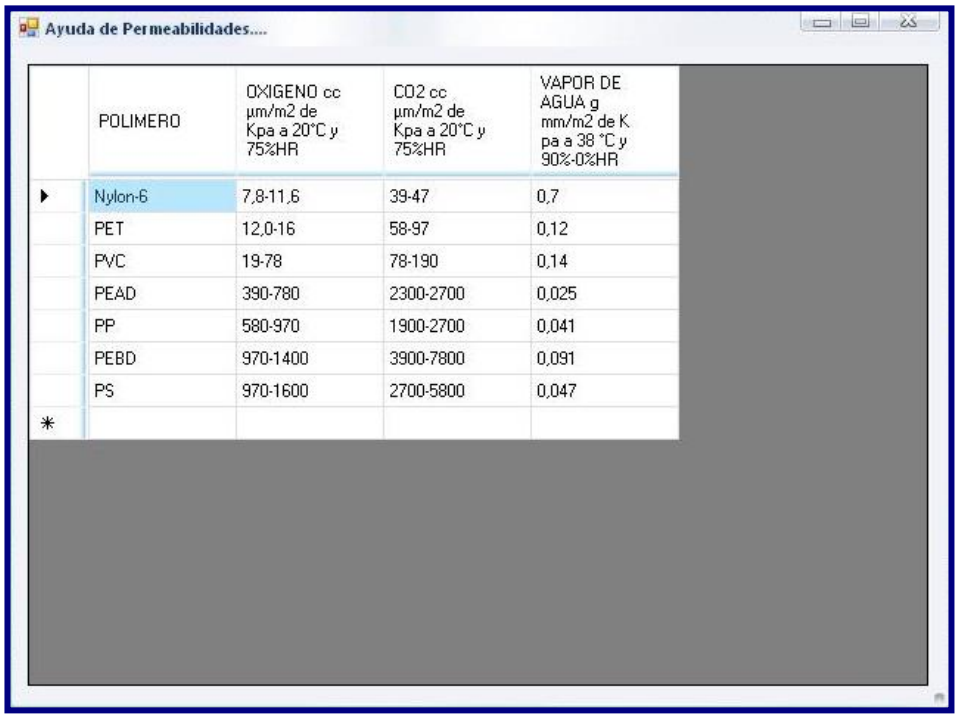


FIGURA 3.15 INGRESO DE PERMEABILIDADES Y ESPESORES

3.- Si el usuario esta trabajando con películas de Nylon-6, PET, PVC, PEAD, PP, PEBD y PS, el Simulador de Transferencia de Masa les ofrece una ayuda donde le muestra valores de permeabilidad al oxígeno al CO_2 y al vapor de agua tal como se muestra en la figura 3.16. La tabla con los valores de permeabilidad puede ser observada seleccionado el icono el cual se señala con la flecha rosada en la figura 3.15.



	POLIMERO	OXIGENO cc µm/m2 de Kpa a 20°C y 75%HR	CO2 cc µm/m2 de Kpa a 20°C y 75%HR	VAPOR DE AGUA g mm/m2 de K pa a 38 °C y 90%-0%HR
▶	Nylon-6	7,8-11,6	39-47	0,7
	PET	12,0-16	58-97	0,12
	PVC	19-78	78-190	0,14
	PEAD	390-780	2300-2700	0,025
	PP	580-970	1900-2700	0,041
	PEBD	970-1400	3900-7800	0,091
	PS	970-1600	2700-5800	0,047
*				

FIGURA 3.16 AYUDA PARA VALORES DE PERMEABILIDADES

4.- Luego se debe seleccionar el icono calcula para determinar la velocidad de transferencia de un gas a través del empaque como se muestra en la figura 3.17.

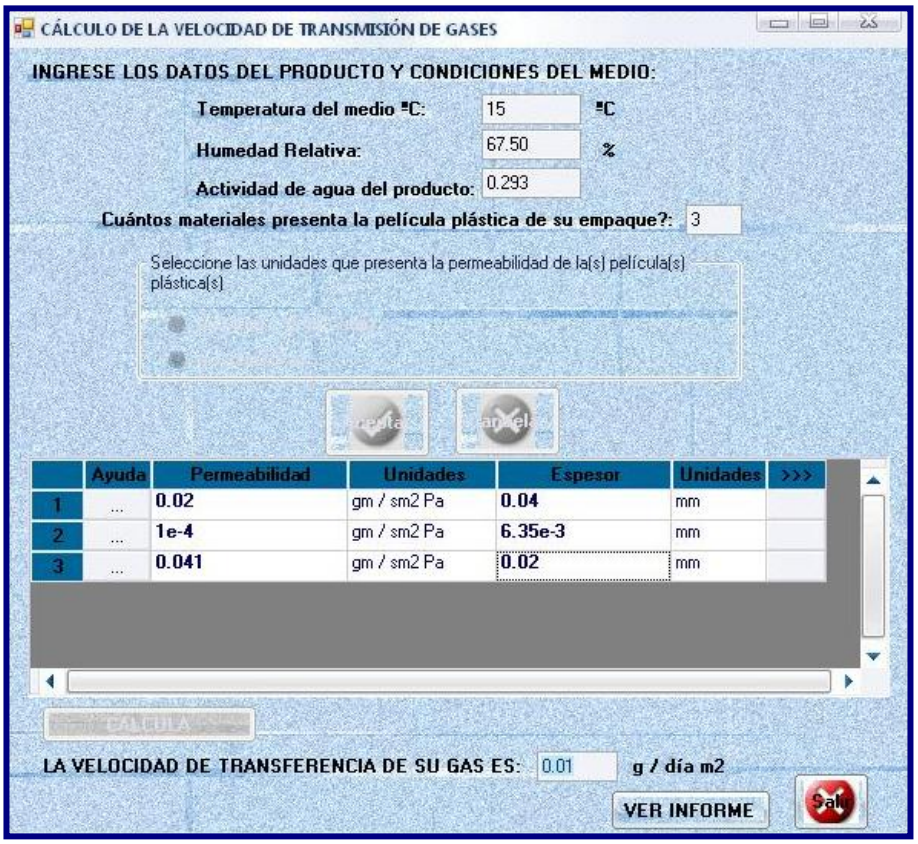


FIGURA 3.17 VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DEL GAS

5.- Finalmente el Simulador de Transferencia de Masa presenta el reporte de los datos ingresados por el usuario y la velocidad de transferencia del gas a través del empaque tal como se muestra en la figura 3.18

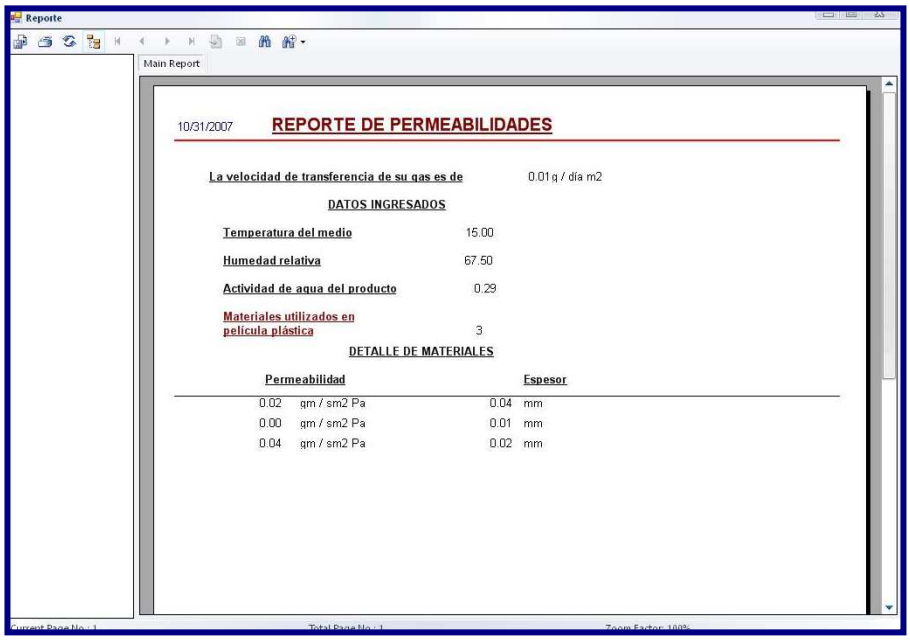


FIGURA 3.18 REPORTE DE VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DEL GAS ATRAVÉS DEL EMPAQUE

3.3 Consideraciones y limitaciones del programa

Consideraciones

Los requerimientos mínimos que se deben de considerar para poder trabajar en el Simulador de Transferencia de masa es que se necesita:

- Un procesador Pentium 4 de 2 Ghz
- Espacio libre en disco 4GB
- Memoria 512MB RAM

Se recomienda trabajar en:

- Un procesador Pentium Core Duo
- Espacio libre en disco 4GB
- Memoria 1GB RAM

Limitaciones

Se deben de seguir los pasos correctamente como se lo describe en el manual del usuario ya que si no se siguen los pasos este puede caerse y puede provocar errores en la programación y por lo tanto podría dar resultados no satisfactorios.

Cuando se ingresen los datos solicitados por el Simulador de Transferencia de masa y si estos son muy pequeños estos deben de ser escritos de la siguiente manera: 1.2 e-4 o 1.2E-4, el programa no acepta valores como 1.2×10^{-4}.

Además el usuario si desea realizar un nuevo cálculo en el proceso que esta trabajando deberá de cerrar la ventana y volver a abrirla ya que de no hacerlo y trabajar ahí mismo el programa podría caerse.

CAPITULO 4

4. VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Como se mencionó anteriormente esta tesis tiene el objetivo de facilitar el estudio de la transferencia de masa por medio de una herramienta computacional en lenguaje Visual Basic .NET la cual fue diseñada y elaborada utilizando modelos matemáticos que definan fenómenos de transferencia de masa tales como secado, deshidratación osmótica y permeabilidades a través de los materiales de empaques.

La validación de esta herramienta se realiza considerando datos experimentales de pruebas ya realizadas y además utilizando datos de referencia bibliográfica.

4.1 Selección de Información Requerida

Modelos Matemáticos aplicados a alimentos

Los modelos matemáticos seleccionados para poder elaborar la herramienta computacional fueron los siguientes:

- Para el estudio del proceso de Secado se utilizó el modelo presentado por Geankoplis C, el cual determina el tiempo total de secado a partir de la curva de velocidad de secado. Durante el período constante la ecuación de velocidad de transferencia de calor equivale a la ecuación de velocidad de transferencia de masa y es así que mediante esta relación se calcula el tiempo en este período y que durante el período decreciente el tiempo se calcula mediante la integración gráfica determinando el área bajo la curva. Las ecuaciones que rigen esta operación son la 2.7, 2.8, 2.9 y 2.12.

- Para el estudio del proceso de Deshidratación Osmótica se utilizaron las ecuaciones 2.20 y 2.21. El modelo se basa en el gráfico del estado no estacionario de transferencia de masa para una concentración promedio en tres geometrías el cual permite determinar mediante una ecuación un numero sin dimensiones el cual va a ser utilizado en una ecuación basada en la ley de Fick para determinar el tiempo de deshidratación osmótica de un producto que presente tres geometrías estándares placa infinita, cilindro infinito y esfera a una concentración deseada y además este modelo toma en consideración las dimensiones de la muestra a deshidratar y finalmente asume que las condiciones de límite representarían resistencia insignificante a la transferencia de masa en la superficie del alimento, con respecto a la difusión dentro del mismo.

- Para el estudio de Permeabilidad en materiales de empaque se utilizó el Tercer Modelo Matemático que se basa en la ley de fick y se puede determinar la velocidad de transmisión de un gas a través del empaque que pueda poseer uno o más

materiales. . En este modelo se trabajó con las ecuaciones 2.45, 2.47, 2.48 y 2.49.

Datos experimentales

En el capitulo 2 se presentó un banco de datos experimental, estos fueron analizados y utilizados en el Simulador de Transferencia de masa.

Con el fin de mostrar la aplicación y la operación del programa, se seleccionó aleatoriamente un ejemplo de la base de datos de cada uno de los procesos estudiados, y sus datos fueron utilizados en la herramienta predictiva. La tabla 4 muestra los ejemplos seleccionados.

TABLA 4

PROCESOS, DATOS EXPERIMENTALES Y VALIDACIÓN

PROCESOS	DATOS EXPERIMENTALES	VALIDACIÓN
Secado	Desarrollo del Proceso y Caracterización de Harina de Zapallo y Formulación de Subproductos (Alava C, 2007) (1)	Cálculo de tiempo de Secado
Deshidratación Osmótica	Deshidratación Osmótica del Banano. Curso de Deshidratación de Alimentos. (8)	Cáculo del tiempo de DO a una concen-tración deseada
Permeabilidad de Materiales de empaque	Estudio del efecto de las condiciones denvasado y empacado en el tiempo de vida útil de bocaditos de maíz estrusados alamacenados a ºT Ambiente (Olvera, 2006) (35)	Cálculo de la velocidad de transferencia del vapor de agua

4.2 Pruebas y Ajustes del Programa

Para complementar la información necesaria para la herramienta predictiva, se utilizó datos de referencias bibliográficas en especifico los coeficientes de difusión para sólidos en diferentes

matrices de alimentos, permeabilidades de gases en diferentes películas plásticas.

A continuación se presenta la data experimental de Secado, de Deshidratación Osmótica y Permeabilidades en materiales de empaques que fueron seleccionadas como ejemplo para la demostración de las funciones del programa.

4.2.1 Secado

ALAVA C. , presenta el estudio “Desarrollo del Proceso y Caracterización de Harina de Zapallo y Formulación de Subproductos” (2007), el cual permite calcular el tiempo total de secado de Zapallo y se los presentan en la tabla 5, Y 6.

TABLA 5

DATOS DE CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA

DATOS CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA	
Tiempo (min)	**Peso (g)**
0	12,00
5	9,10
10	6,10
15	3,60
20	2,10
25	1,20
30	1,15
35	1,15
40	1,15
45	1,15
50	1,15
55	1,15
60	1,15
Humedad en Equilibrio	0,7 (g H2O/gss)
Humedad Crítica Real	6,353 (g H2o/g ss)
Area (m2)	7,20E-03

Fuente: ALAVA C. , Desarrollo del Proceso y Caracterización de Harina de Zapallo y Formulación de Subproductos, 2007 (1)

TABLA 6

DATOS UTILIZADOS EN EL SECADO

DATOS POR TABLA PSICROMETRICA	
Temperatura de Bulbo Húmedo (ºC)	36
Calor Latente de vapor (Kj/Kg)	2416,24
DATOS DEL AIRE DE SECADO	
Temperatura de Trabajo (ºC)	70
Flujo de aire seco (Kg/hm3)	15207.76

Fuente: ALAVA C. , Desarrollo del Proceso y Caracterización de Harina de Zapallo y Formulación de Subproductos, 2007 (1)

Para poder calcular el tiempo de secado del zapallo por medio de la experimentación de Alava (2007) se ingreso sus datos obtenidos experimentalmente (peso vs. tiempo) solicitados por el Simulador de Transferencia de masa.

4.2.2 Deshidratación Osmótica

Se presenta a continuación en la tabla 7 los datos de la deshidratación osmótica del banano, estos datos fueron obtenidos durante el desarrollo del curso de “Deshidratación de Alimentos”.

TABLA 7

DATOS PARA CÁLCULO DE TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

Temperatura	70 °C
Solución sacarosa	55 °Brix
Diametro	2 cm
Coeficiente de difusión	7.8 x 10-9 m2/s
°Brix Inicial	16,01
Solidos Ganados	0,3148 gsolidos/gfruta
Tiempo	45 min

Fuente: Curso de Deshidratación de Alimentos (8)

Para poder calcular el tiempo de deshidratación osmótica del banano por medio de la experimentación, se ingreso los datos obtenidos experimentalmente (°Brix del alimento y solución) solicitados por el Simulador de Transferencia de masa.

4.2.3 Permeabilidad en materiales de empaques

Olvera M. (2006) presenta el Estudio del efecto de las condiciones de envasado y empacado en el tiempo de vida útil de bocaditos de maíz Estrusados. A continuación en la

tabla 8 se presenta los datos para poder calcular la velocidad de transferencia de vapor de agua a través del empaque del cereal.

TABLA 8

DATOS PARA CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE VAPOR DE AGUA A TRAVÉS DE EMPAQUES

Datos Cereal	
ºT del ambiente	15 ºC
HR del ambiente	67,50%
Aw del producto	0,293
*Permeabilidad g mm/m2 dia kPa:	
Polietileno (40 u)	2,50E-02
Aluminio (6,35 u)	1,00E-04
Polipropileno (20 u)	0,041

Fuente: Olvera M., Estudio del efecto de las Condiciones de Envasado y Empacado en el Tiempo de Vida útil de Bocaditos de Maíz Estrusados Almacenados a Temperatura Ambiente. (35)

*: www.fagro.edu.uy/~alimentos/cursos/frutas/docs/Envases2006.pdf

Las valores de permeabilidades que se usaron en el Simulador de Transferencia de masa se las obtuvo por

medio de la bibliografía citada; este valor se encuentra en condiciones de 38°C y 90% de humedad relativa para el polietileno y polipropileno. Cabe recalcar que la transferencia de vapor de agua a través del aluminio es muy pequeña y para poder obtener buenos resultados se asumió un valor de permeabilidad muy pequeño y este fue de 1 x 10^{-4} g mm/m2 dia kPa.

4.3 Comparación de resultados con los valores experimentales.

Los valores experimentales siempre van a proporcionar resultados diferentes a los resultados que se obtienen al utilizar modelos matemáticos ya que los autores de los estudios realizados de diferentes productos ajustan sus datos y las condiciones del medio para de esta manera obtener resultados más precisos.

Los resultados de los datos que se tomaron como ejemplo para poder comparar el Simulador de Transferencia de masa con los experimentales se encuentran en la tabla 9.

TABLA 9

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Secado		
	S.T.M.	**Alava (2007)**
Tiempo de Secado del Zapallo	5,49 horas	4,21 horas
Deshidratación Osmótica		
	S.T.M.	**Curso Deshidratación**
Tiempo de D.O.del banano	46.8 min	45 min
Permeabilidad		
	S.T.M.	**Olvera (2006)**
Velocidad de Transferencia del vapor de agua en empaque de cereal	0,010 g/dia m2	0,012g/dia m2

S.T.M. = Simulador de Transferencia de masa

Eficiencia del Simulador de Transferencia de masa

La data experimental citada en los anexos G, H e I fueron corridos en el programa para de esta manera poder determinar la eficiencia a partir de los porcentajes de error, estos se presentan a continuación para cada proceso en las tablas 10, 11 y 12.

TABLA 10

PORCENTAJE DE ERROR EN CÁLCULO DE TIEMPO DE SECADO

Secado	S.T.M.	Resultado Experimental	% de Error
Secado de Zapallo	5,49 horas	4,21 horas	22.18%
Secado de Banano	5,75 horas	5.05 horas	12,17%
Secado de Quinua	6,35 horas	5.45 horas	14.17%
Secado de Alverjitas	6.11 horas	5,20 horas	14,89%

S.T.M. = Simulador de Transferencia de masa

TABLA 11

PORCENTAJE DE ERROR EN CÁLCULO DE TIEMPO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

Deshidratación Osmótica	S.T.M.	Resultado Experimental	% de Error
D.O. del Mango	4,12 horas	4 horas	2,91%
D.O. del Banano N° 1	46,8 min	45 min	3,84%
D.O. del Banano N° 2	23.24 min	20 min	13.94%
D.O. del Banano N° 3	22,2 min	20 min	9.9%
D.O del Salmón	8,49 horas	8,38 horas	1.29%

S.T.M. = Simulador de Transferencia de masa

TABLA 12

PORCENTAJE DE ERROR EN CÁLCULO DE VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE UN GAS A TRAVÉS DEL EMPAQUE

Permeabilidad	S.T.M.	Resultado Experimental	% de Error
Cereal	0,010 g/dia m2	0,012g/dia m2	16,66%
Tostito	0,012g/dia m2	0,010g/dia m2	16,66%
Cachito	0,041g/dia m2	0,048g/dia m2	14,58%

S.T.M. = Simulador de Transferencia de masa

TABLA 13

PORCENTAJE DE ERROR PROMEDIO Y EFICIENCIA DEL SIMULADOR DE TRANSFERENCIA DE MASA

Porcentaje de Error Promedio	Eficiencia
12.72%	87.28%

En la tabla 13 se presenta el porcentaje de error promedio total y la eficiencia del Simulador de Transferencia de masa.

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. El lenguaje *visual Basic .net* es uno de los más empleados para el desarrollo de este tipo de herramientas, debido a su simplicidad y la facilidad de depurar aplicaciones.

2. En la herramienta se utilizó tres tipos de transferencia de masa: Secado, Deshidratación Osmótica y Permeabilidades. En secado se observó que el porcentaje de error para el Tiempo de Secado del Zapallo fue del 22.18%, para el banano, quinua

y alverjitas el error fluctúa entre 12.10% y 14.57%. En deshidratación osmótica se observó que para el tiempo de deshidratación osmótica del mango, banano y salmón tiene una variación entre el 1.29 % y 13.94%. En Permeabilidad se observó que la velocidad de transmisión de gases a través del empaque del cereal, tostito y cachito presenta un porcentaje de error entre el 14.58% y 16.66%.

3. Se puede concluir que la eficiencia global del Simulador de Transferencia de masa tiene un promedio del 87.28% y un porcentaje de error promedio de 12.72%.

4. El Simulador de Transferencia de masa puede ser una herramienta útil en la enseñanza de las operaciones de transferencia de masa, ya que permite al estudiante visualizar comportamientos, predecir resultados de las operaciones de secado, deshidratación osmótica y permeabilidad en materiales de empaque de una manera más dinámica.

5. Con esta herramienta se puede calcular tiempo total de Secado; tiempo necesario para alcanzar una concentración determinada en procesos de Deshidratación Osmótica de alimentos así como la Velocidad de Transmisión de gases a través de materiales de empaque. Todos estos parámetros sirven de referencia para establecer un proceso o la vida útil de un producto.

6. La desventaja que se presento durante el desarrollo de la tesis fue que hubo insuficiencia de datos experimentales para los modelos aplicados en la herramienta.

Recomendaciones:

1. Se recomienda disponer de un historial de datos experimentales para que el Simulador de Transferencia de Masa pueda ser validado con mayor precisión. A su vez la herramienta queda disponible para futuras investigaciones en las cuales se puedan agregar nuevos cálculos basados en los procesos mencionados anteriormente.

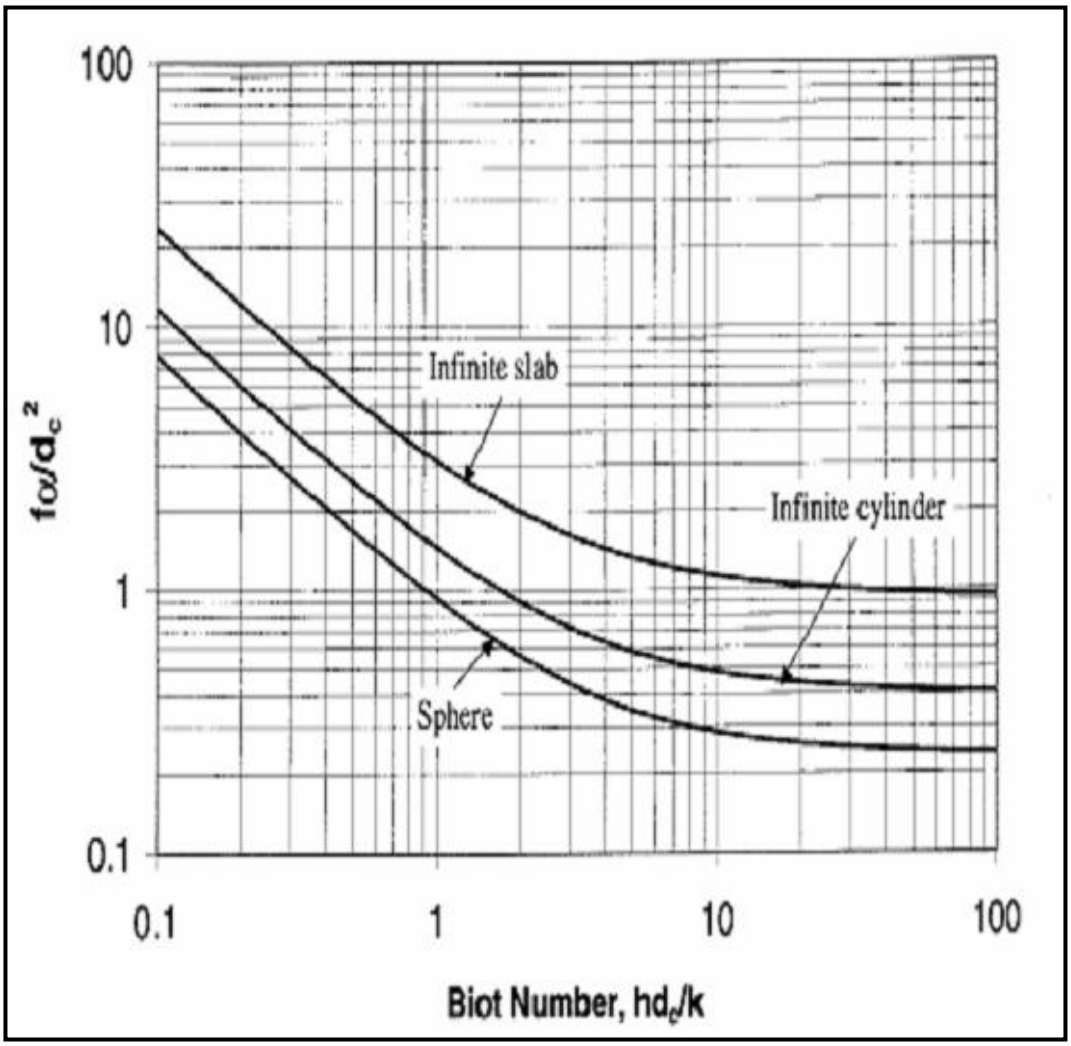
2. El simulador de transferencia de masa en el proceso de deshidratación osmótica ofrece al usuario trabajar con tres geometrías específicas que son placa infinita, esfera y cilindro, se recomienda estudiar los modelos matemáticos que puedan describir a este proceso y que estos permitan trabajar con otras formas geométricas.

3. Se recomienda además tener un estudio más profundo de los diferentes mecanismos de transferencia de masa que se presentan en los alimentos sean estos procesos de extracción, separación, etc para el diseño de nuevas herramientas de cálculos que puedan ser utilizadas en las industrias.

ANEXOS

ANEXO A

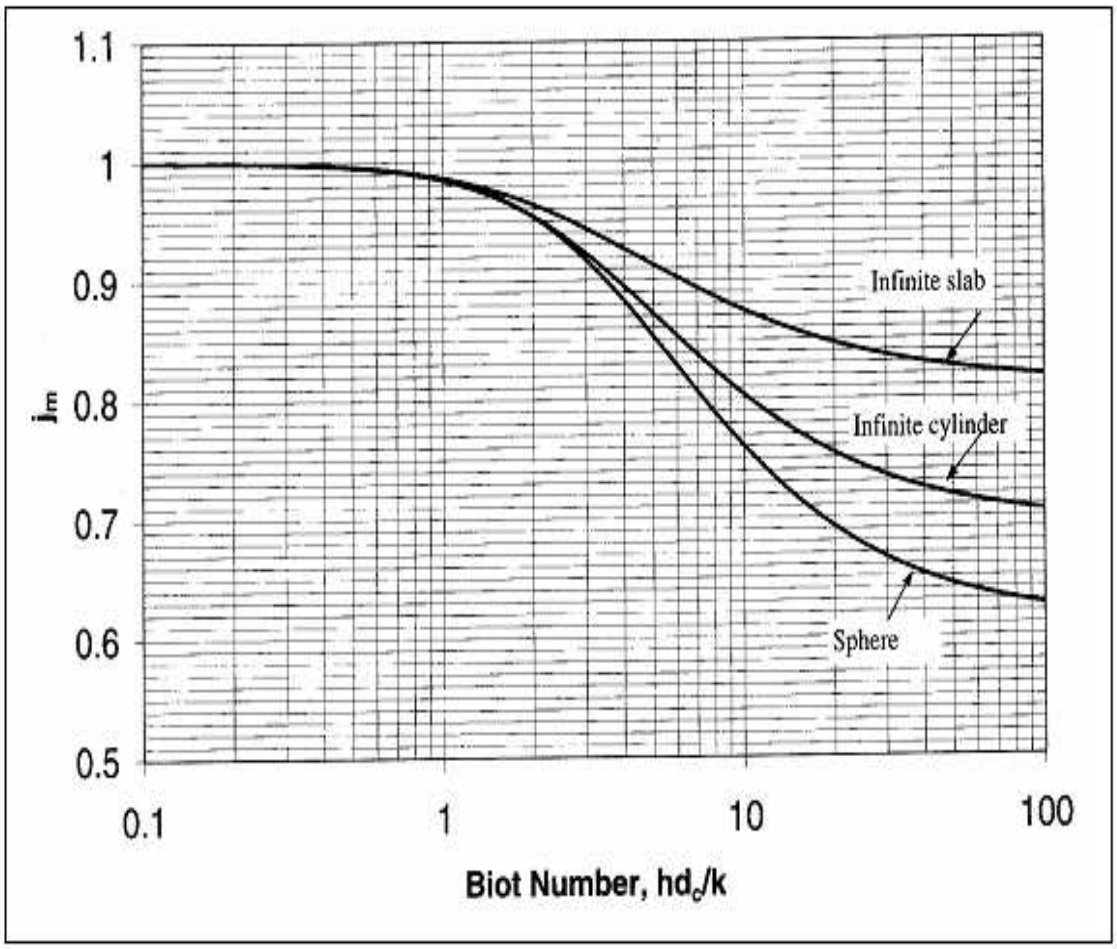
PARAMETRO DE VELOCIDAD DE SECADO, f_h , COMO UNA FUNCION DEL NUMERO DE BIOT



Fuente: Introducción a la Ingeniería en Alimentos (33)

ANEXO B

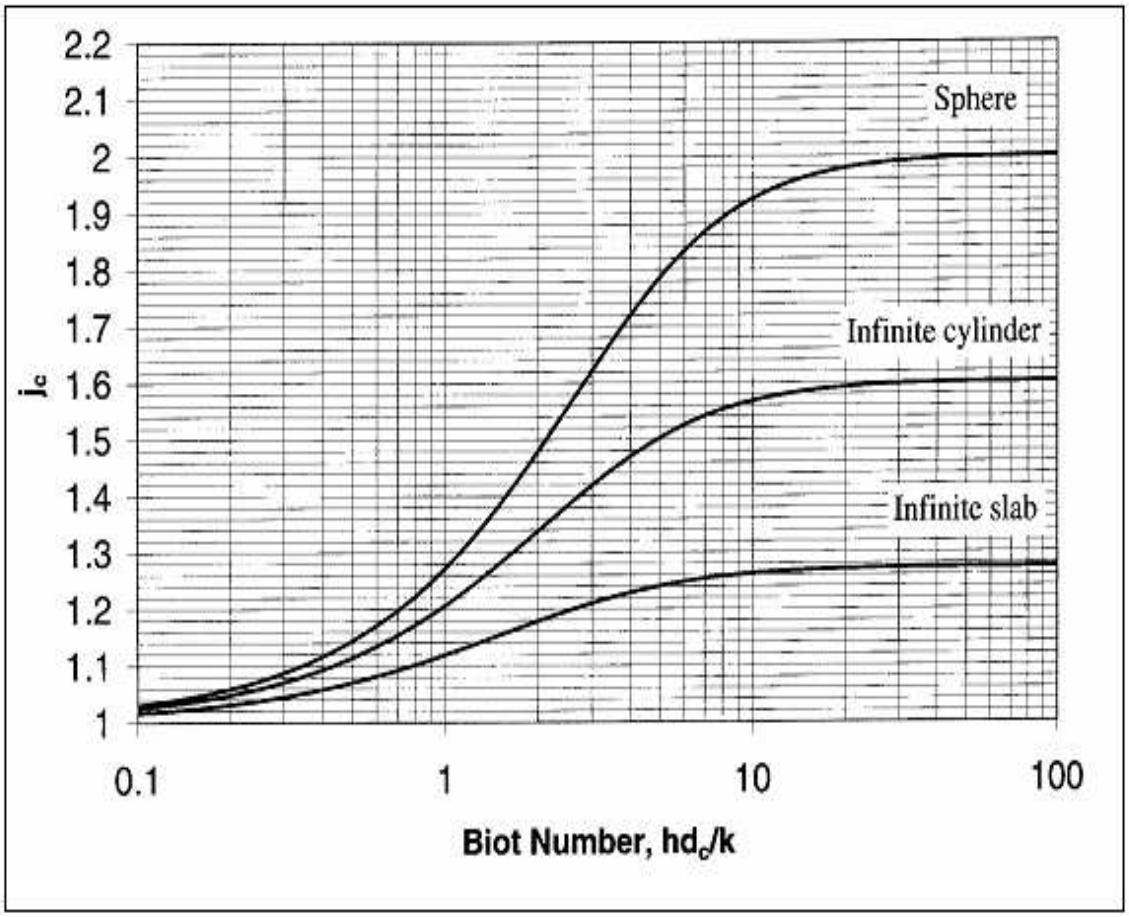
PROMEDIO DEL FACTOR LAG, J_m DE UNA ESFERA, CILINDRO INFINITO Y UNA PLACA INFINITA COMO UNA FUNCION DEL NUMERO DE BIOT



Fuente: Introducción a la Ingeniería en Alimentos (33)

ANEXO C

PROMEDIO DEL FACTOR LAG, J_c DE UNA ESFERA, CILINDRO INFINITO Y UNA PLACA INFINITA COMO UNA FUNCION DEL NUMERO DE BIOT



Fuente: Introducción a la Ingeniería en Alimentos (33)

ANEXO D

TABLA DE VAPOR SATURADO

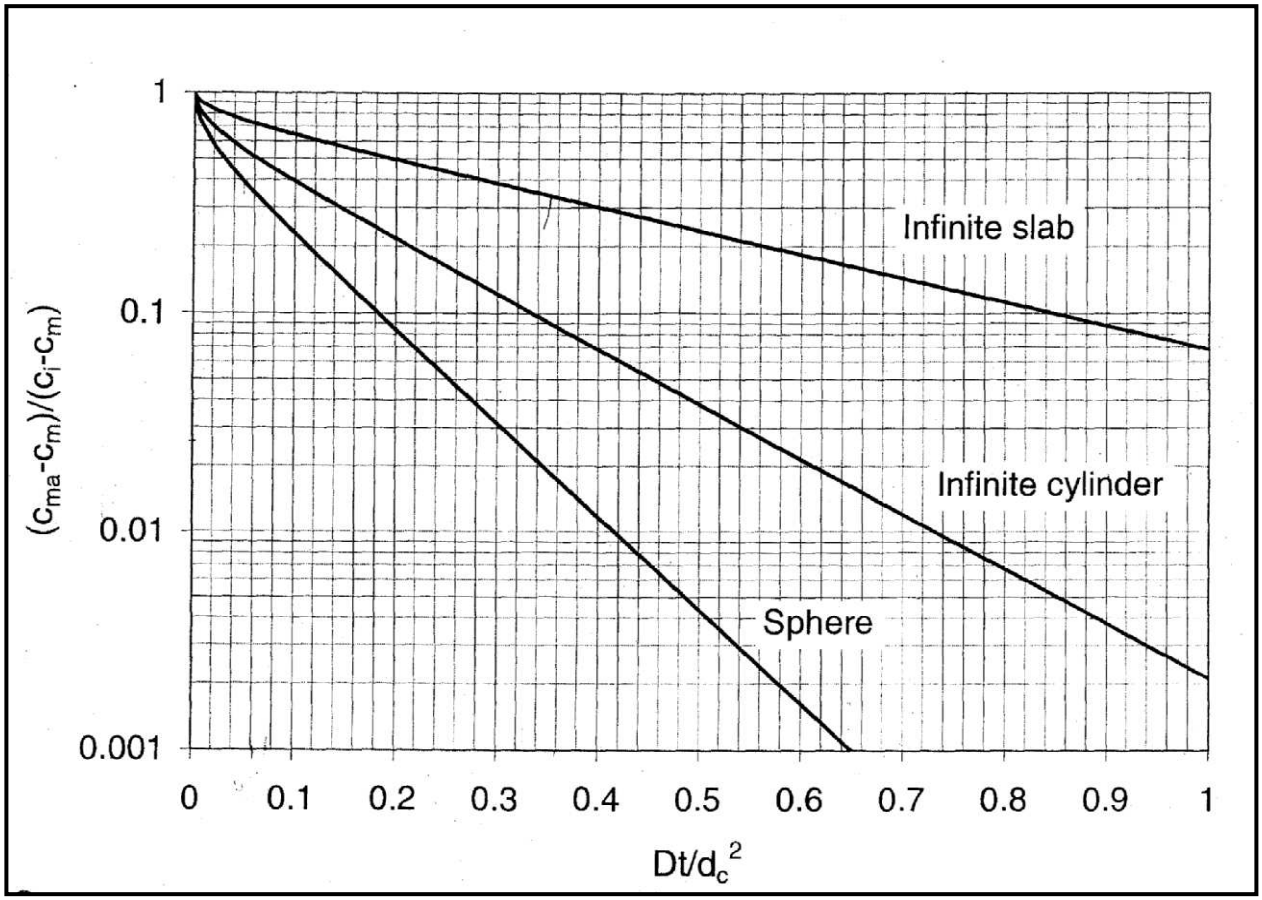
Saturated water—Temperature table

Temp., T °C	Sat. press., P_{sat} kPa	Specific volume, m³/kg: Sat. liquid, v_f	Specific volume, m³/kg: Sat. vapor, v_g	Internal energy, kJ/kg: Sat. liquid, u_f	Internal energy, kJ/kg: Evap., u_{fg}	Internal energy, kJ/kg: Sat. vapor, u_g	Enthalpy, kJ/kg: Sat. liquid, h_f	Enthalpy, kJ/kg: Evap., h_{fg}	Enthalpy, kJ/kg: Sat. vapor, h_g	Entropy, kJ/kg · K: Sat. liquid, s_f	Entropy, kJ/kg · K: Evap., s_{fg}	Entropy, kJ/kg · K: Sat. vapor, s_g
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
	Sat.											

Fuente: WELTY R., Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa (41)

ANEXO E

ESTADO NO ESTACIONARIO DE TRANSFERENCIA DE MASA PARA UNA CONCENTRACIÓN PROMEDIO EN TRES GEOMETRÍAS (ESFERA, CILINDRO INFINITO, PLACA INFINITA)



Fuente: Introducción a la Ingeniería en Alimentos (33)

ANEXO F

VALORES DE DIFUSIVIDAD EFECTIVA PARA AGUA Y SÓLIDOS

$D_{e,w}$ (m^2/s)	$D_{e,s}$ (m^2/s)	Fruta	T (°C)	Concentración (°Brix)	Referencia
$15x10^{-9}$ a $60x10^{-9}$		manzana	30-50	50-70	Conway *et al.*, 1983 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
$0,157x10^{-9}$ a $1,046x10^{-9}$	$0,172x10^{-9}$ a $1,048x10^{-9}$	manzana	20-50	65	Salvatori *et al.*, 1999
$0,016x10^{-9}$ a $0,187x10^{-9}$	$0,013x10^{-9}$ a $0,211x10^{-9}$	manzana	20-50	65	Salvatori *et al.*, 1999
$0,0332 x10^{-9}$ a $0,213 x10^{-9}$	$0,0385 x10^{-9}$ a $0,108 x10^{-9}$	manzana	20-50	40-60	Kaymak *et al.*, 2000
$0,314x10^{-9}$ a $0,655x10^{-9}$	$0,107x10^{-9}$ a $0,933x10^{-9}$	papaya	30-50	50-70	Rodríguez *et al.*, 2003
$1,3x10^{-9}$	$3,47x10^{-9}$	papaya	25	saturado	Mendoza *et al.*, 2002
$0,347 x10^{-9}$ a $1,92 x10^{-9}$	$0,199 x10^{-9}$ a $3,6 x10^{-9}$	pera	40-60	40-70	Park *et al.*, 2002
$1,72 x10^{-9}$	$0,2 x10^{-9}$ a $0,46 x10^{-9}$	piña	50-70	50-70	Waliszewski *et al.* 2002
$1,48 x10^{-9}$ a $3,24 x10^{-9}$	$0,53 x10^{-9}$ a $1,54 x10^{-9}$	piña	30-50	40-70	Rastogi *et al.*, 2004
$0,6x10^{-9}$ a $2,5x10^{-9}$		piña	30-50	50-70	Beristain *et al.*, 1990 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
$0,85x10^{-9}$ a $2,43x10^{-9}$		banano	25-45	40-70	Rastogi *et al.*, 1997a
$0,018x10^{-9}$ a $0,077x10^{-9}$		mango	30	35-65	Giraldo *et al.*, 2003

Fuente: Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica (27)

ANEXO G

DATOS EXPERIMENTALES DE SECADO

- Desarrollo de Harina de Zapallo

DATOS CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA	
Tiempo (min)	**Peso (g)**
0	12
5	9,1
10	6,1
15	3,6
20	2,1
25	1,2
30	1,15
35	1,15
40	1,15
45	1,15
50	1,15
55	1,15
60	1,15
Peso del solido	1.13 E-3
Humedad en Equilibrio	0,7 (g H2O/gss)
Humedad Crítica Real	6,353 (g H2o/g ss)
Area (m2)	7,20E-03

Temperatura de Bulbo Húmedo (ºC)	36
Calor Latente de vapor (Kj/Kg)	2416,24
Temperatura de Trabajo (ºC)	70
Flujo de aire seco (Kg/hm3)	15207.76
Tiempo	4,21 horas

Fuente: Desarrollo del Proceso y Caracterización de Harina de Zapallo y Formulación de Subproductos.(1)

- Secado de banano sin Tratamiento Osmótico

Tiempo (min)	Peso (g)
0	5
5	4,1
10	3,8
15	3
20	2,5
25	2,3
30	1,9
35	1,6
40	1,5
45	1,3

Temperatura de Trabajo	70°C
Temperaua del Bulbo Húmedo	36
Peso del sólido Contenido	1,15
Humedad de Equilibrio	0,13 gH2O/gss
Area de muestra	0,00188 m2
Calor Latente de vapor	2416,24Kj/Kg
Flujo de aire seco	15207.76Kg/hm3
Tiempo	5.05 horas

Fuente: Experimentos de materia de Deshidratación de Alimentos (8)

- Secado de Quinua para Sopas Instantáneas

Tiempo (min)	Peso (gramos)
0	57,4
10	45
20	35,5
30	30,6
60	23,5
70	23,5

Temperatura de Trabajo	70°C
Temperaua del Bulbo Húmedo	32 °C
Peso del sólido Contenido	15,29
Humedad de Equilibrio	0,005gH2O/gss
Area de muestra	0,03798 m2
Calor Latente de vapor	15204Kj/Kg
Flujo de aire seco	2416,2Kg/hm3
Tiempo	5.45 Horas

Fuente: Proyecto de Curso de Deshidratación de Alimentos (14)

- Secado de alverjitas

Tiempo (min)	Peso (gramos)
0	3,05
10	2,525
25	2,062
40	1,796
60	1,507
120	0,967
195	0,56
250	0,5

Temperatura de Trabajo	40°C
Temperaua del Bulbo Húmedo	24 °C
Peso del sólido Contenido	1.8
Humedad de Equilibrio	0.02 gH2O/gss
Area de muestra	4.84e-4m2
Calor Latente de vapor	2215Kj/Kg
Flujo de aire seco	13237.2Kg/hm3
Tiempo	5,20 Horas

Fuente: Programa para el análisis y simulación de Procesos de Deshidratación de Alimentos. (40)

ANEXO H

DATOS EXPERIMENTALES DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

- Deshidratación osmótica del mango

Fruta	Mango
Forma	Rectangular
Dimensiones	1,0 cm x 1,1 cm
ºBrix inicial	9,2
Solidos ganados (g sólidos/ g mango fresco)	0,16
ºBrix de la solución	55
Espesor (m)	0,01
Coeficiente de difusión de sólidos (m2/s)	$0,016 \times 10^{-9}$

Fuente: Estudio del efecto de la presión sobre la deshidratación osmótica del mango (21)

- Deshidratación Osmótica del Banano N° 1

Temperatura	70 °C
Solución sacarosa	55 °Brix
Diametro	2 cm
Coeficiente de difusión	7.8 x 10-9 m2/s
°Brix Inicial	16,01
Solidos Ganados	0,3148 gsolidos/gfruta
Tiempo	45 min

- Deshidratación Osmótica del Banano N° 2

Temperatura	70 °C
Solución sacarosa	55 °Brix
Diametro	2 cm
Coeficiente de difusión	7.8 x 10-9 m2/s
°Brix Inicial	15.09
Solidos Ganados	0,2482 gsolidos/gfruta
Tiempo	20 min

- Deshidratación Osmótica del Banano N° 3

Temperatura	70 °C
Solución sacarosa	55 °Brix
Diametro	2 cm
Coeficiente de difusión	7.8 x 10-9 m2/s
°Brix Inicial	16,01
Solidos Ganados	0,238 gsolidos/gfruta
Tiempo	20 min

Fuente: Experimentos de materia de Deshidratación de Alimentos (8)

- Deshidratación Osmótica de Salmon

Forma	Placa Infinita
Espesor	4,8 x 10-3
Concentración de solución	0,533 Kg sólidos/Kg de producto
Concentración Inicial:	0,012 Kg sólidos/Kg de producto
Concentración deseada	0,4 Kgsólidos/ Kg de producto
Coeficiente de difusión	8,78 x 10-11 m2/s
Tiempo de D.o.	8,38 horas

Fuente: Introducción a la Ingeniería en alimentos; Ejercicios de Aplicación (33)

ANEXO H

DATOS EXPERIMENTALES DE PERMEABILIDADES

- Condiciones de envasado en bocaditos de maíz extrusado

Datos Cereal	
ºT del ambiente	15 ºC
HR del ambiente	67,50%
Aw del producto	0,293
*Permeabilidad g mm/m2 dia kPa:	
Polietileno (40 u)	0.02
Aluminio (6,35 u)	1,00E-04
Polipropileno (20 u)	0,041
WVTR	0,012 g/ día m2

Datos de Tostito	
ºT del ambiente	15 ºC
HR del ambiente	67,50%
Aw del producto	0,215
*Permeabilidad g mm/m2 dia kPa:	
Polietileno (40 u)	0.02
Aluminio (6,35 u)	1,00E-04
Polipropileno (20 u)	0,041
WVTR	0,0104 g/ día m2

Datos de Cachito	
Datos	
ºT del ambiente	32 ºC
HR del ambiente	83,40%
Aw del producto	0,273
*Permeabilidad g mm/m2 dia kPa:	
Polietileno (40 u)	0.02
Aluminio (6,35 u)	1,00E-04
Polipropileno (20 u)	0,041
WVTR	0,0481 g/ día m2

Fuente: Estudio del Efecto de las condiciones de Envasado y Empacado en el Tiempo de Vida Útil de Bocaditos de Maíz Extrusados Almacenados a Temperatura Ambiente (28)

BIBLIOGRAFÍA

1. ALAVA C. , Desarrollo del Proceso y Caracterización de Harina de Zapallo y Formulación de Subproductos. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007

2. ANALISIS TERMODINAMICOS DE FLUJOS http://bacterio.uc3m.es/docencia/doctorado/sistemas_complejos/biofisica/biophys24.pdf

3. ANTONIO G., AZOUBEL P., ALVES D., Osmotic Dehydration of Papaya (Carica papaya L.): Influence of Process Variables. School of Food Engineering, Campinas Brasil. 2004

4. BRICEÑO L., HATTA B. CARRANZA M., Almacenamiento Refrigerado del Brócoli (Brássica oleracea var Itálica) Envasado en películas plásticas flexibles. Departamento Académico de Ciencia e Ingeniería de Almientos y Preoductos Agropecuarios de la Facultad de Industrias Alimentarías. UNALM. Pags 121-130

5. BRICEÑO L., VASQUEZ A., Almacenamiento Refrigerado de la Mandarina (Citrus unshio) Satsuma recubierta con películas permeables. Departamento Académico de Ciencia e Ingeniería de Almientos y Preoductos Agropecuarios de la Facultad de Industrias Alimentarías. UNALM. Pags 152-167

6. CALDERON M. Caracterización y vida útil de trozos de apio utilizando tres empaques alternativos. Laboratorio de Tecnología Poscosecha. Centro de Investigaciones Agronómicas. Escuela de Ingeniería Agrícola. Universidad de Costa Rica. 2005

7. CANO-CHAUCA M., RAMOS A., STRINGHETA P., PEREIRA J. Drying Curves and Water Activity Evaluation of Dried Banana. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Federal de Vicosa . Brasil. 2004

8. Curso de Deshidratación de Alimentos. Facultad de Ingenieria Mecánica y ciencias de la Producción (FIMCP). Escuela Superior Politécnica del Litoral.

9. COMAPOSADA JOSEPH, Sorption Isotherms and Water Diffusivity in Muscles of Pork Ham at Different NaCl Contents, Universidad Politécnica de Catalunya, 1999, Págs 50-89

10. CONTRERAS L., Aspectos teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos, Centro Universitario “José Martí, Cuba, Págs 1-8

11. DÁVILA L., LÓPEZ L., Mass transfer in vacuum osmotic dehydration of ananas comosus L. Merr "pineapple" slices, Lima, 2005

12. Diaz I., Arjana V., Envases y Envasado. Envases Activos e Inteligentes, Universidad Nacional de Quilmes

13. DORAN M., Principios de Ingeniería de los bioprocesos, Editorial ACRIBIA S.A:; Zaragoza - España, 1998, Págs 199-207

14. ESPINOZA K., CAÑARTE P., RIVADENEIRA M., CHAUCALA K. Proyecto de Curso de Deshidratación de Alimentos. Escuela Superior Politécnica del Litoral. (2007)

15. FITO P, TALENS P, MARTÍNEZ-MONZÓ J, CHIRALT A, Cálculo de la cinética de deshidratación osmótica con y sin pulso de vacío, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia – España

16. GASPARETO, OLIVEIRA, DA SILVA, MAGALHÃES, Influence of Osmotic Treatment onthe Drying of "Nanica" Bananas (Musa cavendishii, L.) in a Fixed Bed Dryer, Univ. Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, Págs 9-16

17. GEANKOPLIS C; Procesos de transporte y operaciones unitarias, Tercera Edición, Editorial Continental S.A., Mexico D.F, 1998, Págs. 425-460 y 596-604

18. GRAZIELLA C. AZOUBEL P., G. DENISE Osmotic Dehydration os Papaya (Carica papaya L.): Influence of Process Variables. School of Food Engineering. Brasil.2004

19. HELDMAN D, LUND D., Ingeniería en Alimentos, Segunda Edición, Editorial Advisory Board; Págs 472-486,708

20. HONORATO G, OLIVEIRA E., de S. ALSINA, MAGALHÃES M., Study of the Kinetic Drying Process for Shrimp Cephalothorax, Universidade. Fed. do Rio Grande do Norte, Depto. de Engenharia Química, Centro de Tecnologia. Brasil, 2005, Págs 3-10

21. HUAYAMAVE CRISTINA, Estudio del efecto de la presión sobre la deshidratación osmótica del mango, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005

22. MATUSEK A. MERESEZ P. Modelling of sugar transfer during Osmotic Dehydration of Carrots. Department of Biochemistry and Food Technology Budapest University of Technology and Economics. Budapest- Hungary.2003

23. MILLÁN F., OSTOJICH Z., Aplicación de un diseño rotable en el modelado empírico de la deshidratación osmótica en frutas, Universidad Simón Bolívar (USB), Departamento de Tecnología de Procesos Biológicos y Bioquímicos, Venezuela, 2005

24. MONACO, E., CHIESA A. TRINCHERO G. Selección de Películas Polimércias para su empleo con Lechuga en Atmósfera Modificada. Universidad de Buenos Aires, San Martín, Buenos Aires- Argentina.2005

25. NORIEGA M., ESTRADA O., Diseño de empaques, Instituto de Capacitación e Investigación del plástico y del Caucho (ICIPC).

26. OCAMPO A. Modelo Cinético del Secado de la Pulpa de Mango. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín – Colombia. 2006

27. OCHOA I., AYALA A.,Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica, Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología de Alimentos, Reynosa, México,2005 Págs. 330-342

28. OLVERA M., Estudio del Efecto de las condiciones de Envasado y Empacado en el Tiempo de Vida Útil de Bocaditos de Maíz Estrusados Almacenados a Temperatura Ambiente, 2006

29. REYES G. CORZO O., BRACHO N. Optimización de la Deshidratación Osmótica de la Sardina mediante la metodología de superficies de respuesta. Universidad de Oriente, Venezuela

30. RINCON A – Macro Engineering. Conceptos Básicos para la Coextrusión de las Películas de altas barreras, 2007

31. ROMERO C., PEÑAHERRERA V., CARVAJAL F., Deshidratación Osmótica de frutas de Hoja Caduca, Proyecto de Investigación DESOFRUT, Consejo Nacional de Universidades y Escuelas Politécnicas del Ecuador-CONUEP y la Universidad Técnica de Ambato.

32. SINAL S. FEMINIA A., Identificación del Coeficiente de Difusión en un proceso de Transferencia de materia en productos con geometría esférica, Universidad Politécnica de Valencia, España

33. SINGH R., HELDMAN D., Introducción a la Ingeniería en alimentos, Tercera Edición, Advisory Borrad, 2001, Págs 282-290, 302-303 y 497-525

34. SOTO P., Deshidratación osmótica: alternativa para conservación de frutas tropicales, Departamento de Biotecnología y Bioingeniería del Cinvestav, 2002, Págs 321-323

35. TORO A., ARISTIZÁBAL J., VELASCO R. Estudio de la Obtención de Harina de Hojas de Yuca (Manihot esculenta Crantz) para Consumo Humano. Universidad del Cauca. Cali Colombia. 2006

36. Transferencia de masa
http://www.monografias.com/trabajos10/semi/semi.shtml

37. TREYBAL , Operaciones de transferencia de masa, Segunda Edición, LIBROS McGRAW-HILL DE MEXICO S.A., 1980, Págs 100-114

38. VEGA A., ANDRES A. FITO P. Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (Capsicum annuum L. cv Lamuyo). Universidad de La Serena, 2005 Pags 3-11

39. VIVANCO, Mass transfer in osmotic dehydration of Atlantic Bonito (Sarda sarda) fillets, International Department of China Chemical Industry News, 2003

40. WELTI J, VERGARA F.. Programa para el análisis y simulación de Procesos de Deshidratación de Alimentos. Universidad de las Américas, México

41. WELTY R., Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa, Segunda Edición, Editorial LIMUSA S.A., México, 1999, Págs 590-595

42. WIKIPEDIA, La enciclopedia libre
http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Fick