

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

DEPARTAMENTO ACADEMICO DE CIENCIA, TECNOLOGIA

E INGENIERIA DE ALIMENTOS



**OPTIMIZACIÓN DE LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE
MANZANA (*Malus Domestica Borkh*) EN FUNCIÓN DE LA
DENSIDAD Y POROSIDAD**

Tesis

**Para optar el título de:
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

Presentado por:

MANUEL RICARDO GUERRERO OCHOA

TINGO MARIA – PERÚ

2005

Q02

G8

Guerrero Ochoa, Manuel Ricardo

Optimización de la deshidratación de rodajas de manzana (*Malus domestica Borkh*) en función de la densidad y porosidad.

Tingo Maria, 2005

103h.; 24 figs. 11 cuadros. 42 ref. ; 30 cm

Tesis (Ing. Industrias Alimentarias). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo Maria (Perú). Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias.

MALUS PUMILA/ MANZANA/ DESHIDRATACION/ DENSIDAD/
POROSIDAD/ BOTANICA/ TINGO MARIA/ RUPA RUPA/ LEONCIO
PRADO/ HUANUCO/



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María
FACULTAD DE INGENIERIA EN
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

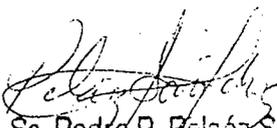
ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos en acto público el 31 de marzo del 2005, a horas 06:04 p.m. en la Sala de Grados de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la ciudad de Tingo María, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, para calificar la tesis presentado por el Bachiller en Ciencias Industrias Alimentarias: **Manuel Ricardo GUERRERO OCHOA**.

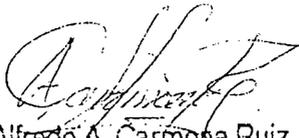
**“OPTIMIZACION DE LA DESHIDRATACIÓN DE RODAJAS DE
MANZANA (Malus Domesticus Borkh) EN FUNCION A LA
DENSIDAD Y POROSIDAD”**

Después de haber escuchado la sustentación, las respuestas a las preguntas formuladas, lo declaran aprobado con el calificativo de **MUY BUENO**, en consecuencia el Bachiller: **Manuel Ricardo GUERRERO OCHOA**, queda apto para recibir el título de **Ingeniero en Industrias Alimentarias** del Consejo Universitario, de conformidad con el Art.22° de la Ley Universitaria 23733; los artículos 43° y 45° del Estatuto y los artículos 95° y 96° del Reglamento General de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Tingo María, 01 de abril del 2005


Ing°. M. So. Pedro P. Peláez Sánchez
Presidente




Ing°. Alfredo A. Carmona Ruiz
Vocal


Ing°. José Blas Matienzo
Vocal

2005
04/01

2005
03/31

DÉDICATORIA

A DIOS:

Por SER y EXISTIR en mí y ser la fuerza impulsora de mis más mejores acciones.

A MIS PADRES:

RICARDO GUERRERO y MERCEDES OCHOA;

por brindarme su amor y apoyo incondicional para cumplir todas mis metas.

A MIS HERMANOS:

JUAN CARLOS, LUÍS, JESSICA, ROCÍO, JESÚS y PATRICIA que siempre estuvieron y están conmigo apoyando y deseandome lo mejor.

A SUSANA Y CHRISTOPHER:

Por que desde que aparecieron en mi vida, ésta tiene el mayor motivo de mi existencia presente y futura.

AGRADECIMIENTO

A los Asesores: Dr. MILBER URENA PERALTA (UNALM); por su invaluable aporte intelectual y anímico en todo momento desde la ejecución del proyecto hasta la culminación de la Tesis y al **Ing. WILLIAM ROLDAN CARBAJAL (UNAS)**, por la paciencia desplegada y apoyo desinteresado.

Al CONCYTEC (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), por su confianza y apoyo económico en la ejecución de parte de la tesis presentada.

A la Ing. SUSANA HUARACHE ZENTENO, quien colaboró desinteresadamente en la realización de las pruebas experimentales, y me brindó todo su apoyo para poder culminar con éxito este propósito.

Al PERSONAL de los Laboratorios de Instrumentación, y Planta Piloto de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina; por su gran capacidad de colaboración en las pruebas experimentales de la presente investigación.

A MIS PROFESORES DEL PRE-GRADO UNIVERSITARIO (UNAS), por brindarme conocimientos sólidos y prepararme para poder desarrollar con éxito un pos-grado, una investigación y desempeñarme con soltura en el campo laboral.

NDICE

	Pag.
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION BIBLIOGRÁFICA	4
A. ANTECEDENTES	4
B. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS DE LA MANZANA	6
C. DESHIDRATACIÓN	10
1. Mecanismo de deshidratación por aire caliente	11
2. Secadores de bandeja y compartimientos	15
D. PROPIEDADES DE ALIMENTOS Y DESHIDRATACIÓN.....	18
E. DENSIDAD	22
F. POROSIDAD	23
G. ENCOGIMIENTO	24
H. METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA	25
1. Construcción del modelo	28
2. Análisis estadístico de la superficie de respuesta	31
III. MATERIALES Y MÉTODOS	37
A. LUGARES DE EJECUCION	37
B. MATERIA PRIMA E INSUMOS	37
C. EQUIPOS Y MATERIALES	37
1. Equipos	37
2. Materiales	38

D. MÉTODOS DE ANÁLISIS	38
1. Índice de madurez de la materia prima	38
2. Humedad	38
3. Densidad real	38
4. Densidad aparente y Volumen	44
5. Porosidad	45
E. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	45
F. DISEÑO EXPERIMENTAL	51
G. ANALISIS ESTADISTICO	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
A. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	55
1. Índice de madurez	55
2. Humedad, densidades y porosidad	55
B. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE DESHIDRATACION EN FUNCION DE LAS DENSIDADES Y LA POROSIDAD	57
C. GRADO DE ENCOGIMIENTO DE LA MANZANA	76
V. CONCLUSIONES	80
VI. RECOMENDACIONES	81
VI. BIBLIOGRAFIA	82
ANEXOS	87

INDICE DE CUADROS

	Pág.
1. Algunos constituyentes de la manzana delicia en ppm.....	9
2. Diseño experimental para optimizar la deshidratación de rodajas de manzana delicia en función de las densidades y la porosidad.....	52
3. Diseño estadístico para optimizar la deshidratación de rodajas de manzana delicia en función de las densidades y la porosidad	54
4. Valores de humedad, densidad y porosidad de materia prima.....	56
5. Densidad aparente, densidad real y porosidad de las rodajas del parénquima interno y externo de manzana delicia, a diferentes condiciones de temperatura, tiempo y velocidad de deshidratación ..	58
6. Valores óptimos obtenidos por optimización de superficie de respuesta	65
7. Valores máximos y mínimos y valor óptimo de las densidades y porosidad obtenidas	69
8. Humedad, volumen y encogimiento de las rodajas de manzana a 5 horas de deshidratación	77
9. Análisis de varianza para la densidad aparente	93
10. Análisis de varianza para la densidad real	96
11. Análisis de varianza para la porosidad	99

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Manzana delicia	8
2. Isotermas de desorción de rodajas de manzana	13
3. Movimiento de humedad durante la deshidratación	17
4. Un ejemplo de superficie de respuesta	27
5. Superficie de respuesta de un ploteo en 3D	33
6. Superficie de respuesta de un ploteo de silla	34
7. Ploteo de contornos de una respuesta máxima	35
8. Ploteo de contornos de un punto de silla.....	36
9. Equipo de determinación de densidad real.....	42
10. Curva de calibración del equipo de determinación de densidad real.	43
11. Etapas de la investigación.....	46
12. Flujo de operaciones para la obtención de slices (rodajas) deshidratados de manzana	47
13. Sección transversal de manzana ilustrando la dirección radial de toma de muestra	49
14. Comportamiento de la densidad aparente, densidad real y porosidad de rodajas de manzana delicia durante la deshidratación a condiciones óptimas de temperatura (75°C) y velocidad (2,0 m/s).	64
15. Efecto estandarizado que muestra los factores significativos para la densidad aparente	70
16. Efecto estandarizado que muestra los factores significativos para la densidad real	71

17. Efecto estandarizado que muestra los factores significativos para la porosidad	72
18. Interacción entre factores para la densidad aparente.	94
19. Interacción entre factores para la densidad real	97
20. Interacción entre factores para la porosidad	100
21. Superficie de respuesta para el parénquima interno	102
22. Superficie de contornos para el parénquima interno	102
23. Superficie de respuesta para el parénquima externo	103
24. Superficie de contornos para el parénquima externo	103

RESUMEN

Utilizando el método de Superficie de Respuesta, se determinó los parámetros óptimos de temperatura, tiempo y velocidad de deshidratación en función de los valores obtenidos de densidad real, densidad aparente y porosidad de rodajas de manzana (variedad Delicia). Asimismo, se determinó el grado de encogimiento a partir del volumen calculado con los valores de densidad aparente y humedad.

Los valores experimentales de densidad real y densidad aparente variaron inversamente proporcional al tiempo de deshidratación, mientras que la porosidad, calculada a partir de estas densidades varió de manera directamente proporcional. Tales variaciones se obtuvieron a condiciones de temperatura (75°C), tiempo (5h) y velocidad de aire (2 m/s) que hicieron mínimo el grado de encogimiento, expresado en densidades mínimas y porosidad máxima. El encogimiento encontrado fue isotrópico (50%).

Se ensayo con rodajas de 7 mm de espesor y 17 mm de diámetro extraídos de dos sectores del tejido parenquimático de la manzana, uno mas próximo a la cáscara (externo) y otro mas próximo al corazón (interno).

ABSTRACT

Using the response surface methodology, the optimal parameters from drying temperature, time and air velocity was determined in terms of true density, apparent density and porosity values from apple slices (*Delicious* variety). Also, the shrinkage grade from volume calculated with apparent density and humidity was determined.

The experimental values from apparent and true density varied inversely proportional to the time of dehydration, whereas the porosity, calculated to this densities, varied directly proportional. These variations, was obtained to temperature (75°C), time (5h) and air velocity (2 m/s) that minimized the shrinkage grade, expressed in minimal densities and maximal porosity. The isotropic shrinkage was founded.

Slices of thickness 7 mm and diameter 7 mm extracted of two apple parenquimatic tissue sectors, one more close to skin (external) and other more close to heart (internal), was assayed.

I. INTRODUCCIÓN

La necesaria optimización y mejor control de procesos empleados en la transformación y conservación de alimentos justifican toda acción encaminada al logro de este fin (Ureña, 1990).

La deshidratación es una de las tecnologías más relevantes utilizada en la conservación de alimentos cuyos fundamentos fisicoquímicos e ingenieriles en general son conocidos; sin embargo, el proceso de contracción, es decir, la disminución del volumen real (fenómeno de encogimiento) de los alimentos sometidos a esta operación no está suficientemente documentado. La literatura con datos experimentales sobre encogimiento es todavía muy deficiente con muchos investigadores asumiéndolo como despreciable.

Para el diseño de productos, equipos, máquinas y procesos es necesario conocer propiedades como la densidad y la porosidad de los alimentos, ya que fenómenos de transporte de calor, masa y momento se verán condicionados por estas. Esto se puede observar en operaciones como deshidratación, ahumado, blanqueado, fritura, enfriamiento evaporativo, extrusión y cocción. En las cuales, los alimentos sufren cambios de volumen o cambian por el encogimiento debido a la pérdida de humedad o la expansión debido a generación de gas o formación de poros. La porosidad es necesaria para resolver las ecuaciones de transporte para éstas operaciones unitarias. La densidad es la variable que más afecta las propiedades termofísicas y de transporte, además, los datos acerca de densidad para materiales alimenticios son limitados (Rahman *et al.*, 1996). El encogimiento y la porosidad son, también, importantes en la predicción de las propiedades

difusionales de alimentos durante la deshidratación (Lozano *et al.*, 1980; Rostein, 1997; Vagenas y Karathanos, 1991).

La manzana representa el cultivo frutal con mayor cantidad de material comestible homogéneo, lo que hace de ella una materia prima particularmente apropiada para estudios de deshidratación.

Del total de las variedades de manzanas existentes en el Perú, prácticamente la de mayor producción y uso en la industria alimentaria, apta para el deshidratado, corresponde a la variedad *Red delicious*, comúnmente llamada "delicia", cuyas características permiten alcanzar un producto de alta calidad aparente. Por otro lado, resulta positivo comprobar que la calidad de las manzanas peruanas, de esta variedad, viene mostrando una marcha ascendente. Si antaño las manzanas que nos enviaban nuestro vecino del sur (Chile) eran las que pedían precios con premio en base a mejores atributos, hoy podemos comprobar con satisfacción que las rojas deliciosas nacionales casi no tienen diferencia con sus pares extranjeras.

Esta variedad de manzana producida en mayor extensión en el Valle de Mala (sur de Lima) seguido por Arequipa, Ica y Huancavelica, tiene grandes condiciones para atender los mercados varias semanas antes que inicien la cosecha otros países latinoamericanos. Incluso en el Valle de Mala la producción llega a cubrir todo el año. La producción de manzanas deshidratadas es una de las actividades que desde el punto de vista comercial ha adquirido gran importancia, producto de la gran demanda que tienen los frutos secos derivados de los cambios en los hábitos de consumo de la población. La deshidratación es una alternativa para

diversificar su consumo y abaratar los costos de comercialización, dándole un mayor valor agregado estableciendo condiciones de deshidratación que permitan obtener productos con un bajo contenido de humedad y cuyas características físicas se vean lo menos afectadas.

Existen métodos de deshidratación artificial, que permiten realizar este proceso en forma rápida y homogénea. El secador de bandejas goza de gran popularidad debido a su simplicidad y gran versatilidad; características no superadas por cualquier otro tipo de secador. Alimentos de casi cualquier forma y tamaño pueden ser deshidratados, cambiando sólo las condiciones de operación (temperatura y velocidad de deshidratado), por lo cual para la presente investigación se hizo uso de un tipo de secador de bandejas a nivel piloto.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, y en la búsqueda de optimizar el proceso de deshidratación en función de sus principales características macroestructurales se desarrolló el trabajo de investigación que a continuación se presenta, teniendo como objetivos:

- Determinar densidad aparente, densidad real y porosidad de rodajas de manzana delicia en el proceso convectivo de deshidratación.
- Obtener los valores de temperatura, tiempo y velocidad de aire que optimicen el proceso de deshidratación (minimización del grado de encogimiento) de rodajas de manzana delicia.

II. REVISION BIBLIOGRAFICA

A. ANTECEDENTES

La pulpa de manzana consiste de diferentes regiones de tejido. Reeve (1953), realizó investigaciones histológicas en 5 variedades de manzana. Puntualizó que las regiones de tejido parecen ser similares en todas las variedades examinadas. Las diferentes regiones, sin embargo, son distintas unas de otras en tamaño y forma de las células del parénquima y de los espacios intercelulares.

Vincent (1989) y Khan y Vincent (1990), enfatizaron las diferencias en las dimensiones de las células y espacios intercelulares en el Parénquima Interior (cerca al corazón) y en el Exterior (cerca de la cáscara). Al Interior las células están organizadas en columnas más o menos radiales, las células son cilíndricas, arrinconadas y los espacios de aire están radialmente elongados y bien interconectados, mientras que al Exterior del parénquima, las células son groseramente esféricas, muestran poca orientación y los espacios de aire son más pequeños y no están bien interconectados.

Rostein (1987), desarrolló un completo método predictivo para obtener la difusividad efectiva con el propósito de modelar los procesos de deshidratación basados en las propiedades estructurales del tejido celular. El concluyó que la porosidad es un parámetro muy importante en la predicción de la difusividad y propiedades relativas a la difusión en la deshidratación de alimentos celulares (tales como frutas y vegetales).

Lozano *et al.* (1980), encontraron como ejemplo de la magnitud de encogimiento, que el volumen final de manzanas después de la deshidratación fue el 17% del volumen inicial; una cantidad escasamente justificable.

Wallapapan *et al.* (1983), encontró que la porosidad tiene un efecto directo en las otras propiedades físicas tales como el coeficiente de difusión de masa, la conductividad térmica y la difusividad térmica. Cuando los sistemas heterogéneos contienen fase gaseosa (poros), la densidad aparente es sin duda otro factor que la afecta (conductividad térmica), ya que involucra a la distribución de tamaños de partícula y porosidad.

Vincent (1989), encontró que la rigidez torsional (0,5–7 MPa) varía con la porosidad (0,83–0,54) en el caso de manzanas frescas. Así también se correlacionan las propiedades mecánicas y texturales de alimentos a la porosidad.

B. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS DE LA MANZANA

La manzana es la fruta que más ampliamente crece en nuestra costa Peruana, es de la familia de la Rosa (*Rosaceae*) y del genero *Malus*. La gran cantidad de manzanas comerciales son probablemente descendientes de *M. Sylvestris* de Europa y el sudoeste de Asia o de *M. Pumila*, o quizá híbridos de estas dos especies. Más formalmente, la manzana se considera por ser del genero *Pyrus*, pero ahora se distingue por la ausencia de arenosidad de las células en la pulpa. Muchas autoridades prefieren usar el binomial *Malus domestica* para la gran cantidad de manzanas comestibles (Seelig y Hirsh, 1978).

Históricamente las manzanas no tienen una región definida de procedencia pero se presume que son originarios de la región del Mar Caspio. Sir Joseph Hooker escribió en su "*Flora of British India*" que manzanas aparentemente silvestres, crecieron en las montañas del noroeste de la India. Según J.R. Magness citado por Seelig y Hirsh (1978), pomologista de la USDA, dijo que estas manzanas no solo eran consumidas frescas sino preservadas por desecación solar. Probablemente las manzanas silvestres que el hombre prehistórico consumía median entre 1 y 2 pulgadas de diámetro, eran muy ácidas y astringentes y su cultivo empezó con el inicio de la agricultura en Europa 4 siglos a.C. en Grecia. La manzana llega a América a través de los colonizadores (1647, Virginia, USA) que lo esparcieron por todo el continente.

La manzana *Red delicious* (*Malus domestica* Borkh), fue descubierta en el Perú (también se encontró en Iowa - EE.UU.) por Jesse Hiatt hacia 1883. Lo denominó *Jesse's Hawkeye* debido a su parecido con la muy conocida especie *Hawkeye*. Según él era "la mejor manzana en todo el mundo". En el mismo año la envió a Louisiana. La muestra fue patrocinada por la Compañía *Stark Nurseries*, cuyo presidente, después de su primer mordisco exclamó "*My, that's Delicious*", y así el nombre cambió de *Jesse's Hawkeye* al nuevo famoso *Delicious* (Seelig y Hirsh, 1978).

La fruta es de tamaño mediano a grande; cáscara delgada, dura, roja brillante sobre amarillo, con áreas de luz y oscuridad, rayado rojo a sólido rojo. La coloración exacta depende del caso particular. La pulpa es blanca, finamente graneada, dulce, crujiente, jugosa, moderadamente baja en ácidos y medianamente aromática. Generalmente no se usa para cocción (Seelig y Hirsh, 1978).

La Figura 1 esquematiza la apariencia de esta variedad de manzana y en el Cuadro 1, se presenta las cantidades mínimas y máximas de algunos sus principales constituyentes.

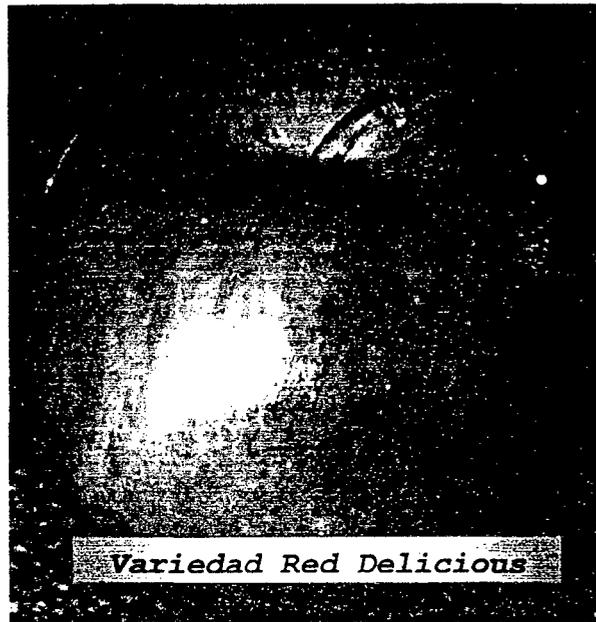


Figura 1. Manzana delicia.

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 1. Algunos constituyentes de la manzana delicia en partes por millón

Elemento	Mínimo	Maximo
Beta-Caroteno	776,0	
Calcio	43,0	570,0
Fibra	5200,0	131,00
Fructosa	50100,0	60800,0
Glucosa	50100,0	60800,0
Hierro	1,1	123,0
Kcal/kg	3419,0	
Magnesio	48,0	478,0
Acido oxálico	140,0	871,0
Fósforo	68,0	871,0
Proteína	1780,0	12800,0
Azúcar	60100,0	166000,0
Agua	809000,0	896000,0

Fuente: Seelig y Hirsh, 1978

C. DESHIDRATACIÓN

Según Welti *et al.* (2001), la deshidratación es una técnica de conservación de alimentos basada en la eliminación de agua de los mismos para darles estabilidad microbiana, reducir reacciones químicas deteriorativas y reducir los costos de almacenamiento y transporte.

Los alimentos deshidratados se preservan debido a que su actividad de agua esta a un nivel donde no puede ocurrir actividad microbiológica y donde las velocidades de reacción química y bioquímica se reducen al mínimo (Toledo, 1991).

Reduciendo la actividad de agua por debajo de 0,7 se previene el deterioro microbiológico. Sin embargo, para prevenir otras reacciones deteriorativas la deshidratación requiere la reducción de la actividad de agua alrededor de 0,3 (Salas y Labuza, 1968).

Con frecuencia el tipo de datos experimentales que se obtienen en una investigación de deshidratación constituyen una relación de valores de contenido de humedad en función del tiempo, bajo determinadas condiciones de deshidratación (por ejemplo temperatura de bulbo seco, velocidad de aire, humedad relativa, etc.). Con esta información se puede generar una curva de velocidad de deshidratación (Welti *et al.*, 2001).

En un proceso de deshidratación existe simultáneamente transferencia de materia y energía. Hay flujo de agua, principalmente por difusión (resistencia interna), desde las porciones internas del alimento, hacia la

superficie, en donde el agua se evapora lo que se denomina resistencia externa (Welti *et al.*, 2001).

Según Perry (1966), las razones para deshidratar son múltiples, pero de ordinario son algunas de las siguientes:

- Facilitar la manipulación en algún tratamiento posterior.
- Permitir la utilización satisfactoria del producto final.
- Reducir los costos de transporte.
- Aumentar la capacidad de otros aparatos o instalaciones de proceso.
- Conservar un producto durante su almacenamiento y su transporte.

Aumentar el valor y la utilidad de los desperdicios o subproductos obtenidos.

La deshidratación mantiene una relación casi fija con otras operaciones de un proceso. Considerándose frecuentemente como una "operación de acabado" porque en la mayoría de los casos se verifica cerca al final del proceso, inmediatamente antes de preparar al producto para su expedición (Perry, 1966).

1. Mecanismo de deshidratación por aire caliente

Cuando el flujo de aire cubre una superficie húmeda, el agua se transfiere desde la superficie hacia el aire. Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de masa son similares a los de transferencia de calor. Por analogía, la fuerza de conducción para la transferencia de

masa es una diferencia de concentración, y la proporcionalidad constante entre el flujo de masa y la fuerza de conducción es el coeficiente de transferencia de masa. La actividad de agua puede usarse en los cálculos como fuerza de conducción (Toledo, 1991).

Si la actividad de agua se plotea contra el contenido de agua de un alimento a temperatura constante, resulta una curva sigmoideal. La curva es conocida como la isoterma de sorción para el producto (Toledo, 1991).

La Figura 2, muestra la isoterma de desorción de rodajas a 0,3 m/s, 65,6°C y 20% de Humedad Relativa

Usualmente el secado ocurre en un número de niveles, caracterizado por diferentes velocidades de deshidratación para cada uno de los niveles, hasta que la deshidratación alcanza el equilibrio debido a que los valores de actividad de agua de la superficie y el aire son iguales (Toledo, 1991).

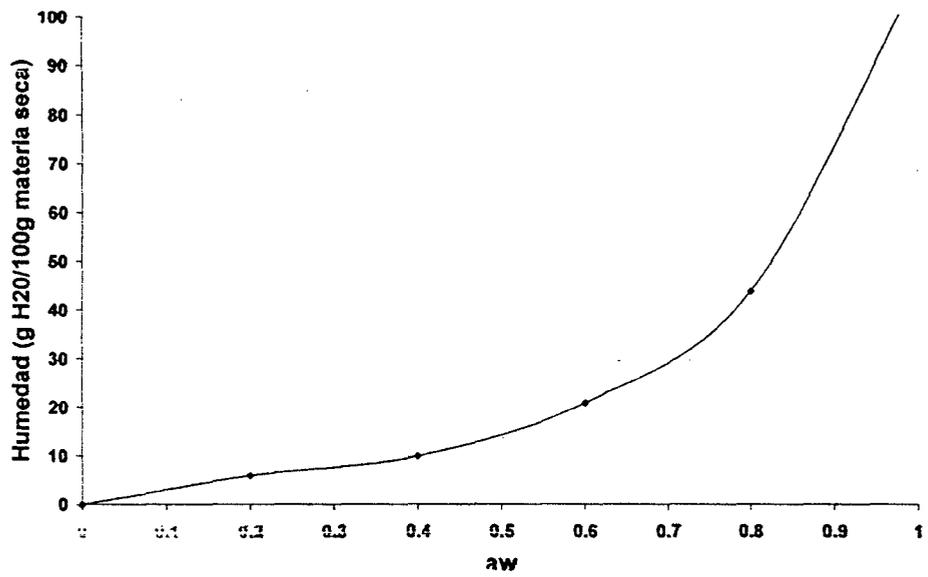


Figura 2. Isotherma de desorción de rodajas de manzana.

Fuente: Fundamental of Food Process Engineering (Toledo, 1991).

Según Welti *et al.* (2001), cuando la resistencia externa a la transferencia del agua es mayor que la resistencia interna se presenta el periodo de deshidratación a velocidad constante. Como en este periodo siempre hay agua disponible para la evaporación en la superficie, este proceso es idéntico a la evaporación de agua pura, y puede modelarse en forma muy precisa a partir de información de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire. Por otro lado, cuando la velocidad de deshidratación empieza a disminuir, se inicia el periodo de deshidratación a velocidad decreciente, y esto es a partir de un contenido de humedad crítico (W_c). En este periodo hay mayor resistencia interna al transporte de agua. Al reducir la velocidad de deshidratación, se incrementa notablemente el tiempo de deshidratación, teniendo un efecto muy importante sobre el tiempo total de deshidratación. Este periodo es más complejo y no puede ser modelado fácilmente.

Según Brennan *et al.* (1998), Fellows (1994) y Potter (1999), cuando el aire es soplado sobre el alimento, el calor se transfiere a la superficie, causando evaporación de parte del agua. Esta agua es llevada fuera por la corriente de aire, que crea una región de baja presión de vapor en la superficie del alimento. Con la altísima presión de vapor existente en el centro del producto, el gradiente de presión de vapor resultante provee la fuerza de conducción para la remoción de humedad del sólido.

2. Secadores de bandejas y compartimientos

Según Perry (1966), en los secadores de bandejas o compartimientos el aire caliente circula sobre el material húmedo hasta que este alcanza el contenido final de humedad requerido. El método para soportar el sólido húmedo depende de su forma material.

El funcionamiento satisfactorio de los secadores del tipo de bandeja depende de que se mantengan a una temperatura constante y con una velocidad uniforme de aire sobre todo el material que se seca (Earle, 1979 y Perry, 1966).

En los secadores de bandejas, convienen velocidades de aire de 120 a 300 m/min (2 a 5 m/s), para mejorar el coeficiente de transmisión superficial de calor y eliminar las bolsas de aire estancado. Los secadores de bandeja pueden ser del tipo de bandejas en carretillas o fijas, en el primero las bandejas se cargan en carretillas que se empujan dentro del secador, y, en el segundo, las bandejas se colocan directamente sobre bastidores fijos de barras del interior del secador. Las bandejas son rectangulares de 0,37 a 0,74 m² cada una, entre bandeja y bandeja debe haber un espacio entre el material de una bandeja y el fondo de la que esta inmediatamente encima de no menos de 38 mm. Las bandejas tendrán su fondo perforado para suministrar una superficie adicional de desecación. Se prefieren las bandejas metálicas porque conducen mejor el calor y soportan mejor los malos tratos (Perry, 1966).

Si bien los secadores de bandeja pueden utilizarse para secar casi cualquier material, se aplican más para secar pequeñas cargas de materiales y para estudios relacionados con las plantas piloto. En general se aplica para cargas que no excedan 20 a 45 Kg/h de producto seco (Perry, 1966).

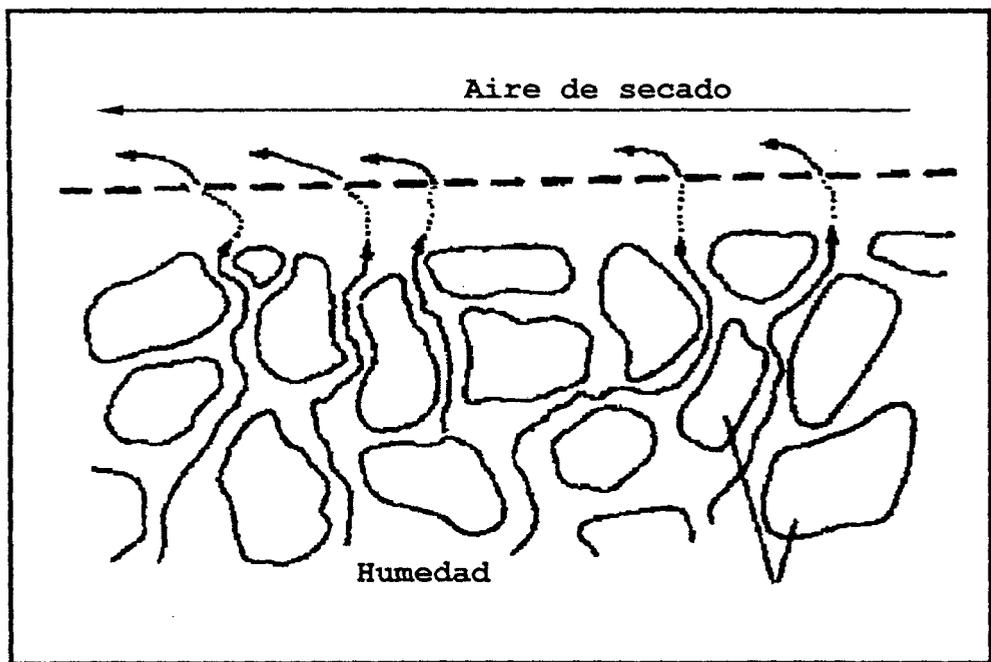


Figura 3. Movimiento de humedad durante la deshidratación

Fuente: Notas de secado de alimentos (Welti *et al.*, 2001).

D. PROPIEDADES DE LOS ALIMENTOS Y DESHIDRATACIÓN

Según Potter (1999) y Fellows (1994), algunas propiedades de los alimentos tienen un efecto en el proceso de deshidratación. Otras propiedades se verán cambiadas por el proceso de deshidratación, y la calidad del producto final será afectada.

A continuación se enuncian algunas de las propiedades (Potter, 1999 y Fellows, 1994):

- **Orientación del constituyente.-** Los alimentos usualmente son homogéneos. La orientación de las capas en el alimento que se seca será afectada por la velocidad de deshidratación. Similarmente en una emulsión aceite en agua se puede esperar que se seque más rápidamente que una emulsión agua/aceite.
- **Concentración de soluto.-** Los solutos en solución elevan el punto de ebullición, así los alimentos con gran concentración de solutos tenderán a secarse más lentamente. Esta es también una razón del porque decrece la velocidad de deshidratación.
- **Ligación del agua.-** El agua libre es más fácil de remover que el agua en geles coloidales (por ejemplo: almidón de trigo, pectina, u otra goma presente), y más que el agua ligada.
- **Estructura celular.-** Los tejidos celulares vivos son menos permeables al agua. Cuando la planta o animal está muerta, o el material es blanqueado o cocido, este tejido llega a ser más permeable. Generalmente los vegetales o carnes cocidas se secan más

rápidamente que los materiales frescos, esta cocción no causara excesivo ablandamiento o encogimiento.

- **Encogimiento.**- El encogimiento usualmente ocurre cuando un producto es deshidratado. Los cubos tienden a reducirse y tener superficies cóncavas. En algunos casos donde el producto es secado rápidamente, la superficie llega a estar seca y rígida primero, y el interior entonces empujan fuera causando vacíos, y efectos de panales, lo cual reduce la densidad volumétrica.
- **Otros efectos texturales.**- Las variaciones localizadas en el contenido de humedad pueden elevar el estrés interno. En alimentos que son blanqueados, la pérdida de textura puede ser causada por gelatinización del almidón y cristalización de la celulosa. Pretratamientos, por ejemplo, adición de cloruro de calcio al agua de blanqueado, puede modificar estos efectos.
- **Case hardening (Endurecimiento de cubierta).**- Como el agua se mueve hacia la superficie del producto, tiende a llevar disueltos sólidos con él. Como el agua se evapora desde la superficie, estos sólidos pueden concentrarse, formando una dura capa vidriosa conocida como *case hardening*. Este, en combinación con los efectos de encogimiento, tiende a bloquear los poros, evitando el secado efectivo. Debe anotarse que, el gradiente de concentración que ocurre cuando la superficie se seca antes que el interior puede elevar el gradiente de concentración causando migración de solutos hacia el centro del producto. De tal modo que, los alimentos secos pueden tener azúcares, etc.

concentrados en el centro o en las capas superficiales del alimento dependiendo del mecanismo dominante.

- **Termoplasticidad.-** Muchos alimentos se suavizan con el calentamiento, ellos son llamados termoplásticos. Con alimentos con alto contenido de azúcar pero con pequeña estructura (por ejemplo, jugos de frutas), los azúcares pueden suavizarse y fundirse a una condición pegajosa, dando la impresión de humedad aun después de secados. En estas condiciones son difíciles de remover de lechos, bandejas, etc. En el enfriamiento, ellos tienden a solidificarse a una forma cristalina o de vidrio amorfo, llegando a ser frágiles, quebradizos y más fácilmente removibles.
- **Color.-** El secado cambia la reflectividad y el color de la superficie. Los carotenoides y la clorofila sufren cambios químicos debido al calor y a la oxidación, las altas temperaturas y cortos tiempos de deshidratación incrementan las pérdidas de pigmentos. La oxidación y actividad enzimática residual causa pardeamiento durante el almacenamiento, se previene por blanqueado o tratamiento con dióxido de azufre (o ácido ascórbico). El dióxido de azufre residual puede causar degradación con el blanqueado. El pardeamiento de Maillard depende de la actividad de agua y temperatura, se incrementa marcadamente a altas temperaturas de deshidratación, o si el contenido de humedad excede el 4 al 5% y la temperatura de almacenamiento es mucho mayor a los 38°C.
- **Flavor y aroma.-** Los componentes volátiles como el agua se evaporan por el proceso de deshidratación. La cantidad de pérdida depende de

factores incluyendo a la temperatura, concentración de sólidos, presión de vapor de volátiles, y solubilidad de los volátiles en el vapor de agua. Los efectos de concentración pueden acrecentar las características de flavor de los productos secos. La oxidación durante el almacenamiento incrementa la pérdida de sabores, la estructura de poros abiertos incrementa el acceso al oxígeno. La velocidad de deterioro es dependiente de la actividad de agua y la temperatura de almacenamiento.

- **Valor nutritivo.-** El valor nutritivo de alimentos secos varía ampliamente de acuerdo a los factores tales como los procedimientos de preparación, la temperatura y tiempos de deshidratación, y condiciones de almacenamiento. En frutas y vegetales, las pérdidas durante la preparación usualmente exceden a los del secado. La solubilidad de las vitaminas varía. Algunos (por ejemplo, riboflavina) precipitan a relativamente altos contenidos de humedad, otros (por ejemplo, ácido ascórbico) permanecen solubles a muy bajo contenido de humedad y reaccionan con solutos a altas velocidades de deshidratación. La sensibilidad al calor también varía, las pérdidas de las vitaminas más sensibles al calor (por ejemplo, ácido ascórbico y tiamina) se minimizan por cortos tiempos de deshidratación y bajas temperaturas. Las proteínas generalmente no se afectan grandemente (las proteínas de la leche pueden ser desnaturaladas durante la deshidratación a tambor), la lisina en la leche también es sensible al calor.

- **Rehidratación.-** La rehidratación no es la reversa del proceso de deshidratación. Muchos cambios de textura, migración de solutos y pérdida de volátiles son irreversibles. El calor reduce el grado de hidratación del almidón y la elasticidad de las paredes celulares, y las proteínas coagulan para reducir su capacidad de retener agua.

E. DENSIDAD

Rahman (2001), afirma que la densidad es una de las más importantes propiedades de transporte y así es ampliamente usada en cálculos de procesos. Esta es la unidad de masa por unidad de volumen y las unidades SI de densidad son Kg. m^{-3} . Algunas definiciones se presentan a continuación:

- **La densidad real** es la densidad de una sustancia pura o un material calculado de las densidades de sus componentes considerando la conservación de la masa y volumen.
- **La densidad de sustancia** es la densidad medida cuando ha sido reducida a pequeñas piezas con la garantía de que no mantiene poros.
- **La densidad de partícula** es la densidad de una muestra que no ha sido modificada estructuralmente, que incluye el volumen de todos los poros internos pero no los poros conectados externamente.
- **La densidad aparente** es la densidad de una sustancia incluyendo todos los poros que permanecen en el material.
- **La densidad de volumen** es la densidad del material cuando esta empacado o en volumen.

F. POROSIDAD

La porosidad indica la fracción de volumen de vacío o aire (Pallipane *et al.*, 1992). La porosidad también puede ser definida de varias formas (Rahman, 2001):

- **La porosidad aparente** es la relación de espacio total de aire encerrado o volumen de vacío al volumen total del material.
- **La porosidad de poro abierto** es la relación del volumen de poros conectados al exterior al volumen total.
- **La porosidad de poro cerrado** puede ser definida como el resultado de la porosidad aparente menos la porosidad de poros abiertos.
- **La porosidad de volumen** incluye el aire o volumen de vacío exterior fuera del material individual cuando esta empacado o agrupado en volumen. La porosidad es usualmente medida directamente midiendo la fracción de volumen de aire o es derivado de los datos de encogimiento y densidad.
- **La porosidad total** es la fracción de volumen total de aire o espacio vacío, es decir, dentro y fuera del material cuando el material esta empacado o agrupado en volumen.

Usualmente se asume que una alta porosidad en el alimento hará más fácil la remoción de agua, y así se incrementara la velocidad de deshidratación. Sin embargo, muchas estructuras porosas tienen buenas propiedades de aislamiento, de modo que la transferencia de calor llega a ser limitante. La porosidad también amplía la solubilidad o reconstitución e incrementa la

aparición del volumen, pero las desventajas incluyen incremento de volumen y rápida degradación debido a la alta exposición superficial al aire, etc. La porosidad puede ampliarse creando presión de vapor dentro del producto, o batiendo un producto líquido (Potter, 1999 y Fellows, 1994).

G. ENCOGIMIENTO

El encogimiento es el cambio de volumen durante el procesamiento debido a la pérdida de humedad durante el deshidratado, formación de hielo durante la liofilización, y formación de poros en el extruido, y puede ser definido como sigue (Rahman, 2001):

- **El encogimiento aparente** durante el procesamiento puede ser definido como la relación del volumen aparente en un contenido de humedad dado y volumen aparente inicial de los materiales antes del procesamiento.
- **El encogimiento isotrópico** puede ser descrito como el encogimiento uniforme en todas las dimensiones del material.
- **El encogimiento anisotrópico** puede ser definido como el encogimiento no uniforme en las diferentes dimensiones.

Rahman y Perera (1999), encontraron que los mecanismos físicos que juegan un rol importante en el control del encogimiento o colapso son: 1) presión del poro, 2) transición vítrea, 3) mecanismos de transporte de humedad, 4) fuerzas mecánicas de la matriz, 5) presión ambiental, 6) carga eléctrica superficial, y 7) fuerza gravitacional.

La teoría de la transición vítrea es uno de los conceptos que ha sido propuesto para explicar el proceso de encogimiento y colapso durante el deshidratado y otros procesos relacionados. De acuerdo a este concepto, hay colapso despreciable (más poros) en materiales si éste es procesado bajo transición vítrea, y si es muy alta la diferencia entre la temperatura de procesamiento y la temperatura de transición vítrea, el colapso es más alto. Sin embargo, Del Valle *et al.* (1998), encontraron que el colapso de la estructura de piezas de manzana no se redujo por la disminución de la diferencia entre la temperatura de deshidratación por convección y la temperatura de transición vítrea. Las muestras secadas a baja temperatura (20°C) experimentaron un gran encogimiento, y las muestras secadas a temperatura media (50°C) y alta (80°C) mostraron encogimiento limitado. Ratti (1994), también reportó que el encogimiento de la manzana no fue afectado por la temperatura (40 y 60°C) o humedad relativa (5 y 50%) del aire. A una baja velocidad de deshidratación, el perfil plano de humedad predomina en la muestra, el stress dentro del alimento es mínimo, y el encogimiento es pronunciado pero uniforme. A alta velocidad, la humedad superficial decrece tan rápido que la superficie llega a ser tiesa (caso del fenómeno de endurecimiento), limitando el subsiguiente encogimiento.

H. METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) se define como una colección de métodos estadísticos y matemáticos que son usados para desarrollar, mejorar, u optimizar un producto o proceso. Este comprende diseños estadísticos experimentales, técnicas de modelamiento de

regresión, y métodos de optimización. Muchas aplicaciones de la MSR comprenden situaciones experimentales donde varias variables independientes (o control) impactan potencialmente en una o más variables respuesta. Las variables independientes son controladas por el experimentador, en un diseño experimental, mientras la variable respuesta es un dato obtenido del experimento.

La Figura 4, ilustra las relaciones estimadas entre una variable respuesta y dos variables independientes X_1 y X_2 .

En muchas aplicaciones de la MSR, se realiza un proceso secuencial. Al inicio un investigador puede tener numerosos factores de control que estén siendo estudiados. Para determinar inicialmente cual de estos tiene un impacto en la variable de respuesta, se realiza usualmente un diseño de barrido o *screening*. Este reduce potencialmente el número de factores que necesiten ser investigados en una futura experimentación. Un investigador espera eliminar aquellos factores que no sean de importancia antes de invertir tiempo y dinero en un experimento más elaborado (por ejemplo un diseño de segundo grado). Un *screening* también puede ser aumentado con puntos de diseño adicionales para estimar un modelo de segundo orden (o superficie de respuesta). Otro paso potencial en la MSR es el método de marcha ascendente.

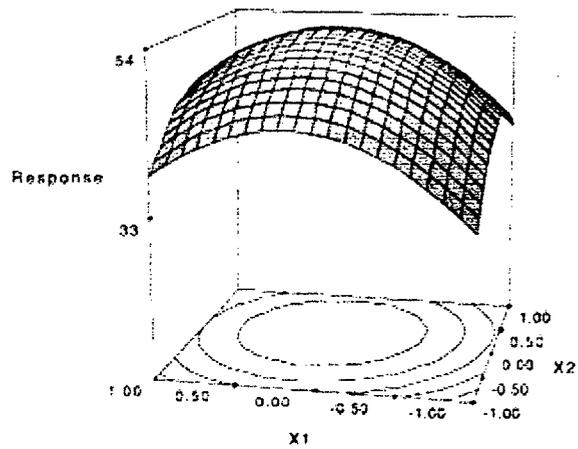


Figura 4. Un ejemplo de Superficie de Respuesta

Fuente: Response Surface Methodology (Myers, 2003).

Después que se ha definido una región de interés, se usa un diseño de segundo orden (o superficie de respuesta) para estimar un modelo del mismo orden. Esto provee una aproximación de la verdadera superficie de respuesta sobre la región de interés, permite que se elijan las condiciones de operación óptima, y también ganar un mejor entendimiento de la superficie de respuesta estimada. La MSR se ha usado extensamente en la investigación biológica como formulaciones, desarrollo de procesos, y descubrimientos de medicinas.

1. Construcción del modelo

Se usa un modelo estadístico para estimar la relación entre la variable respuesta y las variables independientes. El modelo estadístico estimado es llamado un modelo de superficie de respuesta. Las técnicas de regresión se usan para estimar el modelo de la superficie de respuesta. Típicamente se usa para caracterizar esta relación.

Un modelo de primer orden asume que cada variable independiente tiene un efecto lineal en la variable respuesta. Este modelo se puede definir como:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + e \quad (2)$$

Donde Y es la variable respuesta, $\hat{\beta}_0$ es el parámetro del modelo que representa el intercepto, $\hat{\beta}_i$ es el parámetro del modelo asociado con la variable independiente i , x_i representa el nivel de la variable

independiente i , y ε representa el error randomizado. El parámetro β_i representa el cambio en la variable respuesta Y por cambio de unidad en x_i , mientras todas las otras variables permanecen constantes. En muchos casos, se presenta una interacción entre dos variables independientes. En esas situaciones, el modelo de primer orden incluirá la interacción entre dichos términos:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

Donde β_{ij} el parámetro del modelo que representa la interacción entre las variables independientes i y j . Cuando β_{ij} esta presente, el efecto de la variable independiente i en la variable respuesta Y depende del nivel de la variable independiente j . el modelo de primer orden se usa típicamente en los casos donde nos se presenta curvatura en la superficie de respuesta, la región de interés es estrecha, o cuando el investigador ensaya reducir el numero inicial de factores para una futura experimentación a través del *screening* de variables. En los casos donde no se aplica lo anteriormente mencionado, comúnmente se aplica un modelo de segundo orden.

Un modelo de segundo orden asume que las variables de segundo orden tienen un efecto cuadrático (o curvatura) sobre la variable respuesta. El modelo de segundo orden se define como:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{ij} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5)$$

Donde β_{ii} es el parámetro del modelo que representa el efecto cuadrático para la variable independiente i . El modelo de segundo orden se usa ampliamente en la MSR. Myer y Montgomery (1), citan que el modelo de segundo orden es muy flexible, y que puede aproximarse a una variedad de formas funcionales. La experiencia práctica indica que el modelo de segundo orden funciona bien en la solución real de problemas de superficie de respuesta.

Los parámetros para los modelos estadísticos previamente discutidos son estimados por el método de mínimos cuadrados ordinarios. Los parámetros estimados son usualmente llamados coeficientes de regresión.

Usando la notación matricial, el estimador de mínimos cuadrados del parámetro de modelo $\hat{\beta}$ es:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y$$

Donde X es una matriz del modelo ($n \times p$) y y es un vector ($n \times 1$) de las respuestas observadas. Todas las técnicas estándares que se usan rutinariamente para la construcción del modelo en una regresión lineal múltiple son aplicadas. Estos incluyen evaluación de significancia, evaluación de los intervalos de confianza de los coeficientes de regresión, y una evolución de la adecuación del modelo.

Es costumbre usar variables codificadas en la MSR. La variable codificada es computada de la siguiente manera:

$$x_{ij}^c = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{x_{hi(j)} - \bar{x}_j} \quad (4)$$

Donde x_{ij} es el valor en las unidades naturales, \bar{x}_j es el valor medio para la variable j , y $x_{hi(j)}$ es el valor máximo en unidades naturales para la variable j . Estos resultados en los valores de x_{ij}^c varían de -1 a +1.

Una razón para usar variables codificadas es que la magnitud de cada coeficiente de regresión representa el cambio en la variable respuesta por un cambio de unidad en la variable independiente. Por consiguiente el impacto de cada variable independiente se puede evaluar de manera equivalente.

2. Análisis Estadístico de la Superficie de Respuesta

Después de que el investigador ha completado el trabajo experimental, usualmente el objetivo es localizar las condiciones de operación óptima (por ejemplo, máximo, mínimo, o respuesta objetivo). Sin embargo, aun más importante es entender la verdadera naturaleza de la Superficie de Respuesta estimada. La Figura 5, muestra un ploteo 3-D de una Superficie de Respuesta estimada, donde se presenta una máxima respuesta estimada en la región experimental. La máxima respuesta es llamada un punto estacionario, en donde las derivadas de la superficie de respuesta con respecto a las variables de diseño son todas igual a

cero. Hay situaciones donde el punto estacionario no es un máximo, ni un mínimo. En este caso particular, el punto estacionario es un punto de silla (semejante a una silla de montar). La Figura 6, muestra una superficie de respuesta estimada donde existe un punto de silla. Otro método gráfico usado para interpretar la superficie de respuesta es un ploteo de contornos. Las Figuras 7 y 8, ilustran el caso de una respuesta máxima y un punto de silla, respectivamente. Muchas de las aplicaciones de la MSR mencionadas previamente usan ploteos 3-D y/o contornos para mejorar el entendimiento de cómo los factores afectan la respuesta y para localizar posibles condiciones óptimas de experimento.

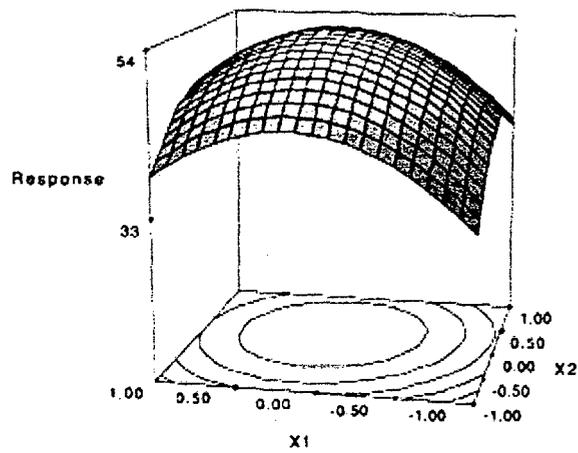


Figura 5. Superficie de Respuesta de un ploteo en 3-D.

Fuente: Response Surface Methodology (Myers, 2003).

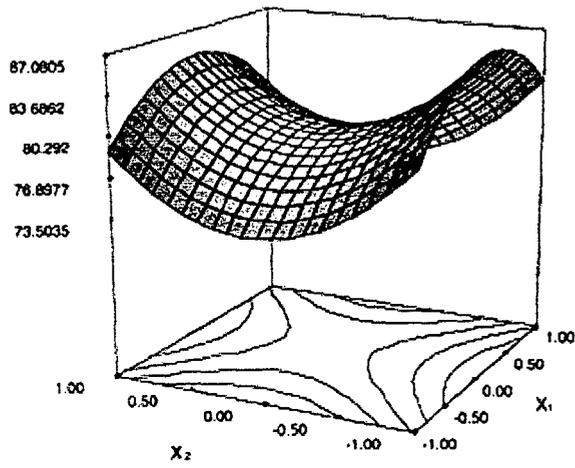


Figura 6. Superficie de Respuesta de un punto de silla
Fuente: Response Surface Methodology (Myers, 2003).

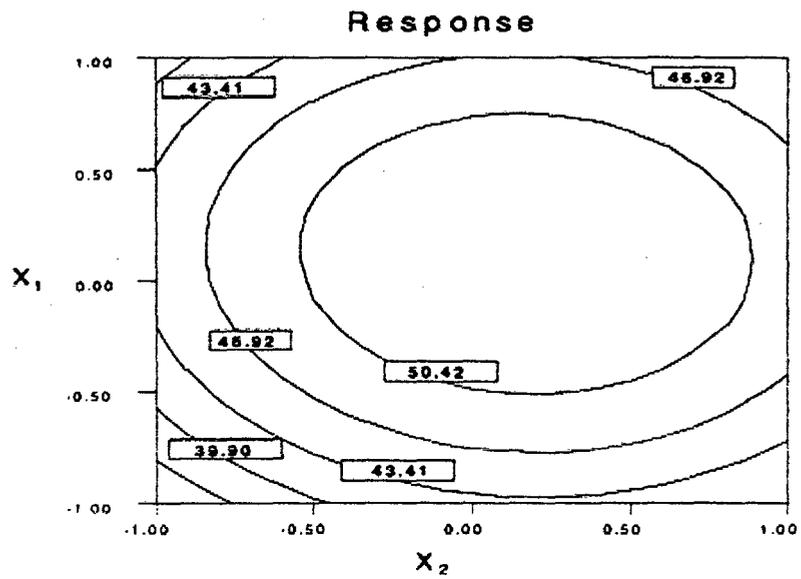


Figura 7. Ploteo de contornos de una respuesta máxima.

Fuente: Response Surface Methodology (Myers, 2003).

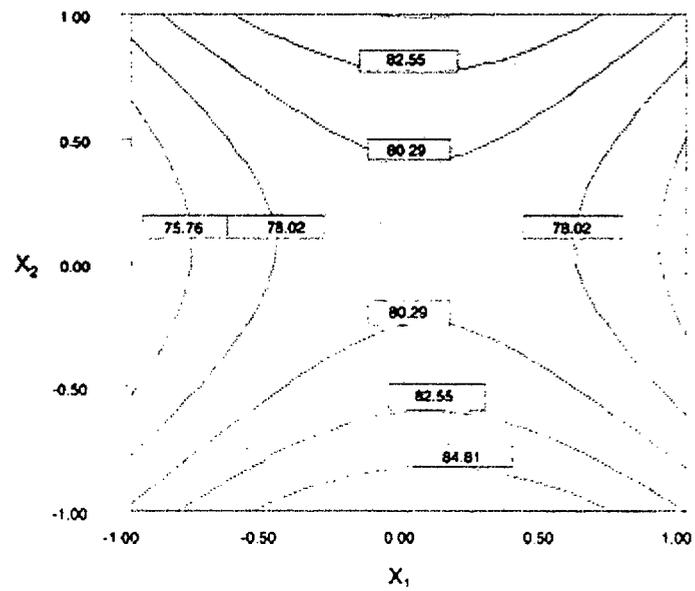


Figura 8. Ploteo de contornos de un punto de silla.

Fuente: Response Surface Methodology (Myers, 2003).

III. MATERIALES Y METODOS

A. LUGARES DE EJECUCIÓN

La presente investigación se ejecutó en la Planta Piloto y los Laboratorios de Instrumentación y de Fisicoquímica de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

B. MATERIA PRIMA E INSUMOS

Se utilizó manzana variedad "*Red delicious*" (*Malus domestica Borkh*) procedente del Valle de Mala (Lima), de tamaño medio, en perfectas condiciones aparentes.

C. EQUIPOS Y MATERIALES

1. Equipos

Se utilizaron los siguientes equipos: Balanza analítica AND[®], FR-300 MKII, capacidad máxima de 310 g d=1; sensibilidad $\pm 0,0001$ g; Balanza eléctrica Sauter[®], modelo Toppan, rango de medición de 0 a 1000 g, sensibilidad $\pm 0,1$ g; Refractómetro universal ABBE Zees[®], modelo I, rango de medición de 0 a 95 g/100g (°Bx), sensibilidad 0,1-0,2; Estufa Memmert[®], modelo 500; Potenciómetro Schott Gerat[®], CG 728; Micrómetro; Deshidratador de bandejas de aire caliente; Porosímetro de Day modificado por Ureña (ASAE); Sacabocados de 17 mm de diámetro y 10 mm de largo; Cortadora eléctrica de embutidos.

2. Materiales

Se utilizaron los siguientes insumos y materiales: Tegol[®] 51; Vasos precipitados de 500 ml; Probetas graduadas de 10, 20 y 50 ml; Pipetas graduadas de 10 ml; Buretas de 50 ml; Placas petri; Campanas de desecación; Papel aluminio; Recipientes de plástico; Tijeras y Pinzas.

D. MÉTODOS DE ANÁLISIS

1. Índice de madurez de la materia prima

Para determinar el índice de madurez de la manzana se utilizó la relación sólidos solubles / acidez titulable de la muestra (Konopacka y Plochanski, 2001).

Los sólidos solubles se determinaron por lectura directa con un refractómetro, según la metodología indicada por la AOAC 932-12 Ed. 15 (1995). Para el caso de la acidez titulable se realizó el método descrito por Pearson (1976) citado por KirK (1996), expresándose los valores en porcentaje de ácido málico.

2. Humedad

Se determinó para la materia prima y para el producto final, según la metodología indicada por la AOAC 925.10/00 (1995).

3. Densidad real

Se determinó aplicando el método de Day modificado por Ureña (1990), en el Anexo 1 se adjunta una guía de práctica. La variante hecha es

que, en lugar de insuflar aire dentro del recipiente que contiene la muestra, se le extrae y se produce un vacío parcial. El método se basa en determinar el volumen de los huecos del material al inducir un fenómeno de compensación de presiones entre dos recipientes aislados del medio ambiente. La presión es la ejercida por un gas, en este caso aire, cuyo número de moles es constante en el sistema y es el resultante de la suma de los que quedan en el recipiente, en el que previamente se hace el vacío, y de los que se encuentran ocupando el resto del volumen del envase que contiene las partículas de la muestra. Después del fenómeno de transferencia másica desde el recipiente con mayor presión hacia el que se le hizo vacío, el número de moles queda distribuido en el sistema, estableciéndose así la presión final de equilibrio. Luego, aplicando la ecuación general de los gases ideales se tiene que:

$$N = N_1 + N_2 \quad (5)$$

Entonces:

$$(P \times V) / (R \times T) = [(P_1 \times V_1) / (R_1 \times T_1)] + [(P_2 \times V_2) / (R_2 \times T_2)] \quad (6)$$

Donde "N1" y "N2" son el número de moles de aire que están en un inicio en los recipientes 1 y 2. "N", es el número de moles después de la transferencia másica y que se encuentra a una presión de equilibrio "P". "R" la constante universal de los gases y "T" la temperatura ambiente. Simplificando la expresión (5), ya que se asume que:

$$R \times T = R_1 \times T_1 = R_2 \times T_2 \quad (7)$$

Se tiene:

$$P \times V = (P1 \times V1) + (P2 \times V2) \quad (8)$$

Si "P2" es la presión atmosférica y V es la suma de los volúmenes "V1" y "V2", en términos de presiones manométricas, se tiene que:

$$V2 / V1 = (P1 - P) / P \quad (9)$$

Donde la fracción volumétrica sería la porosidad (ϵ) que presenta el material estudiado. La expresión (9) es válida si los volúmenes de los dos recipientes son exactamente iguales, pero como no siempre se da esto, por el error intrínseco del material y de la construcción del equipo, se hace necesario introducir en la ecuación un factor de corrección (f_c), que se determina experimentalmente. La ecuación sería entonces:

$$\epsilon = f_c (P1 - P) / P \quad (10)$$

donde:

$$f_c = V1/V_{rec}$$

$$V_{rec} = \text{Volumen del recipiente 2.}$$

Para la determinación de f_c se realiza una curva de calibrado con agua, en la que se plotea $(P1 - P)/P$ frente al volumen de agua (V_a) añadido al recipiente 2, teniendo:

$$(P1 - P)/P = (V_{rec} - V_a) / V1 \quad (11)$$

El término $(1/V_1)$ es igual a la pendiente de la curva de calibrado, con lo que se determina el valor de V_1 y, de la ordenada en el origen, el volumen del recipiente 2 (V_{rec}).

En la Figura 9, se muestra el esquema del equipo que se utilizó y a continuación se da la metodología empleada:

Se elaboró una curva de calibrado utilizando agua (Figura 10). Para esto, se vertió un volumen conocido de agua (50 ml) en el recipiente 2 para cada medición; haciendo un total de 10 mediciones que fueron los puntos de la curva. Para cada determinación, se cerró el sistema, se procedió luego a extraer aire del recipiente 1 abriendo la válvula 1. Al lograr el máximo vacío posible; se cerró la válvula 1 y se procedió a leer en el manómetro digital la presión en el recipiente 1, teniendo así "P1". Se apertura luego la válvula 2 con la que se obtiene la presión de equilibrio "P". Luego se apertura el sistema con la válvula 3, se vertió el siguiente volumen de agua, se cerraron todas las válvulas y se procedió con la siguiente medición.

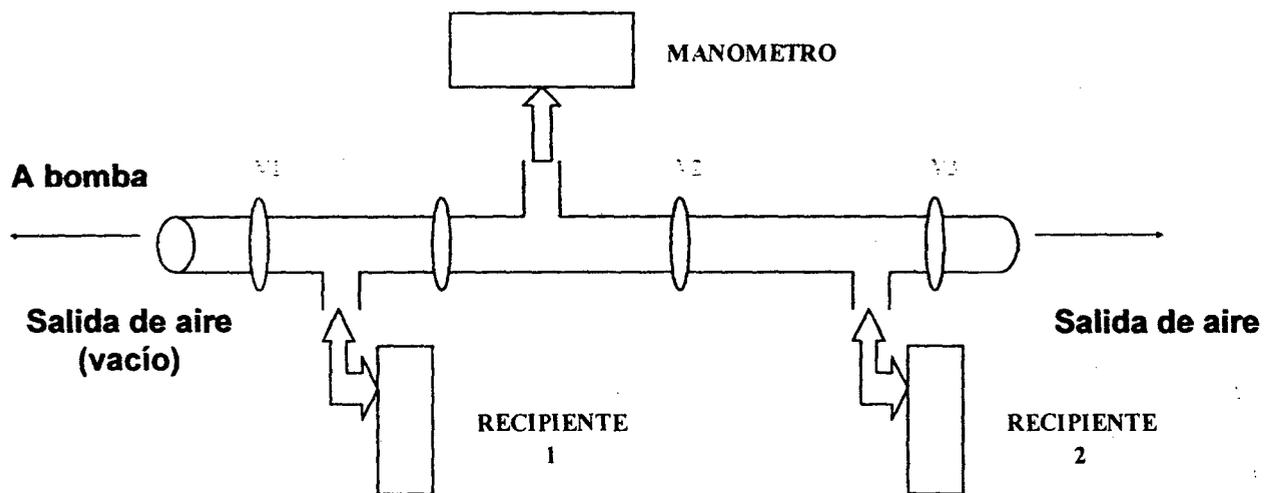


Figura 9. Equipo de determinación de densidad real.

Fuente: Elaboración propia.

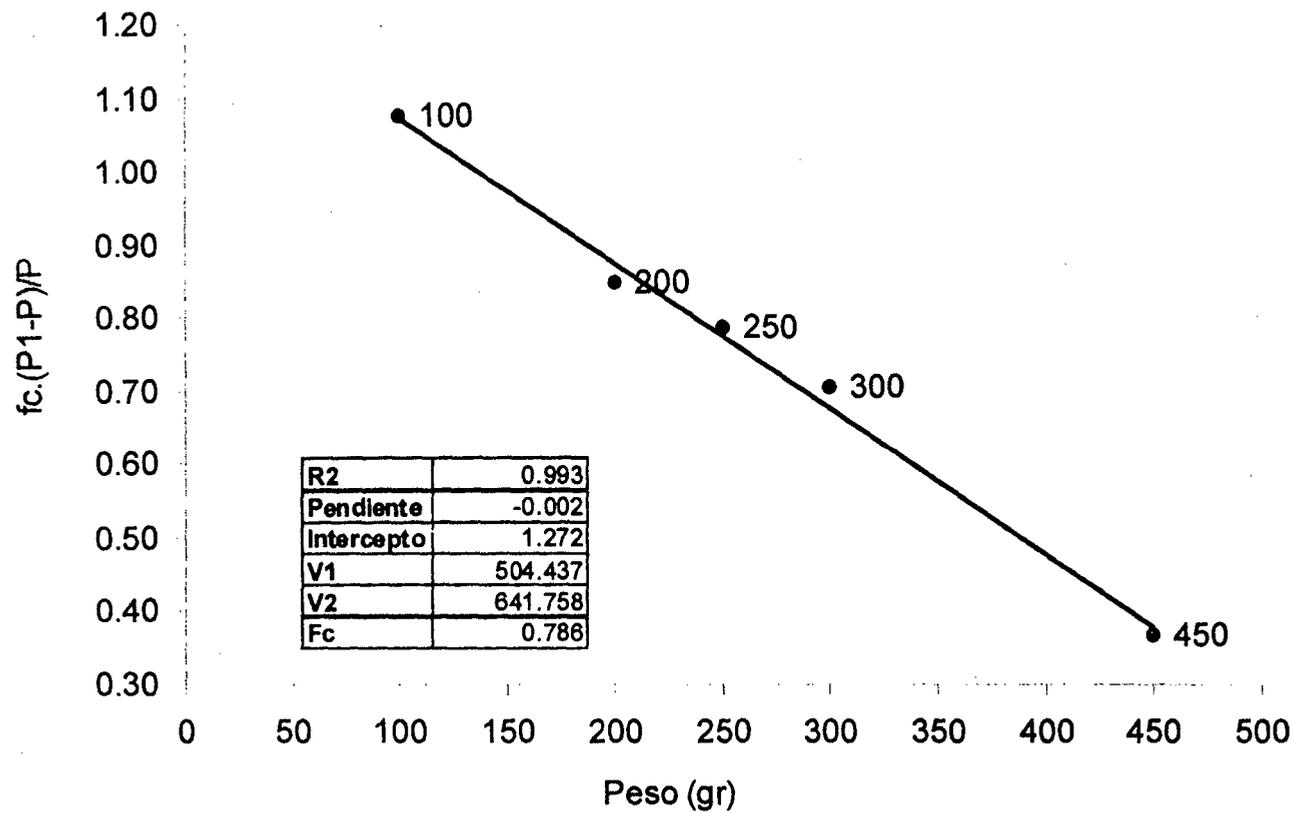


Figura 10. Curva de calibración del equipo de determinación de densidad real.

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo los mismos pasos del apartado anterior se determinó la porosidad del material investigado (manzana), sustituyéndose el agua por dicho material y conociéndose, en este caso, el peso de cada adición. De esta forma se obtuvo una representación gráfica de la relación entre la fracción de poros y el peso del material. De la función que representa a la curva se obtuvo el valor de la densidad real haciendo cero el valor de la porosidad (Ureña, 1990 y Galván, S. 2000).

4. Densidad aparente y volumen

Se determinó según Konopacka y Plochanski (2001), quienes midieron la densidad usando el método desarrollado por Mazza (1983), modificado para manzana. Un peso conocido de muestra se colocó en un picnómetro, luego se enrasará con aceite al cual previamente se le determinó su densidad utilizando el mismo picnómetro. Se procedió a pesarlo, así el peso del aceite es igual al peso total menos la suma del peso de la muestra y el peso del picnómetro. Así conociendo la densidad y el peso del aceite, se puede calcular el volumen que éste ocupa en el picnómetro de volumen conocido, y por simple diferencia se tiene el volumen aparente de la muestra de manzana. Como se conoce el peso y volumen aparente, se determinó su densidad aparente (d):

$$d = \text{Peso muestra} / \text{volumen del aceite} \quad (12)$$

El volumen se determinó de los valores de densidad aparente y humedad mediante la siguiente relación:

$$V = \frac{\text{masa de sólidos}}{d(1-\% \text{Humedad}/100)} \quad (13)$$

Los cálculos se hicieron en función a 1 gramo de muestra.

5. Porosidad

La porosidad (ϵ) se calculó a partir de los datos obtenidos experimentalmente de densidad real (D) y aparente (d) de las muestras, aplicando la siguiente ecuación (Lewis, 1993):

$$\epsilon = (D - d) / D \quad (14)$$

E. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La presente investigación se cumplió en las siguientes etapas (Figura 11):

ETAPA I. Se caracterizó la manzana determinándose el índice de madurez, densidad real, densidad aparente, porosidad, volumen y humedad.

ETAPA II. Se determinaron las condiciones de secado que minimizaron el grado de encogimiento, en función de sus propiedades físicas: densidad y porosidad de las rodajas de manzana delicia, siguiendo el flujo de operaciones de la Figura 12, que a continuación se detalla:

- **Selección y clasificación.**- Las manzanas se seleccionaron en función al tamaño con diámetro mayor a 6 cm.
- **Almacenamiento.**- Las manzanas fueron mantenidas en refrigeración a 2 °C y 95 % HR, hasta el momento del ensayo, aproximadamente 2

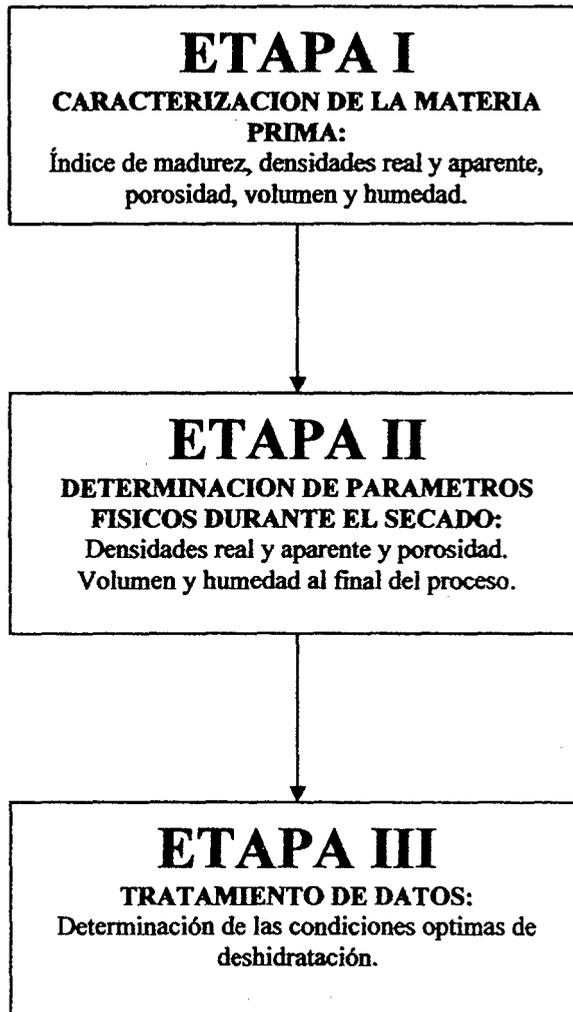


Figura 11. Etapas de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

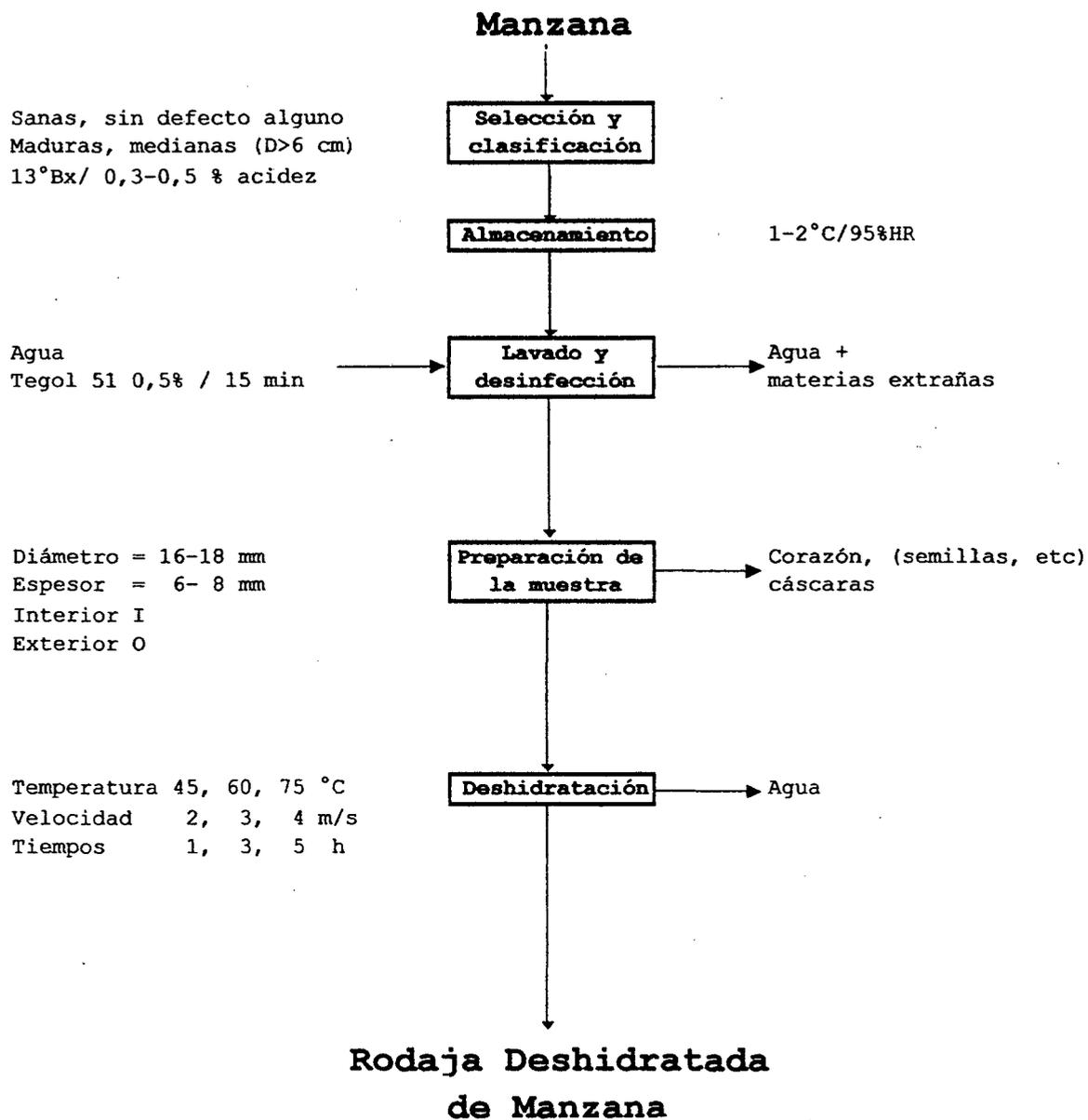


Figura 12. Flujo de operaciones para la obtención de *slices* (rodajas) deshidratados de manzana.

Fuente: Elaboración propia

meses tiempo en el cual, según Konopacka y Plochanski (2001), las manzanas en general obtienen la calidad organoléptica óptima (sabor, aroma, color y textura) para ser procesadas por deshidratación.

- **Lavado y desinfección.-** Fue por inmersión en agua potable y su desinfección con 0,5% Tegol[®] 51 por 15 minutos.
- **Preparación de la muestra.-** La manzana fue pelada y se usaron “sacabocados” para perforar en dirección radial hasta el centro para tomar muestras. Se determinó el índice de madurez de la materia prima. De cada cilindro radial se obtuvo 2 muestras por corte en el punto donde el tejido vascular es más denso (Vincent, 1989) de este modo se obtuvo muestras del sector más cercano al corazón (Interior I) y del sector más próximo a la cáscara (Exterior O) del tejido parenquimático de la manzana (Figura 13).

Las muestras fueron discos cilíndricos con un diámetro de 17 ± 1 mm y con espesor de 7 ± 1 mm. El diámetro de las muestras lo da el sacabocados y para obtener el espesor deseado se utilizó un cortador eléctrico de embutidos. Para medir estas dimensiones se utilizó un micrómetro. Luego, se colocaron sobre papel secante para remover el exceso de agua y se pesaron; se colocaron junto con una pieza de papel húmedo para evitar la deshidratación superficial antes de empezar el experimento, según la metodología seguida por Mavroudis *et al.* (1998).

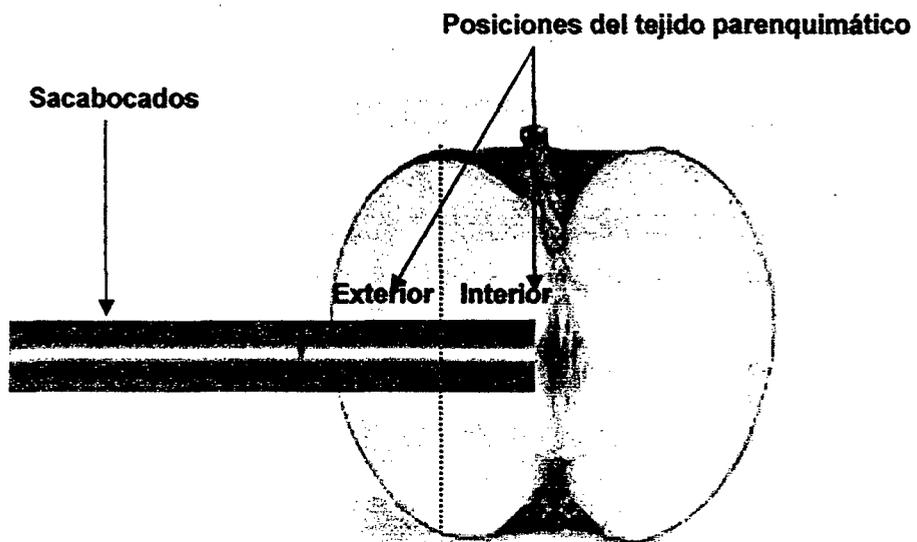


Figura 13. Sección transversal de manzana ilustrando la dirección radial de toma de muestra.

Fuente: Elaboración propia

- **Deshidratación.-** en un secador de bandejas, en el cual se deshidrataron las *rodajas* de manzanas obtenidas en la primera etapa de experimentación.

Las temperaturas de deshidratación fueron 45, 60 y 75 °C, con velocidades de aire de 2, 3 y 4 m/s. Durante todo el proceso de secado se determinó la variación de densidad aparente, densidad real y porosidad (Ver diseño experimental). La toma de prueba se realizó en tres tiempos: 1, 3 y 5 horas de secado.

Al finalizar el tiempo de secado se determinó el porcentaje de humedad y el volumen de las muestras. Las condiciones de secado se fijaron en función a las características del deshidratador de bandejas utilizado y a la investigación de Kavac y Bicer (2003), quienes citan que espesores de 8 mm pueden ser deshidratados en el rango de 180 a 320 minutos con condiciones de secado de 60 a 80°C. A estas condiciones y con 1,5 m/s de velocidad de aire de secado, encontraron que la curva de secado de rodajas de manzana obedece a un modelo logarítmico.

ETAPA III. Tratamiento de datos. Se efectuó el tratamiento de datos experimentales obtenidos en la etapa anterior para ver la influencia de estas condiciones sobre las densidades real y aparente y porosidad.

F. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para optimizar la deshidratación de rodajas de manzana (variedad delicia) en función de la densidad y porosidad, se aplicó el método de Superficie de Respuesta (Ayala. y Pardo, 2000; y Snedecor, 1980) ($P < 0,05$), considerando un arreglo factorial $3^3 \times 2 \times 2$, donde los factores fueron Temperatura, Tiempo, Velocidad del aire de deshidratado y Posición de tejido parenquimático y los niveles las densidades real y aparente y la porosidad. En el Cuadro 2 se muestra el diseño experimental.

G. ANALISIS ESTADISTICO

El análisis estadístico (Cuadro 3), fue llevado a cabo usando el *software* STATGRAPHICS Plus versión 4.0 (STATGRAPHICS®, 1999). Los datos estuvieron sujetos al análisis de varianza ANOVA para determinar la significancia de las variables independientes sobre las variables respuesta estudiadas.

Cuadro 2. Diseño Experimental para Optimizar la deshidratación de rodajas de manzana delicia en función de la densidad y porosidad.

Temperatura	Tiempo	Velocidad	Parénquima
(°C)	(h)	(m/s)	-1: Interno 1: Externo
45	1	2	-1
60	1	2	-1
75	1	2	-1
45	3	2	-1
60	3	2	-1
75	3	2	-1
45	5	2	-1
60	5	2	-1
75	5	2	-1
45	1	3	-1
60	1	3	-1
75	1	3	-1
45	3	3	-1
60	3	3	-1
75	3	3	-1
45	5	3	-1
60	5	3	-1
75	5	3	-1
45	1	4	-1
60	1	4	-1
75	1	4	-1
45	3	4	-1
60	3	4	-1
75	3	4	-1
45	5	4	-1
60	5	4	-1
75	5	4	-1

Continuación

Temperatura	Tiempo	Velocidad	Parénquima
(°C)	(h)	(m/s)	-1: Interno 1: Externo
45	1	2	1
60	1	2	1
75	1	2	1
45	3	2	1
60	3	2	1
75	3	2	1
45	5	2	1
60	5	2	1
75	5	2	1
45	1	3	1
60	1	3	1
75	1	3	1
45	3	3	1
60	3	3	1
75	3	3	1
45	5	3	1
60	5	3	1
75	5	3	1
45	1	4	1
60	1	4	1
75	1	4	1
45	3	4	1
60	3	4	1
75	3	4	1
45	5	4	1
60	5	4	1
75	5	4	1

Cuadro 3: Diseño estadístico para Optimizar la deshidratación de rodajas de manzana delicia en función de la densidad y porosidad.

Resumen del diseño

Clase de diseño: superficie respuesta
Nombre del diseño: diseño factorial

Diseño base

Numero de factores experimentales: 4
Numero de respuestas: 3
Numero de corridas: 108
Grados de libertad del error: 93

Factores	Niveles			Unidades
Tiempo	1	3	5	h
Temperatura	45	60	75	°C
Velocidad	2	3	4	m/s
Parénquima	Interior	-	Exterior	Adimensional

Respuestas	Unidades
Densidad real	g/ml
Densidad aparente	g/ml
Porosidad	(adimensional)

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. CARACTERIZACION DE LA MATERIA PRIMA

1. Índice de madurez

Las manzanas evaluadas presentaron un contenido de sólidos solubles promedio de $13,5 \pm 0,5\%$ con una acidez de $0,405 \pm 0,008$ g/100g de ácido málico, lo cual determina un índice de madurez igual a $33,3 \pm 0,7$ %sólidos solubles/ %ácido málico ($P < 0,05$).

Este grado de madurez coincide con lo reportado por Konopacka y Plocharski (2001), para manzanas almacenadas a 2°C durante dos meses, tiempo en el cual según estos investigadores las manzanas, en general, obtienen la calidad organoléptica óptima (sabor y textura) para ser procesadas por deshidratación o fritura.

2. Humedad, densidades y porosidad

En el Cuadro 4, se muestran los valores de humedad densidad y porosidad de la materia prima ($P < 0,05$).

Como se puede apreciar, la diferencia de humedades en ambos sectores indica que las muestras del parénquima interno presentan menor cantidad de espacios vacíos, ocupados con agua, que el parénquima externo. Del mismo modo, se infiere que su densidad también sea mayor.

Cuadro 4. Valores de Humedad, densidad y porosidad de la materia prima.

Sector del tejido parenquimático	Humedad (%)	Densidad aparente (g/cc)	Densidad real (g/cc)	Porosidad (%)
Interno	87,7	0,81	0,90	9,6
Externo	83,6	0,72	0,83	13,2

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de las densidades son mayores en las rodajas del sector Interior del tejido parenquimático de la manzana, debido a su arreglo estructural y mayor cantidad de humedad (Mavroudis *et al.*, 1998). Por la misma razón la porosidad inicial es mayor en el Parénquima Exterior que en el Interior. Estas condiciones iniciales influyeron en la posterior deshidratación, manteniéndose a lo largo del proceso la porosidad mayor en el Parénquima Exterior.

B. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE DESHIDRATACION EN FUNCION DE LAS DENSIDADES Y LA POROSIDAD

En el Cuadro 5, se muestra las variaciones de densidad aparente, densidad real y porosidad durante la deshidratación convectiva de los sectores del tejido parenquimático de manzana estudiados: Interior y Exterior.

En éste cuadro se puede apreciar que para una misma temperatura o velocidad de secado, las densidades aparente y real disminuyen con el tiempo, debido a la pérdida de peso (humedad), del mismo modo la porosidad se incrementa debido a que los poros, literalmente, se vacían quedando en lugar de agua espacios de aire.

Cuadro 5. Densidad aparente, densidad real y porosidad de las rodajas del Parénquima Interno y Externo de manzana delicia, a diferentes condiciones de temperatura, tiempo y velocidad de deshidratación.

Repetición	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Velocidad (m/s)	Parénquima -1: Externo 1: Interno (Adim)	Porosidad (%)	Densidad real (g/cc)	Densidad aparente (g/cc)
1	45	1	2	-1	27.94	1.002	0.722
1	60	1	2	-1	17.49	0.959	0.791
1	75	1	2	-1	39.50	1.462	0.885
1	45	3	2	-1	36.00	0.961	0.615
1	60	3	2	-1	34.54	0.817	0.535
1	75	3	2	-1	27.03	0.492	0.359
1	45	5	2	-1	49.09	0.711	0.362
1	60	5	2	-1	49.43	0.793	0.401
1	75	5	2	-1	44.34	0.548	0.305
1	45	1	3	-1	25.50	0.753	0.561
1	60	1	3	-1	25.96	0.959	0.710
1	75	1	3	-1	37.72	1.230	0.766
1	45	3	3	-1	40.29	0.829	0.495
1	60	3	3	-1	41.16	1.120	0.659
1	75	3	3	-1	38.47	0.902	0.555

Continuación

1	45	5	3	-1	51.42	0.739	0.359
1	60	5	3	-1	50.00	0.634	0.317
1	75	5	3	-1	36.23	0.541	0.345
1	45	1	4	-1	17.07	0.820	0.680
1	60	1	4	-1	27.00	1.148	0.838
1	75	1	4	-1	40.34	1.056	0.630
1	45	3	4	-1	22.22	0.720	0.560
1	60	3	4	-1	38.84	0.999	0.611
1	75	3	4	-1	41.71	0.875	0.510
1	45	5	4	-1	53.09	0.810	0.380
1	60	5	4	-1	54.79	0.991	0.448
1	75	5	4	-1	39.08	0.632	0.385
1	45	1	2	1	10.29	0.848	0.761
1	60	1	2	1	17.20	0.930	0.770
1	75	1	2	1	39.06	1.055	0.643
1	45	3	2	1	22.56	0.809	0.627
1	60	3	2	1	31.44	0.970	0.665
1	75	3	2	1	34.90	0.533	0.347
1	45	5	2	1	48.18	0.965	0.500
1	60	5	2	1	48.05	0.948	0.493
1	75	5	2	1	40.11	0.349	0.209
1	45	1	3	1	12.91	0.953	0.830
1	60	1	3	1	21.98	0.910	0.710
1	75	1	3	1	37.42	1.093	0.684

Continuación

1	45	3	3	1	32.06	0.986	0.670
1	60	3	3	1	33.33	0.930	0.620
1	75	3	3	1	38.29	0.854	0.527
1	45	5	3	1	48.15	0.866	0.449
1	60	5	3	1	45.26	0.745	0.408
1	75	5	3	1	32.65	0.532	0.359
1	45	1	4	1	14.29	0.875	0.750
1	60	1	4	1	25.92	0.953	0.706
1	75	1	4	1	38.88	0.967	0.591
1	45	3	4	1	32.26	0.930	0.630
1	60	3	4	1	37.41	0.997	0.624
1	75	3	4	1	41.88	0.893	0.519
1	45	5	4	1	51.21	0.990	0.483
1	60	5	4	1	47.42	0.620	0.326
1	75	5	4	1	38.39	0.620	0.382
2	45	1	2	-1	28.00	1.000	0.720
2	60	1	2	-1	16.48	0.959	0.801
2	75	1	2	-1	41.78	1.460	0.850
2	45	3	2	-1	36.52	0.961	0.610
2	60	3	2	-1	37.14	0.657	0.413
2	75	3	2	-1	27.03	0.492	0.359
2	45	5	2	-1	49.37	0.711	0.360
2	60	5	2	-1	48.45	0.582	0.300
2	75	5	2	-1	44.34	0.548	0.305

Continuación

2	45	1	3	-1	25.50	0.753	0.561
2	60	1	3	-1	25.78	0.741	0.550
2	75	1	3	-1	37.72	1.230	0.766
2	45	3	3	-1	40.29	0.829	0.495
2	60	3	3	-1	42.90	0.690	0.394
2	75	3	3	-1	38.47	0.902	0.555
2	45	5	3	-1	51.42	0.739	0.359
2	60	5	3	-1	56.25	0.528	0.231
2	75	5	3	-1	36.23	0.541	0.345
2	45	1	4	-1	17.07	0.820	0.680
2	60	1	4	-1	27.00	1.148	0.838
2	75	1	4	-1	40.34	1.056	0.630
2	45	3	4	-1	22.22	0.720	0.560
2	60	3	4	-1	38.84	0.999	0.611
2	75	3	4	-1	41.71	0.875	0.510
2	45	5	4	-1	53.09	0.810	0.380
2	60	5	4	-1	54.79	0.991	0.448
2	75	5	4	-1	39.08	0.632	0.385
2	45	1	2	1	10.06	0.809	0.760
2	60	1	2	1	17.20	0.930	0.770
2	75	1	2	1	39.06	1.055	0.643
2	45	3	2	1	21.27	0.746	0.587
2	60	3	2	1	34.00	0.970	0.495
2	75	3	2	1	34.90	0.533	0.347

Continuación

2	45	5	2	1	47.25	0.944	0.498
2	60	5	2	1	49.45	0.633	0.320
2	75	5	2	1	40.11	0.349	0.209
2	45	1	3	1	13.78	0.961	0.829
2	60	1	3	1	21.98	0.910	0.710
2	75	1	3	1	37.42	1.093	0.684
2	45	3	3	1	30.50	0.964	0.670
2	60	3	3	1	30.85	0.940	0.650
2	75	3	3	1	38.20	0.854	0.527
2	45	5	3	1	48.28	0.870	0.450
2	60	5	3	1	47.05	0.610	0.323
2	75	5	3	1	32.65	0.532	0.359
2	45	1	4	1	14.29	0.875	0.750
2	60	1	4	1	25.85	1.025	0.760
2	75	1	4	1	38.88	0.967	0.591
2	45	3	4	1	32.26	0.930	0.630
2	60	3	4	1	38.03	0.965	0.598
2	75	3	4	1	41.88	0.893	0.519
2	45	5	4	1	51.21	0.990	0.483
2	60	5	4	1	47.42	0.620	0.326
2	75	5	4	1	37.93	0.551	0.342

Del análisis de los datos experimentales (Cuadro 5), observamos que las muestras del parénquima externo muestran valores de densidades menores y de porosidad más altos que los del parénquima interior, indicando la importancia de la estructura en los cambios de densidad y porosidad.

Esto puede explicarse por la mayor dificultad que tiene el agua de salir y dejar expuesto poros en el parénquima interno, de humedad mayor que el externo, por ejemplo, a una temperatura mínima (45°C) de deshidratación necesitará una velocidad mayor (4m/s), para el mismo tiempo de deshidratado.

Al final de la deshidratación (5 h), las diferencias entre ambos sectores del tejido parenquimático no son muy significativas, debido posiblemente a que se ha equilibrado el contenido de humedad en ambos sectores del tejido en estudio.

En la Figura 14, se presenta la variación de las densidades y porosidad en las rodajas de manzana durante la deshidratación a condiciones óptimas (Cuadro 6), procedentes de la Optimización por el Método de Superficie de Respuesta aplicado a los datos experimentales.

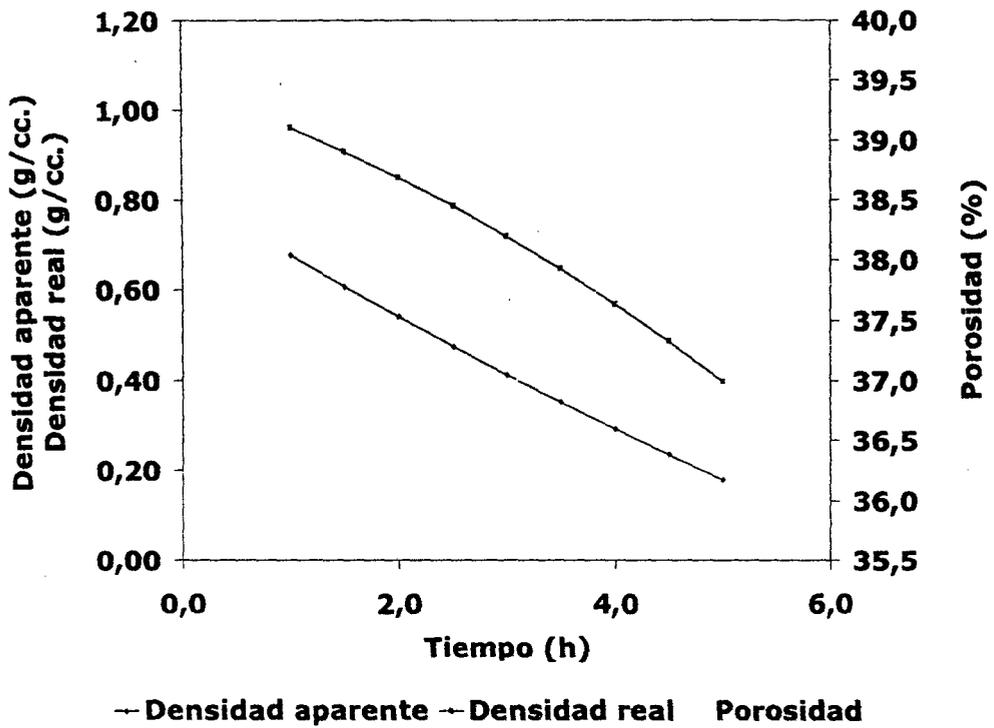


Figura 14. Comportamiento de la densidad aparente, densidad real y porosidad de rodajas de manzana delicia durante la deshidratación a condiciones óptimas de temperatura (75°C) y velocidad (2,0 m/s)

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 6. Valores óptimos obtenidos por Superficie de Respuesta.

Condición de deshidratación	Parámetro óptimo
Temperatura (°C)	75
Tiempo (h)	5
Velocidad (m/s)	2

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar la variación que experimentan las densidades es inversamente proporcional con el tiempo de secado, a diferencia de la porosidad cuya variación es directamente proporcional. A las 5 horas de deshidratado la densidad aparente llega a un mínimo de 0.2 g/cc, mientras que la densidad real a 0.4 g/cc, la porosidad máxima a la que se puede llegar es de 40%.

Los cambios en las tres propiedades son pronunciados lo cual concuerda por lo expuesto por Lozano *et al.*, (1980) y Zogzas *et al.*, (1994). Estos cambios están influenciados únicamente por la remoción de agua (Mavroudis *et al.*, 1998), y a los poros abiertos dejados, producto del encogimiento producido por la ruptura de paredes celulares y consecuente formación de cavidades, incrementándose el espacio intercelular y por lo tanto, la variación de la forma y tamaño de poros.

El comportamiento de las densidades es prácticamente lineal con el tiempo, lo que quiere decir que el componente cuadrático del tiempo no es significativo, a diferencia de la curva de porosidad. Según Lozano *et al.* (1980) y Zogzas *et al.* (1994), este comportamiento lineal de las densidades se presenta en el secado de manzana hasta humedades de 20%. La mayor porosidad de las muestras del parénquima exterior, muestra una progresión de esta propiedad desde el corazón hasta la cáscara de la manzana, demostrado por estudios de distribución espacial por Mavroudis *et al.*, (1998).

En el Cuadro 7, se presentan los valores mínimos y máximos de la densidad aparente, densidad real y porosidad resultantes de la aplicación de las condiciones de deshidratación ensayada; así como los valores óptimos obtenidos por Superficie de Respuesta (Anexo 2) de cada variable respuesta.

Los Análisis de Varianza (Anexo 2), obtenidos por el Método de Superficie de Respuesta aplicado a los datos experimentales, se esquematizan en las Graficas de Pareto (Figuras 15, 16 y 17).

En ellas podemos apreciar los factores que fueron encontrados por ser significativos ($P < 0,05$). Tanto para las densidades como para la porosidad el factor mas significativo fue el tiempo de deshidratación. La influencia de la temperatura también es significativa, sobre todo interactuando con el tiempo y el sector del tejido parenquimático. La velocidad de aire de deshidratación, es menos significativa que los factores antes mencionados. El sector del parénquima por si solo no presenta significancia excepto para la porosidad.

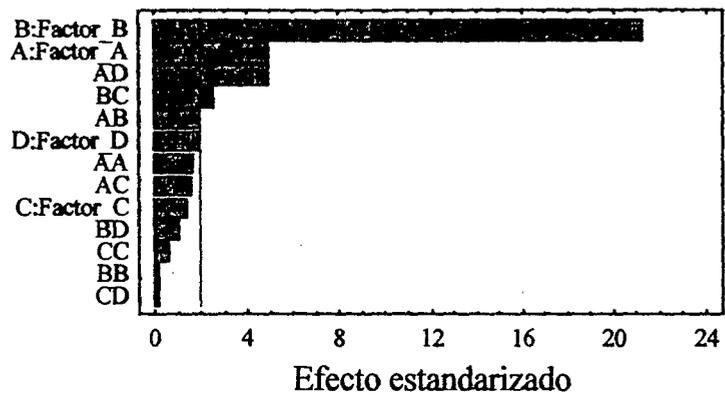
En el Anexo 2, también se presenta las graficas de interacción entre factores, tanto para las densidades como para la porosidad, las figuras muestran que la mayor interacción se da entre la temperatura y el sector del parénquima, por lo tanto se establece que si se varía el sector del tejido

la cáscara, existe menor orden estructural producto de que sus células son groseramente esféricas, muestran poca orientación y los espacios de aire son pequeños y no están bien interconectados en relación con el parénquima interior en el que las células son cilíndricas y los espacios de aire, radialmente elongados, están bien interconectados facilitando las condiciones de deshidratación, es decir se necesita una menor temperatura y/o velocidad de aire de deshidratación.

Cuadro 7. Valores máximos y mínimos y valor óptimo de las densidades y porosidad obtenidas.

	Densidad aparente (g/cc)	Densidad real (g/cc)	Porosidad (%)
Máximo	0,885	1,462	56,25
Mínimo	0,209	0,349	10,06
Óptimo	0,237	0,391	37,71

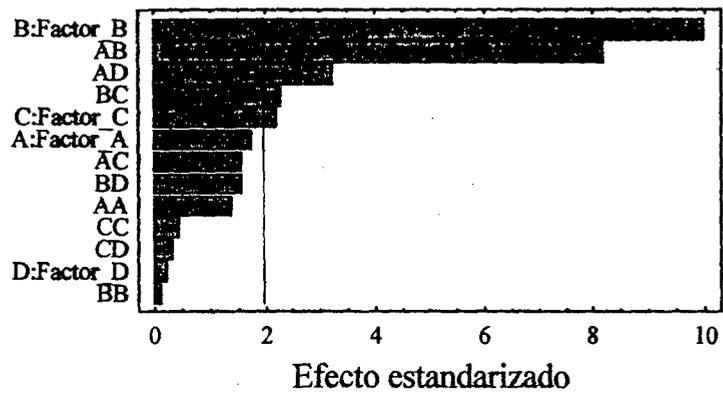
Fuente: Elaboración propia.



Factores: A: Temperatura, B: Tiempo, C: Velocidad,
D: Sector del parénquima.

Figura 15. Efecto estandarizado que muestra los factores significativos para la Densidad aparente.

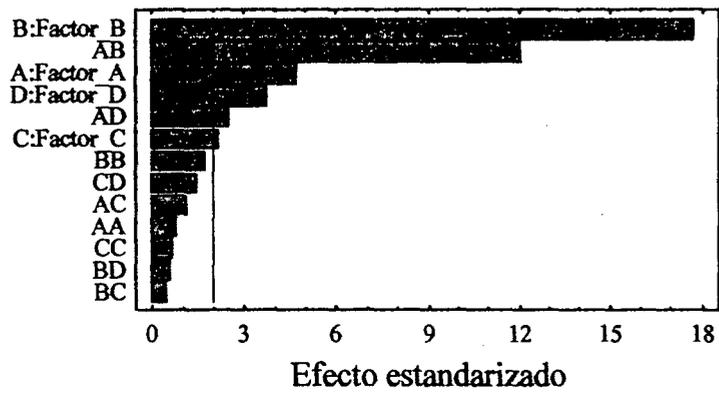
Fuente: Elaboración propia.



Factores: A: Temperatura, B: Tiempo, C: Velocidad,
D: Sector del parénquima.

Figura 16. Efecto estandarizado que muestra los factores significativos para la Densidad real.

Fuente: Elaboración propia.



Factores: A: Temperatura, B: Tiempo, C: Velocidad,
D: Sector del parénquima.

Figura 17. Efecto estandarizado que muestra los factores significativos para la Porosidad.

Fuente: Elaboración propia.

En el Cuadro 6, se presentó los resultados de la Optimización. La razón por la cual sería mejor trabajar a alta temperatura de deshidratación (75°C) con esta materia prima se debería a la estructura de la manzana antes de la deshidratación (Rahman, 2000).

En contraste con el concepto de transición vítrea, que dice que mientras más se aleje la temperatura de proceso de la temperatura de transición vítrea T_g el encogimiento será más pronunciado. En la manzana mientras mayor sea la temperatura el encogimiento será más controlado, con altas porosidades y retención de volumen mayor al 50%, en contraste con procesos de secado donde se alcanzan injustificables 17% del volumen inicial (Lozano et al., 1980). Del Valle et al. (1988) encontró, en otras variedades de manzana, que el colapso por encogimiento de la estructura de rodajas de manzanas no se redujo por la disminución de la diferencia entre la temperatura de secado por convección y la temperatura de transición vítrea.

Según estos experimentos a temperaturas de 80°C se mostró encogimiento limitado, a diferencia del secado a 20°C, que experimento gran encogimiento. La baja velocidad de secado (2.0 m/s) obtenida tiene su explicación según Ratti (1994), en el perfil plano de humedad que se pudo haber dado, de esta manera el estrés dentro del alimento es mínimo, y el encogimiento se torna uniforme. A una alta velocidad de secado, la humedad superficial decrece tan rápidamente que la superficie llega a ponerse tiesa (fenómeno denominado "*case hardening*" o endurecimiento

de cubierta), lo cual limita el subsiguiente encogimiento (Ratti, 1994); sin embargo, la capa vidriosa que se forma en combinación con los efectos de encogimiento tienden a bloquear los poros, evitando el secado efectivo (Potter, 1999).

Temperaturas más altas a la obtenida tampoco son recomendables, según lo expuesto por Welti (2001), temperaturas de secado mayores a 80°C también provocan el fenómeno de endurecimiento de cubierta antes citado. Además, como el secado en el interior se dificulta, es deficiente por lo que en almacén el crecimiento de mohos es inminente.

Las Superficies de respuesta y de contornos obtenidas de la Optimización de Respuesta Múltiple, se presentan en el Anexo 2 (Figuras del 21 al 24), ellas muestran gráficamente el comportamiento de la velocidad y temperatura de deshidratación a las 5 horas.

Considerando lo expuesto por Perry (1966), en cuanto a optimización del uso de energía, en los secadores de bandeja conviene velocidades de 2,0 a 5m/s, y temperaturas altas de secado, con la finalidad de mejorar el coeficiente de transmisión superficial de calor y eliminar las bolsas de aire de estancado, de la misma manera se reduce el tiempo de secado. Por lo tanto los parámetros obtenidos se encuentran dentro de los recomendados tanto para obtener una mejor calidad final y ahorrar energía.

La investigación en microestructura de manzana que se aproxima mas a los parámetros óptimos obtenidos en esta investigación (75°C y 2 m/s), es la presentada por Lewicki y Pawlak (2003), quienes observaron que

durante el secado convectivo de cubos de manzana de 7 mm de espesor, deshidratado a 70°C y 1,5 m/s, observaron similitudes estructurales en diferentes variedades de manzanas. En primer lugar la forma de los poros es elíptico con un factor de forma más frecuente igual a 0,84 que representa una elipse con eje mayor doble al menor en la materia prima (el factor de forma es 1 cuando la forma es circular y 0 cuando es una línea). Las paredes celulares de la manzana son plegadas. Ellos observaron que de 11 células teóricamente se forman 7 cavidades lo cual nos dice que tiene lugar algún rompimiento de las paredes celulares, el factor de forma más frecuente cambia a 0,64 lo cual representa una elipse con el eje mayor el triple que el menor. Las elipses son consideradas estructuras formadas por la unión de pentágonos, ambos crean cavidades diferentes que los presentes en la materia prima. Su formación necesita la unión de células adyacentes, por lo tanto el rompimiento de paredes celulares existe. La gran producción de pequeñas cavidades en el secado convectivo de manzanas puede llevar a la conclusión que el rompimiento de las paredes celulares, su encogimiento y deformación crean estructuras las cuales son reconocidas por la computadora del microscopio electrónico de barrido como áreas con perímetros cerrados. El tamaño de poros en el producto desecado varia en hasta 365 veces a diferencia de la materia prima que tiene un máximo de variabilidad de 56 veces. De esta manera se puede tener una visión completa de que es lo que ocurre con las manzanas macro y microestructuralmente.

C. GRADO DE ENCOGIMIENTO DE LAS MANZANAS

En el Cuadro 8, se puede apreciar los valores de grado de encogimiento obtenidos a las 5 horas de deshidratación, a las condiciones óptimas de deshidratación convectiva. Tomando como referencia 1,2 cc. de volumen inicial, y volumen final calculado de los valores de humedad y densidad aparente.

Cuadro 8. Humedad, volumen y encogimiento de las rodajas de manzana a 5 horas de secado.

Parénquima	Temperatura	Velocidad	Humedad	Volumen	Grado de encogimiento
	(°C)	(m/s)	(%)	(cc)	(%)
INTERIOR	75	2	5.96	0.622	48.17
EXTERIOR	75	2	5.70	0.569	52.58

Fuente: Elaboración propia.

Del Cuadro 8, podemos apreciar que el grado de encogimiento a éstas condiciones para el parénquima exterior es 52,58% y del parénquima interior fue de 48,17%. Por lo tanto, la retención de volumen y la humedad, en promedio, de rodajas de manzana de 7mm de espesor deshidratadas a condiciones óptimas de deshidratación convectiva fueron de 50% y 5,8%, respectivamente.

Los valores obtenidos son muy superiores a los reportados por Lozano *et al.*, (1980), quienes encontraron que en la industria el encogimiento de manzanas sometidas a deshidratación por aire caliente llega a niveles del 83%, es decir 17% del volumen inicial de las manzanas. Debido a esta razón otros investigadores han optado por liofilizar (Khalloufi y Ratti, 2003) u osmodeshidratar (Mavroudis *et al.*, 1998), previo al secado por aire caliente; considerando que de este modo se ahorra energía y se mantiene un volumen adecuado, sin embargo, el tiempo que utilizan en el deshidratado global es de 7 horas, de los cuales 3 son para el secado por aire caliente, solo 2 horas menos de las que se obtuvo en este estudio, para variedades Kim y Granny Smith (Mavroudis *et al.*, 1998). Resultados expuestos por Lewicki y Pawlak (2003), muestran encogimiento superior al 60%, con condiciones de secado de 70°C y 1,5m/s, ellos trabajaron con cubos de 7 mm, con la variedad Idared, estas condiciones se asemejan más a los reportados en esta investigación.

Se pudo observar que en las muestras secadas a 75°C y 2,0 m/s, mostraron un encogimiento uniforme, por lo que se puede inferir, que se

trata de un encogimiento del tipo isotrópico (Rahman, 2001). Sin embargo, según citan Lewicki y Pawlak (2003), los cambios en la microestructura no son isotrópicos. Muchas de las pequeñas cavidades que se forman después del deshidratado se presentan cercanas a la superficie, mientras que las grandes cavidades están extendidas a lo largo del interior de las muestras.

V. CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se llegó en la presente investigación son:

- Se logró optimizar el proceso de deshidratación de rodajas de manzana en función de las densidades y porosidad.
- La densidad aparente y densidad real variaron de manera inversamente proporcional al tiempo de deshidratación, mientras que la porosidad varió directamente.
- El grado de encogimiento mínimo obtenido por optimización de respuesta múltiple para ambos sectores del tejido parenquimático de la manzana fue de 50%, con 5,8% de humedad. Lográndose una retención del 50% del volumen inicial de las rodajas de manzana, a condiciones óptimas de temperatura (75°C), tiempo (5h) y velocidad (2m/s) de aire de deshidratación.
- A estas condiciones el encogimiento encontrado fue isotrópico.

VI. RECOMENDACIONES

A continuación se plantean algunas recomendaciones desprendidas del presente trabajo de investigación:

- Realizar el estudio microestructural (forma, tamaño y distribución de poros) de las rodajas de manzana antes y después del deshidratado convectivo, para lo cual se requerirá una mayor inversión.
- Continuar con el estudio de almacenamiento (empaques, tiempo de vida útil, etc) de las rodajas deshidratadas.
- Hacer un estudio de mercado para este producto, de modo que se pueda incentivar la producción de manzana delicia en otras regiones del Perú, elaborar rodajas deshidratadas y promover su consumo. .
- Implementar un equipo de determinación de densidad real de materiales en el Laboratorio de Ingeniería de Alimentos de la Facultad, para poder realizar estudios similares en otros alimentos y en diferentes procesos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

A.O.A.C. 1995. Official Methods of Análisis of the Asociación of Agricultural Chemists. Editorial E.U.A. 16nd.

Ayala, J. y Pardo, R. 2000. Optimización por Diseños Experimentales. Con Aplicaciones en Ingeniería. A & B S.A. Lima. Perú.

Brennan (1998). Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza. España

Day, C. 1964. Device for measuring voids in porous materials. Agricultural Engineering, 45 (1), 36-37.

Del Valle, J.; Cuadros, T. y Aguilera, J. 1998. Glass Transitions and Shrinkage During Drying and Storage of Osmosed Apple Pieces, Food Res. Int., 31 (3), 191–204

Earle, R. 1979. Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza. España.

Fellows (1994). Tecnología del Procesado de los Alimentos, Principios y Prácticas. Editorial Acribia, Zaragoza. España. p(306-311)

Galván, S. 2000. Propuesta de un Método Físico para Determinar Proporciones de Granos de Mezclas a Partir de sus Valores de Densidad real, Evaluado por un Porosímetro Experimental. Tesis para optar el grado de Ingeniero en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima. Perú

Kavac A, E. y Bicer, Y. 2003. Modeling and experimental study on drying of apple slices in a convective cyclone dryer. Journal of Science of Food and Agriculture.

- Khalloufi, S. y Ratti, C. 2003. Quality deterioration of freeze-dried foods as explained by their glass transition temperature and internal structure. *Journal of Food Science*. 68, 892-903.
- Khan, A. y Vincent, J. 1990. Anisotropy of apple parenchyma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 52, 455-466.
- Kirk, R. 1996. *Composición y Análisis Químico de los Alimentos de Pearson*. 2ª Ed. Editorial Continental S.A. México.
- Konopacka, D. y Plochanski, W. 2001. Effect Of Raw Material Storage Time On The Quality Of Apple. *Drying Technology*., 19, Issue 3&4
- Lewis, R. 1993. *Propiedades Físicas de los Alimentos y de los Sistemas de Procesado*. Editorial Acribia. Zaragoza. España.
- Lewicki P, P. y Pawlak, G. 2003. Effect of Drying on Microstructure of Plant Tissue. *Drying Technology*. 21, 657 – 683.
- Lozano, J. ; Rotstein, E. y Urbicain, M. 1980. Total Porosity and Open pore porosity in the drying of fruits, *Journal of Food Science*., 45, 1403-1407.
- Mazza, G. 1983. Dehydration of carrots; Effect of pre-drying treatments on moisture transport and product quality, *J. Food Technol.*, 18, 112–123.
- Mavroudis, N.; Gekas, V. y Sjöholm, I. 1998. Osmotic Dehydration of Apples, Shrinkage Phenomena and the Significance of Initial Structure on mass Transfer Rates. *Journal of Food Engineering* 38, 101-123.

Mavroudis, N.; Wadso, L.; Gekas, V. y Sjöholm, I.. 1998. Shrinkage, Microscopic Studies and Kinetics of Apple Fruit Tissue During Osmotic Dehydration, IDS'98, Proceedings 11th International Drying Symposium (IDS '98), Halkidiki, Greece, August, 19–22, 844–851.

Myers, R. W. 2003. Response Surface Methodology. Encyclopedia of Biopharmaceutical Statistics. p (858-869).

Palipane, K.; Driscoll, R. y Szrednicki, G. 1992. Density, Porosity and Composition of Macadamia In-Shell Nuts, Food Australia, 44 (6), 276–280.

Perry, R. H. 1966. Manual del Ingeniero Químico. 1era Ed. Ed. Mc. Graw Hill. Tomo I.

Potter, N. 1999. Ciencia de los Alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza. España. p(255-261)

Rahman, M.; Perera, C.; Chen, X.; Driscoll, R. y Potluri, P. 1996. Density, Shrinkage and Porosity of Calamari Mantle Meat During Air Drying in a Cabinet Dryer as a Function of Water Content, J. Food Engineering, 30, 135–145.

Rahman, M. y Perera, C. 1999. Drying and Food Preservation, Handbook of Food Preservation, Rahman M. S. Marcel Dekker, New York,.

Rahman M. 2000. Mechanism of Pore Formation in Foods During Drying: Present Status, ICEF8, Proceedings 8th International Congress on Engineering and Food (ICEF-8), April, 9–13, Puebla, Mexico,

Rahman, S. 2001. Toward prediction of porosity in foods during drying: a brief review. *Drying Technology*.

Ratti, C. 1994. Shrinkage During Drying of Foodstuffs, *J. Food Engineering*, 23, 91–105.

Reeve, R. 1953. Histological investigations of texture in apples. II. Structure and intercellular spaces. *Food Research*, 18, 604-617.

Rotstein, E. 1987. The Prediction of Diffusivities and Difusión-related properties in to the drying of cellular foods, *Physical Properties of Foods.*, 131-138.

Salas, F. y Labuza, T. 1968. Surface Active Agents Effects on Drying Characteristics of Model Food Systems, *Food Technol.*, 22, 80–84.

Seelig, R.A. y Hirsh, D. 1978. *Fruta & Vegetable Facts & Pointers: Apples*. United Fresh Fruta & vegetable Association.

Snedecor, G. 1980. *Statistical Methods*. The Iowa State University Press. Iowa. E.E.U.U.

Toledo R.T. 1991. *Fundamentals of Food Process Engineering*. Chapman and Hall.

Ureña, M. 1990. *Obtención de Alimentos Modelo a Partir de Mezclas de Bentonita: Glicerol: Agua Para estudios de tratamientos térmicos*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España

Vagenas, C. K. y Karathanos, V.T. 1991. Prediction of the moisture diffusivity in granular materials with special applications to foods. *Biotechnology Progress*, 7, 419-426.

Vincent, J. 1989. Relationship Between Density and Stiffness of Apple Flesh, *J. Sci. Food Agriculture*, 47, 443-463.

Wallapapan, K. 1994. "Thermal diffusivity and conductivity of defatted soy flour". *Transaction of the ASAE*, 25 (5), 1440-1444.

Welti, C. Barbosa-Cánovas, J. Aguilera, M. López-Malo, P. y E. Palou. 2001. "Proceedings of 8 International Congress of Engineering and Food." Technomics Pub. Co. (2 volúmenes). ISBN: 1566769515

Wildegger-Gaissmaier, A. y Agarwal, P. 1990. Shrinkage During Drying and Devolatilization of Wet Coal, Mujumdar A. S., Roques M. A. Hemisphere Publishing Corporation, Bristol, PA, pp. 320-325.

Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B. y Marinos-Kouris, D. 1994. Densities, shrinkage y porosity of some vegetables during air drying. *Dryig Technology*, 12, 1653-1666.

ANEXOS

ANEXO 1. GUIA DE PRÁCTICA PARA DETERMINACION DE LA DENSIDAD REAL EN ALIMENTOS.

1. OBJETIVO

Determinar la densidad real de granos como cereales y/o leguminosas, mediante el método de Day (1969), modificado por Ureña (1990).

2. FUNDAMENTO

Extraer el aire de la muestra y producir un vacío parcial. El método se basa en determinar el volumen de los huecos del material al inducir un fenómeno de compensación de presiones entre dos recipientes aislados del medio ambiente. La presión es la ejercida por un gas, en este caso aire, cuyo número de moles es constante en el sistema y es el resultante de la suma de los que quedan en el recipiente, en el que previamente se hace el vacío, y de los que se encuentran ocupando el resto del volumen del envase que contiene las partículas de la muestra. Después del fenómeno de transferencia másica desde el recipiente con mayor presión hacia el que se le hizo vacío, el número de moles queda distribuido en el sistema, estableciéndose así la presión final de equilibrio. Luego, aplicando la ecuación general de los gases ideales se tiene que:

$$N = N1 + N2$$

Entonces:

$$(PxV)/(RxT)=[(P1xV1)/(R1xT1)]+[(P2xV2)/(R2xT2)]$$

Donde "N1" y "N2" son el número de moles de aire que están en un inicio en los recipientes 1 y 2. "N", es el número de moles después de la transferencia másica y que se encuentra a una presión de equilibrio "P". "R" la constante universal de los gases y "T" la temperatura ambiente. Simplificando la expresión, ya que se asume que:

$$R \times T = R1 \times T1 = R2 \times T2$$

Se tiene:

$$P \times V = (P1 \times V1) + (P2 \times V2)$$

Si "P2" es la presión atmosférica y V es la suma de los volúmenes "V1" y "V2", en términos de presiones manométricas, se tiene que:

$$V2 / V1 = (P1 - P) / P$$

Donde la fracción volumétrica sería la porosidad (€) que presenta el material estudiado. La última expresión es válida si los volúmenes de los dos recipientes son exactamente iguales, pero como no siempre se da esto, por el error intrínseco del material y de la construcción del equipo, se hace necesario introducir en la ecuación un factor de corrección (fc), que se determina experimentalmente. La ecuación sería entonces:

$$\epsilon = fc (P1 - P) / P$$

donde:

$$fc = V1/Vrec$$

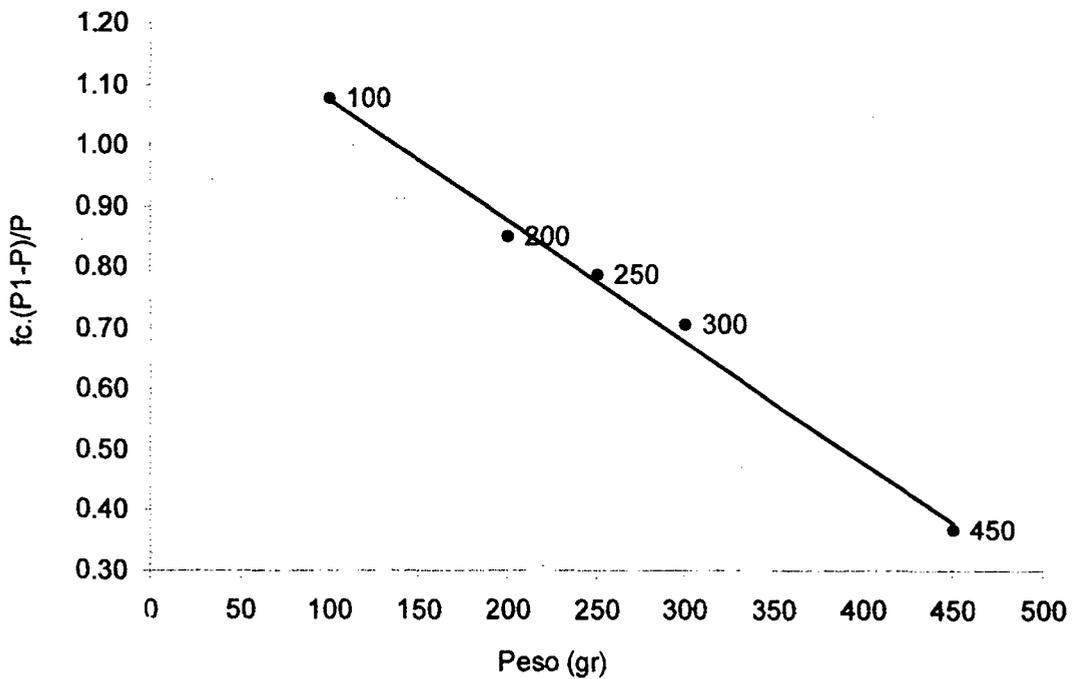
$$Vrec = \text{Volumen del recipiente 2.}$$

Para la determinación de f_c se realiza una curva de calibrado con agua, en la que se plotea $(P1 - P)/P$ frente al volumen de agua (V_a) añadido al recipiente 2, teniendo:

$$(P1 - P)/P = (V_{rec} - V_a) / V1$$

El término $(1/V1)$ es igual a la pendiente de la curva de calibrado, con lo que se determina el valor de $V1$ y, de la ordenada en el origen, el volumen del recipiente 2 (V_{rec}).

CURVA DE CALIBRADO DEL EQUIPO CON AGUA (AJUSTADA POR MINIMOS CUADRADOS)



3. MATERIALES Y METODOS

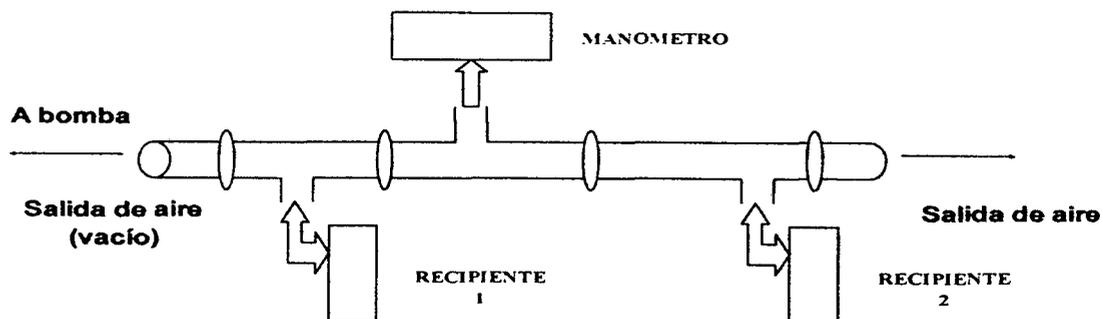
3.1. Materiales:

Granos: maíz perla, arroz integral y arroz blanco

3.2. Método de Day modificado por Ureña (1990), para determinar la densidad real

- a) Se trabajará con los alimentos mencionados, para lo cual se mantendrá el alimento en el recipiente de aluminio en forma de plato, con 30 cm de diámetro y bordes de 2 cm de altura, a una temperatura de 70°C por tres días, dentro de una estufa que esta a 70 mm Hg.
- b) Se elabora una curva de calibrado utilizando agua, para esto se verterá un volumen conocido de agua en el recipiente, dos para cada medición, habiendo tantas mediciones como puntos se quieran tener en la curva. Para cada determinación se cierra el sistema, se procederá luego a extraer el aire del recipiente 1, abriendo la válvula 1, al lograr el máximo vacío posible, se cierra la válvula 1 y se procederá a leer en el manómetro la presión en el recipiente 1, teniéndose así la presión 1. se apertura luego la válvula 2, con la que se permite la transferencia másica de aire y con la que se obtiene la presión de equilibrio P. Se apertura el sistema con la válvula 3, se vierte el siguiente volumen de agua, se cierran todas las válvulas y se procede con la siguiente medición. Se utiliza el siguiente equipo:

EQUIPO DE DETERMINACION DE DENSIDAD REAL



4. RESULTADOS Y DISCUSION

Determinar 6 valores de porosidad para ser graficadas versus el peso correspondiente, para obtener la densidad real a partir de la función lineal.

ANEXO 2. CÁLCULOS Y GRÁFICOS DE LAS SUPERFICIES DE RESPUESTA DE LAS DENSIDADES Y LA POROSIDAD A DIFERENTES CONDICIONES DE DESHIDRATACIÓN.

A. DENSIDAD APARENTE

A.1. Modelo Matemático

$$Da = 0.769947 + 0.0012338*Temperatura - 0.0631111*Tiempo + 0.109167 *Velocidad - 0.0000875309*Temperatura^2 - 0.000220833 *Temperatura *Tiempo + 0.00153611*Temperatura*Velocidad - 0.00446528*Tiempo^2 + 0.0065*Tiempo*Velocidad - 0.0351111*Velocidad^2$$

A.2. Análisis de varianza

En el Cuadro 9, se presenta el análisis de varianza para la densidad aparente, indicando los factores significativos y el coeficiente de determinación.

Cuadro 9. Análisis de varianza para la densidad aparente.

Fuente*	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado medio	Valor F	Valor P
A:Factor_A	0.115921	1	0.115921	23.58	0.0000
B:Factor_B	2.20045	1	2.20045	447.69	0.0000
C:Factor_C	0.00795901	1	0.00795901	1.62	0.2064
D:Factor_D	0.0159627	1	0.0159627	3.25	0.0748
AA	0.0118074	1	0.0118074	2.40	0.1246
AB	0.0165763	1	0.0165763	3.37	0.0695
AC	0.00989002	1	0.00989002	2.01	0.1594
AD	0.113685	1	0.113685	23.13	0.0000
BB	0.0000172269	1	0.0000172269	0.00	0.9529
BC	0.0289101	1	0.0289101	5.88	0.0172
BD	0.00406501	1	0.00406501	0.83	0.3655
CC	0.00100967	1	0.00100967	0.21	0.6514
CD	0.00000868056	1	0.00000868056	0.00	0.9666
blocks	0.0138041	1	0.0138041	2.81	0.0971
Total error	0.457108	93	0.00491514		

Total (corr.)	2.99718	107			
R-cuadrado = 84.7487 %.					

* Factores: A: Temperatura, B: tiempo, C: Velocidad y D: Sector del parénquima.

Fuente: Elaboración propia.

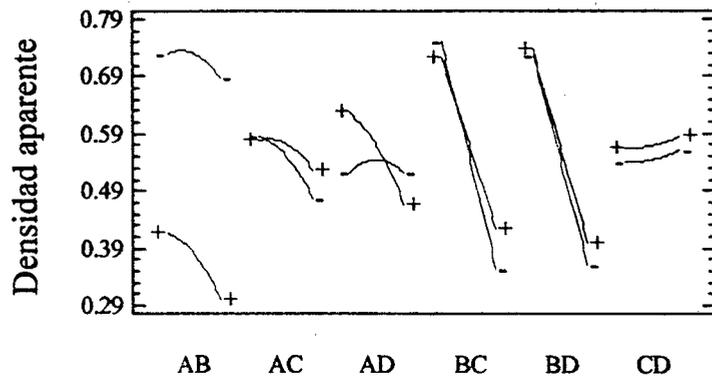


Figura 18. Interacción entre factores para la densidad aparente

Fuente: Elaboración propia.

B. DENSIDAD REAL

B.1. Modelo Matemático

$$\begin{aligned} D_r = & -0.218794 + 0.0230968 * \text{Temperatura} + 0.287889 * \text{Tiempo} + .128694 * \\ & \text{Velocidad} - 0.000145432 * \text{Temperatura}^2 - 0.00500139 * \text{Temperatura} * \\ & \text{Tiempo} + 0.00152222 * \text{Temperatura} * \text{Velocidad} - 0.0100764 * \text{Tiempo}^2 + \\ & 0.0035 * \text{Tiempo} * \text{Velocidad} - 0.0324722 * \text{Velocidad}^2 \end{aligned}$$

B.2. Análisis de varianza

En el Cuadro 10, se presenta el análisis de varianza para la densidad aparente, indicando los factores significativos y el coeficiente de determinación.

Cuadro 10. Análisis de varianza para la densidad real.

Fuente	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado medio	Valor F	Valor P
A:Factor_A	0.0451001	1	0.0451001	2.89	0.0926
B:Factor_B	1.54587	1	1.54587	99.01	0.0000
C:Factor_C	0.0716942	1	0.0716942	4.59	0.0347
D:Factor_D	0.000520083	1	0.000520083	0.03	0.8556
AA	0.0276987	1	0.0276987	1.77	0.1861
AB	1.02814	1	1.02814	65.85	0.0000
AC	0.0361901	1	0.0361901	2.32	0.1313
AD	0.158109	1	0.158109	10.13	0.0020
BB	0.0000409074	1	0.0000409074	0.00	0.9593
BC	0.0780047	1	0.0780047	5.00	0.0278
BD	0.0355556	1	0.0355556	2.28	0.1347
CC	0.00245363	1	0.00245363	0.16	0.6927
CD	0.00123339	1	0.00123339	0.08	0.7793
blocks	0.0277441	1	0.0277441	1.78	0.1858
Total error	1.45205	93	0.0156134		
Total (corr.)	4.5104	107			
R-cuadrado = 67.8067 %.					

*Factores: A: Temperatura, B: tiempo, C: Velocidad y D: Sector del parénquima.

Fuente: Elaboración propia.

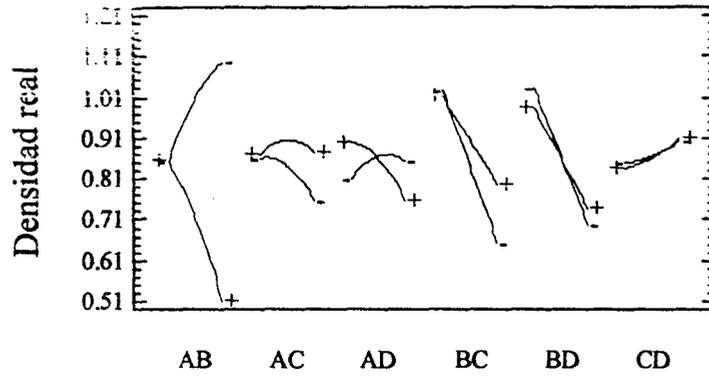


Figura 19. Interacción entre factores para la densidad real.

Fuente: Elaboración propia.

C. POROSIDAD

C.1. Modelo Matemático

$$\begin{aligned} \text{Porosidad} = & -75.0222 + 1.66998*\text{Temperatura} + 24.522*\text{Tiempo} + \\ & 2.04229*\text{Velocidad} - 0.00200741*\text{Temperatura}^2 - 0.316028 \\ & * \text{Temperatura} * \text{Tiempo} - 0.0728056*\text{Temperatura} * \text{Velocidad} + 0.175* \\ & \text{Tiempo}^2 - 0.516875*\text{Tiempo} * \text{Velocidad} + 0.971667*\text{Velocidad}^2 \end{aligned}$$

C.2. Análisis de varianza

En el Cuadro 11, se presenta el análisis de varianza para la densidad aparente, indicando los factores significativos y el coeficiente de determinación.

Cuadro 11. Análisis de varianza para la porosidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	Df	Cuadrado medio	Valor F	Valor P
A:Factor_A	484.746	1	484.746	21.95	0.0000
B:Factor_B	6934.49	1	6934.49	313.97	0.0000
C:Factor_C	98.3036	1	98.3036	4.45	0.0376
D:Factor_D	302.673	1	302.673	13.70	0.0004
AA	12.8676	1	12.8676	0.58	0.4472
AB	3201.99	1	3201.99	144.98	0.0000
AC	24.3533	1	24.3533	1.10	0.2964
AD	130.088	1	130.088	5.89	0.0172
BB	59.2414	1	59.2414	2.68	0.1049
BC	3.81941	1	3.81941	0.17	0.6785
BD	6.72222	1	6.72222	0.30	0.5825
CC	9.32922	1	9.32922	0.42	0.5173
CD	44.3525	1	44.3525	2.01	0.1598
blocks	1.29363	1	1.29363	0.06	0.8093
Total error	2054.03	93	22.0863		
Total (corr.)	13368.3	107			
R-cuadrado = 84.6351 %.					

*Factores: A: Temperatura, B: tiempo, C: Velocidad y D: Sector del parénquima.

Fuente: Elaboración propia.

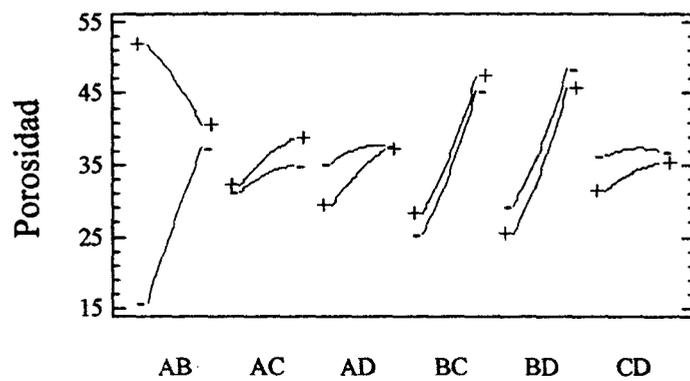


Figura 20. Interacción entre factores para la porosidad.

Fuente: Elaboración propia.

D. SUPERFICIES DE RESPUESTA Y DE CONTORNOS DE LA OPTIMIZACION DE RESPUESTA MULTIPLE.

En las Figuras 21al 24, se muestran las superficies de respuesta y de contornos obtenidas de la Optimización Múltiple de Superficie de Respuesta. Las Figuras se obtuvieron a 5 horas de deshidratación y para cada sector del tejido parenquimático evaluado.

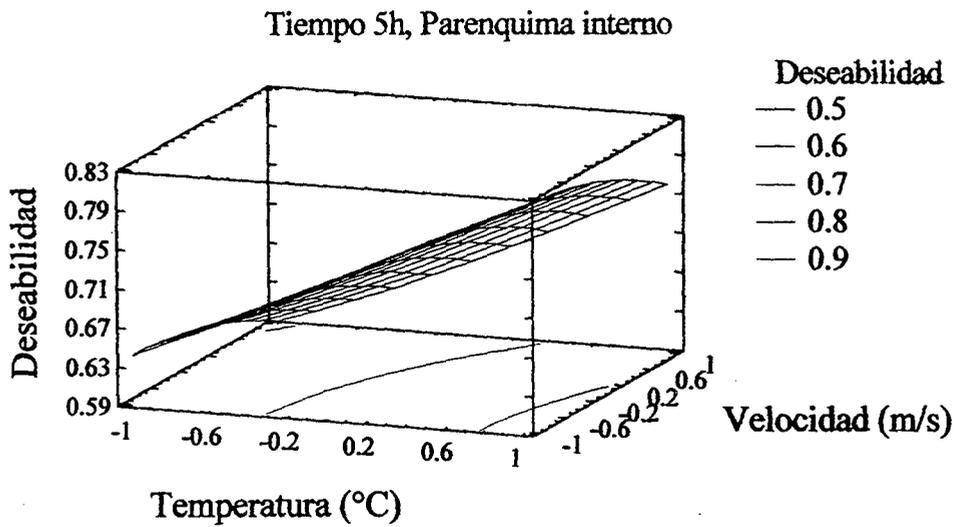
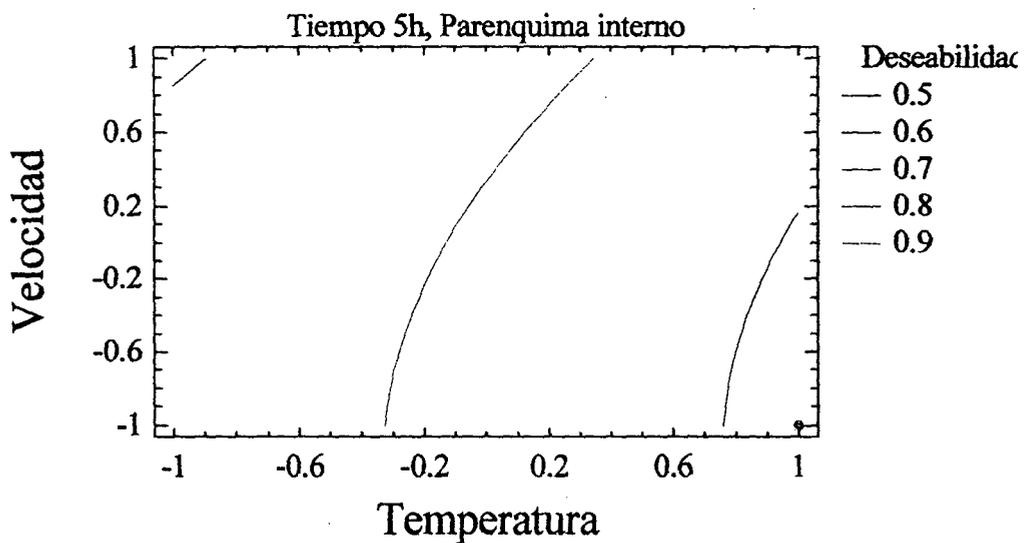


Figura 21. Superficie de respuesta para el parénquima interno.

Fuente: Elaboración propia.



* Temperatura: -1(45°C) a 1(75°C); Velocidad: -1 (2m/s) a 1(4m/s).

Figura 22. Superficie de contornos para el parénquima interno.

Fuente: Elaboración propia.

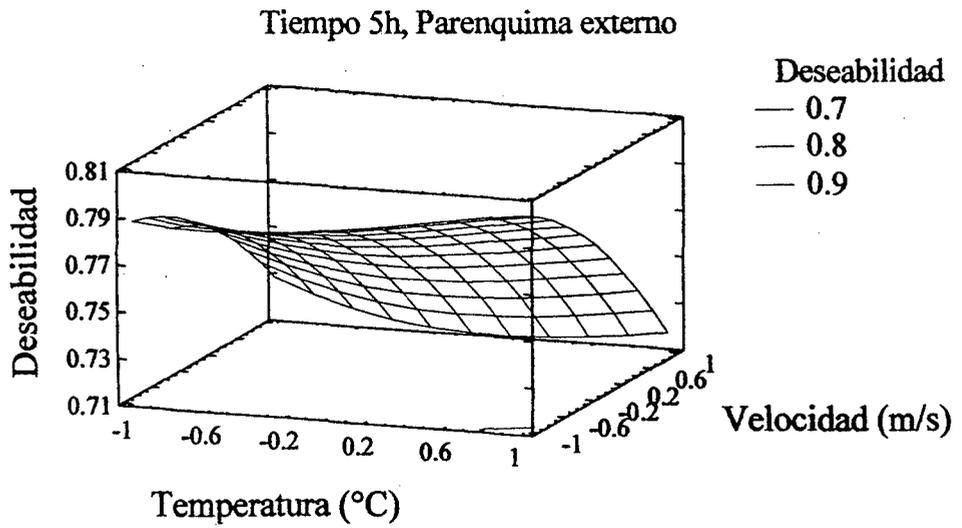
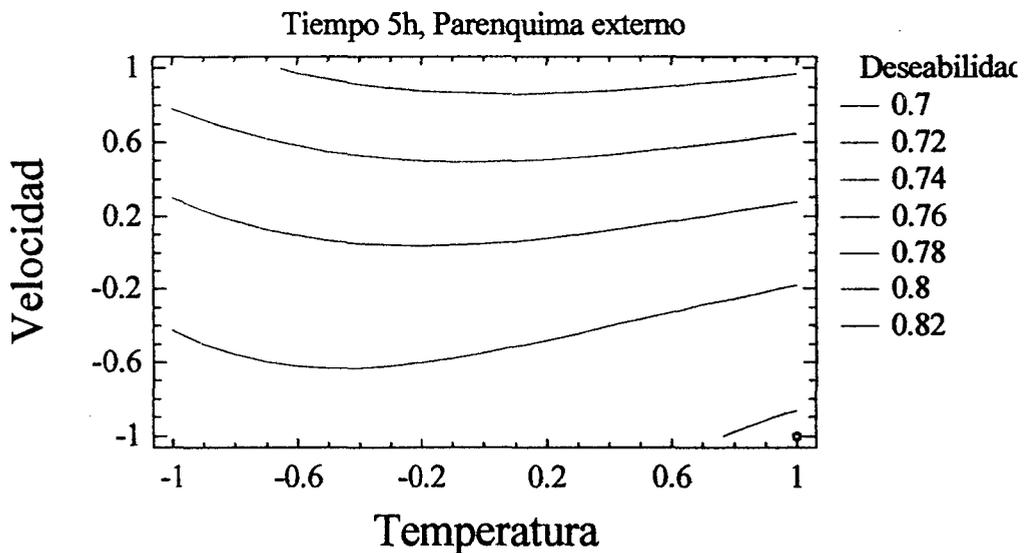


Figura 23. Superficie de respuesta para el parénquima externo.

Fuente: Elaboración propia.



* Temperatura: -1(45°C) a 1(75°C); Velocidad: -1 (2m/s) a 1(4m/s).

Figura 24. Superficie de contornos para el parénquima externo

Fuente: Elaboración propia.