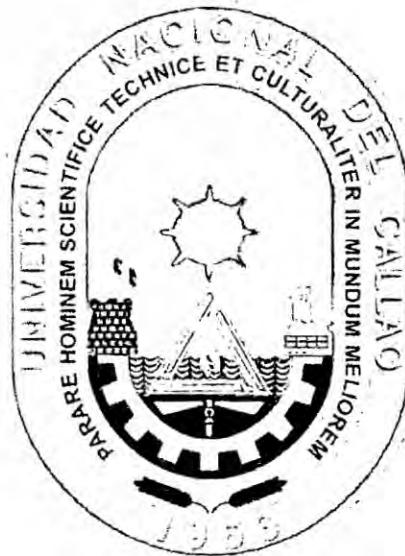


T/6622/5210

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“OPTIMIZACIÓN DE LA DESHIDRATACIÓN
OSMÓTICA DE CILINDROS DE MANZANA
(*Malus domestica B.*) POR LA METODOLOGÍA DE
SUPERFICIE DE RESPUESTA”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO
NOMBRES Y APELLIDOS: GINA KARINA SANDOVAL ÁNGELES

Callao, 2016
PERÚ

LIBRO 2 FOLIO No.74 ACTA N° 257 DE SUSTENTACION DE TESIS SIN
CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO

El día Veintiuno de Agosto del Dos Mil Quince, siendo las.....13:00..... horas, se reunió el JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS de la Facultad de Ingeniería Química, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

- | | |
|--------------------------------------|--------------|
| Ing. LUIS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS | : Presidente |
| Ing. CARLOS ERNESTO ANGELES QUEIROLO | : Secretario |
| Ing. CALIXTO IPANAQUE MAZA | :Vocal |
| Ing. CESAR GUTIÉRREZ CUBA | :ASESOR |

En el fin de dar inicio al acto de sustentación de tesis de la Señorita Bachiller ANDOVAL ÁNGELES GINA KARINA, quienes habiendo cumplido con los requisitos para obtener el Título Profesional de Ingeniero Químico, sustenta la tesis titulada "OPTIMIZACIÓN DE LA DESHIDRATACIÓN OSMOTICA DE CILINDROS DE ANZANA (Malus domestica B.) POR LA METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE ESPUESTA".

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, se acordó: Dar por APROBADO..... con el calificativo..... BUENO..... a la expositora Señorita Bachiller ANDOVAL ÁNGELES GINA KARINA.

Se dio por cerrada la Sesión a las.....14:15..... horas del día veintiuno del mes y año en curso.

Ing. LUIS AMÉRICO CARRASCO
VENEGAS
Presidente

Ing. CARLOS ERNESTO ANGELES
QUEIROLO
Secretario

Ing. CALIXTO IPANAQUE MAZA
Vocal

Ing. CESAR GUTIÉRREZ CUBA
Asesor

DEDICATORIA

A mi Dios, quién me guía por el buen camino y me da fuerzas para seguir adelante y no desmayar con los problemas y adversidades que se me presentan.

AGRADECIMIENTO

A mis padres porque creyeron en mí, por su apoyo, consejos, comprensión y ayuda en los momentos difíciles de mi vida, que me han dado todo lo que soy como persona mis valores, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanas y hermano por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida y estar siempre presentes acompañándome para poderme realizar.

A mi sobrino quien ha sido y es una motivación, inspiración y felicidad.

A mi asesor por su continuo apoyo y consejos para poder realizar con éxito ésta tesis.

“Qué Dios nos de la sabiduría para descubrir lo correcto, la voluntad para elegirlo y la fuerza para hacer que perdure.”

INDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	3
I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	4
1.1 Identificación del problema	4
1.2 Formulación del problema	4
1.2.1 Problema general.....	4
1.2.2 Problemas específicos	5
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Justificación	6
1.5 Importancia	7
II. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Antecedentes del estudio.....	9
2.2 Generalidades sobre la manzana	11
2.2.1 Morfología y estructura.....	11
2.2.2 Composición química	14
2.2.3 Cambios morfológicos durante la maduración	15
2.2.4 Producción y comercio.....	17
2.3 Deshidratación de alimentos	18
2.3.1 Consideración general.....	18
2.3.2 Deshidratación osmótica.....	18
2.3.3 Factores que influyen en la deshidratación osmótica.....	22
2.3.4 Bases termodinámicas y cinéticas de deshidratación osmótica (DO)	31
2.4 Metodología de superficie de respuesta	35

2.4.1	La metodología de Superficie de Respuesta	35
2.4.2	Diseños de Superficie de Respuesta.....	36
2.4.3	Método de Escalonamiento Ascendente	37
2.4.4	Diseños para estimar superficies de respuesta de segundo orden	39
2.4.5	Optimización final.....	41
2.4.6	Optimización simultanea de varias respuestas	46
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS.....	51
3.1	Definición de las variables.....	51
3.2	Operacionalización de variables	51
3.3	Hipótesis general e hipótesis específicas	52
3.3.1	Hipótesis general.....	52
3.3.2	Hipótesis específicas.....	52
IV.	METODOLOGÍA	53
4.1	Tipo de investigación	53
4.2	Diseño de la investigación	53
4.3	Población y muestra.....	54
4.4	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	55
4.4.1	Método de análisis	55
4.4.2	Metodología experimental	57
4.5	Procedimientos de recolección de datos	58
4.5.1	Materiales y métodos	59
4.5.2	Procedimiento experimental	61
4.6	Procedimiento estadístico y análisis de datos	67
V.	RESULTADOS.....	77
5.1	Características Físico- Químicas de la manzana delicia	77
5.2	Resultados experimentales.....	77
5.3	Optimización del proceso de deshidratación osmótica de cilindros de manzana ...	79

5.3.1	Estimación de los modelos matemáticos de segundo orden y análisis de la superficie de respuesta	79
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	99
6.1	Contrastación de hipótesis con los resultados	99
6.2	Contrastación de resultados con otros estudios similares	101
6.2.1	Análisis de las características Físico-Químicas de la manzana delicia	101
6.2.2	Análisis de la optimización de los cilindros de manzana delicia	101
VII.	CONCLUSIONES	104
VIII.	RECOMENDACIONES	105
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
	ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°2.1. Apariencia de la manzana variedad delicia.....	13
Figura N°2.2. Contenido de agua y azúcar durante la deshidratación osmótica.....	20
Figura N°2.3. Función de deseabilidad individual para la maximización de una respuesta.....	48
Figura N°2.4. Función de deseabilidad individual para la minimización de una respuesta.....	49
Figura N°2.5. Función de deseabilidad para la obtención de un nivel específico de una respuesta.....	50
Figura N°4.1. Selección y clasificación de manzanas.....	63
Figura N°4.2. Cilindros de manzana.....	64
Figura N°4.3. Cilindros de manzana en solución osmótica.....	65
Figura N°5.1. Resultado de la pérdida de agua obtenida versus la pérdida de agua estimado por el modelo de segundo orden.....	83
Figura N°5.2. Superficie de respuesta para la pérdida de agua en el diseño compuesto central.....	86
Figura N°5.3. Curvas de contorno para la pérdida de agua en el diseño compuesto central.....	87
Figura N°5.4. Resultado de la ganancia de sólido obtenido versus la ganancia de sólidos estimado por el modelo de segundo orden.....	91

Figura N°5.5. Superficie de respuesta para la ganancia de sólido en el diseño compuesto central.....	94
Figura N°5.6. Curvas de contorno para la ganancia de sólido en el diseño compuesto central.....	95

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro N°2.1. Algunos constituyentes de la manzana delicia en partes por millón..	14
Cuadro N°2.2. Contenido de azúcares, ácidos y sólidos solubles totales de ocho cultivares de la fruta de manzana.....	16
Cuadro N°2.3. Usos y ventajas de algunos solutos osmóticos.....	25
Cuadro N°2.4. Representación del análisis de varianza.....	43
Cuadro N°4.1. Variables independientes naturales y codificadas consideradas para el diseño compuesto central (DCC).....	69
Cuadro N°4.2. Diseño compuesto central (DCC).....	70
Cuadro N°5.1. Características físico-químicas de la manzana delicia.....	77
Cuadro N°5.2. Resultado de la pérdida de agua en el diseño compuesto central ...	78
Cuadro N°5.2. Resultado de la ganancia de sólidos en el diseño compuesto central.....	79
Cuadro N° 5.4 Pérdida de agua obtenido y estimado por el diseño compuesto central.....	80
Cuadro N°5.5. Análisis de varianza (ANVA) de la regresión para la pérdida de agua.....	81
Cuadro N°5.6. Prueba de significancia de los coeficientes de la ecuación de regresión cuadrática para la pérdida de agua.....	84
Cuadro N°5.7. Ganancia de sólido obtenido y estimado por el diseño compuesto central.....	88

Cuadro N°5.8. Análisis de varianza (ANVA) de la regresión para la ganancia de sólidos.....	89
Cuadro N°5.9. Prueba de significancia de los coeficientes de la ecuación de regresión cuadrática para la ganancia de sólido.....	92
Cuadro N°5.10. Condiciones óptimas, respuestas estimadas y deseabilidad global obtenidas luego de la optimización simultanea de las respuestas.....	97
Cuadro N°5.11. Comparación de los valores estimados y obtenidos para las respuestas en el punto óptimo.....	97

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 4.1. Diagrama de flujo para la obtención de manzana osmotizada.....	57
Gráfico N° 4.2. Procedimiento experimental de la deshidratación osmótica.....	62
Gráfico N° 4.3. Procedimiento para la obtención de datos experimentales.....	66
Gráfico N° 4.4. Esquema experimental para optimizar la deshidratación osmótica de manzana aplicando el método de superficie de respuesta.....	68

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N°1. Baño Maria utilizado en la deshidratación osmótica.....	113
Anexo N°2. Matriz de consistencia.....	114

RESUMEN

Se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta para determinar las condiciones óptimas de procesamiento que producen la máxima pérdida de agua y ganancia de sólidos mínimo durante la deshidratación osmótica de manzana. Temperatura de (30-40°C), concentraciones de glucosa (40-60%w/w) y tiempo de procesamiento (60-180 min) fueron los factores investigados con respecto a la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG). Los experimentos fueron diseñados de acuerdo al Diseño Compuesto Central con estos tres factores a cinco niveles diferentes para cada uno, incluyendo los puntos centrales y axiales.

Los experimentos se realizaron en un agitador (Thermoshake-Cimatec) con agitación constante de 150 spm y la proporción solución/muestra de 5/1(w/w). Con respecto a la pérdida de agua y ganancia de sólidos, ambos efectos lineal y cuadrático de las tres variables resultaron ser significativos. Para cada respuesta se desarrollaron modelos polinomiales de segundo orden mediante un análisis de regresión lineal múltiple. Se realizó el Análisis de Varianza (ANOVA) para comprobar la idoneidad y exactitud de los modelos fijados. Se construyeron las superficies de respuesta y mapas de contorno que muestra la interacción de las variables de proceso.

Aplicando el método de función de deseabilidad, se encontraron las condiciones óptimas de operación para la temperatura de 37,1°C, concentración de glucosa de 59% y tiempo de tratamiento de 217,3 min. En este punto óptimo, la pérdida de agua y ganancia de sólidos se encontró que eran de 27,32 (g/100g de muestra inicial) y 1,75 (g/100g de muestra inicial) respectivamente.

Palabras clave: Deshidratación osmótica; Manzana; Optimización; Metodología de superficie de respuesta;

ABSTRACT

Response surface methodology was used to determine the optimum processing conditions that yield maximum water loss and minimum solid gain during osmotic dehydration of apples. Temperature (30-40°C), glucose concentration (40-60% w/w) and processing time (60-180min), were the factors investigated with respect to water loss (WL) and solid gain (SG). Experiments were designed according to Central Composite Design with these three factors each at five different levels, including central and axial points. Experiments were conducted in a shaker (Thermoshake-Cimatec) with constant agitation of 150 spm and solution to sample ratio of 5/1 (w/w). With respect to water loss, solid gain, both linear and quadratic effects of three variables were found to be significant. For each response, second order polynomial models were developed using multiple linear regression analysis. Analysis of variance (ANOVA) was performed to check the adequacy and accuracy of the fitted models. The response surfaces and contour maps showing the interaction of process variables were constructed. Applying desirability function method, optimum operating conditions were found to be temperature of 37, 1 °C, glucose concentration of 59 %, and treatment time of 217, 3 min. At this optimum point, water loss and solid gain, were found to be 27, 32 (g/100g initial sample) y 1, 75 (g/100g initial sample), respectively.

Keywords: Osmotic dehydration; Apple; Optimization; Response surface methodology.

I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1 Identificación del problema

En la actualidad es todavía difícil establecer reglas generales sobre las variables que afectan a la deshidratación osmótica. La pérdida de agua y ganancia de soluto depende tanto de las condiciones de operación y el tipo de tejido celular, así como en que forma el producto fue pre tratado, también depende tanto de la concentración del soluto y su peso molecular.

Por otro lado la velocidad de transferencia de masa aumenta con la superficie específica del producto y la temperatura. Por lo tanto, hay una necesidad de identificar las condiciones óptimas de operación que aumentan las tasas de transferencia de masa sin afectar de manera significativa la calidad.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son los parámetros óptimos de temperatura, tiempo de proceso y concentración de glucosa que debería tener el proceso de deshidratación osmótica de cilindros de manzana?

1.2.2 Problemas específicos

1. ¿Cómo influye la temperatura, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa en la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de los cilindros de manzana delicia?
2. ¿Cuál es el diseño experimental y el modelo de ajuste a utilizar para los datos obtenidos?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Encontrar las condiciones óptimas de temperatura, tiempo de proceso y concentración de glucosa de la deshidratación osmótica de cilindros de manzana (*Malus domestica* B.).

1.3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar los efectos de la temperatura, el tiempo de procesamiento y la concentración de la glucosa en los fenómenos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de cilindros de manzana delicia.

2. Encontrar el diseño experimental y el modelo de ajuste que se utilizará para los datos obtenidos.

1.4 Justificación

El uso de la deshidratación osmótica en la industria alimenticia como pre tratamiento mejora la calidad del producto en términos de color, sabor y textura con un mínimo de requerimiento energético ya que se realiza a bajas temperaturas.

Acontecimientos importantes en el proceso de deshidratación osmótica revela la importancia de la utilización de esta técnica de pre procesamiento eficaz, como una operación unitaria en la industria de procesamiento de alimentos. Sin embargo, todavía hay algunos problemas asociados a la implementación de la deshidratación osmótica a escala industrial, es decir, la optimización del proceso, el diseño de equipos de proceso continuo y gestión de la solución con el fin de hacer el proceso más atractivo en términos económicos.

A pesar de los numerosos estudios que se han llevado a cabo sobre este tema, todavía es difícil establecer reglas generales sobre las variables que afectan a la deshidratación osmótica. La pérdida de agua y ganancia de sólidos dependen tanto de las condiciones de operación y el tipo de tejido celular, así como en la forma en que el producto fue pre tratada. Por un lado, la velocidad de transferencia de masa

aumenta con la superficie específica del producto y el aumento de la temperatura. Por otra parte, la relación de la pérdida de agua y la ganancia de sólidos depende tanto de la concentración de soluto y su peso molecular.

Por lo tanto, hay una necesidad de identificar las condiciones óptimas de operación que aumentan las tasas de transferencia de masa sin afectar de manera significativa la calidad.

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).

1.5 Importancia

La optimización es un método que permite encontrar los valores óptimos de las variables significativas de un proceso. Estos valores óptimos, aseguran un proceso en las mejores condiciones de operación y la obtención de un producto con las características deseadas. La metodología de superficie de respuesta, es un diseño estadístico que facilita la amplitud de la investigación y a la vez reduce el número de corridas experimentales. La deshidratación osmótica es un pre tratamiento que ayuda en la deshidratación por aire caliente, reduciendo el tiempo de secado y en la mejora de la calidad del producto final. La manzana delicia es una de las frutas con mayor

porcentaje de parte comestible y con un alto contenido de agua. Por lo expuesto antes es de gran importancia el estudio de optimización de la deshidratación osmótica por la metodología de superficie de respuesta de manzana delicia, porque, permite encontrar estadísticamente las condiciones óptimas para el deshidratado osmótico de la manzana, haciendo mucho más eficaz, eficiente y mejor gestión de los recursos utilizados. Además éste es una herramienta muy útil y aplicable para otros tipos de procesos.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

Corzo *et al.*, 2003, estudiaron las superficies de respuesta de la pérdida de agua, ganancia de soluto y pérdida de peso que ocurren durante la deshidratación osmótica de melón (*Cucumis melo*, variedad Edisto) cortado en forma cilíndrica. Para ello, se utilizó un diseño experimental compuesto central rotatable de tres factores (concentración, temperatura y tiempo) con tres niveles, dos puntos estrella y seis repeticiones del punto central. Los modelos ajustados por regresión lineal múltiple explicaban la variabilidad de las variables respuesta entre un 80,7 - 98,54 % con un nivel de confianza del 95%.

El mecanismo de la deshidratación osmótica de las rodajas de manzana en diferentes concentraciones de sacarosa, dextrosa y sacarosa + soluciones mixtas de dextrosa, y también en diferentes temperaturas fueron investigados por Kaymak-Ertekin *et al.*, 2000. Se reconoció que, a medida que se aumentaron la concentración y la temperatura también aumenta la pérdida de agua a un nivel considerable. Se observó que, en la solución mixta sacarosa + dextrosa tiene la misma concentración de materia seca total, tanto la pérdida de agua y ganancia de sólidos aumentó cuando la dextrosa aumentó en la mezcla. La influencia de la concentración de la solución osmótica y la relación entre la solución osmótica y el de peso de la fruta en la

deshidratación osmótica de melones en condiciones de vacío fueron estudiados por Teles *et al.*, 2006. Encontraron un modelo para el proceso de deshidratación osmótica considerando la difusión de masa entre la fruta y la solución osmótica (agua y sacarosa) y la pérdida de agua por evaporación, además los parámetros que permiten simular el proceso de secado, para optimizar el sistema con el fin de reducir el tiempo de procesamiento total. Los resultados muestran la ventaja de utilizar altas concentraciones de sacarosa de la solución osmótica, y el uso del tratamiento osmótico para reducir el tiempo total de procesamiento de secado de frutas, la calidad del producto (cantidad de azúcares en el melón) juegan un papel importante durante la optimización del proceso y deben hacerse para asegurar el contenido de azúcar deseada en el fruto.

La deshidratación osmótica de cubitos de pimientos verdes se ha optimizado con respecto a la temperatura, el tiempo, concentraciones de sal y sorbitol a través de la metodología de superficie de respuesta. La pérdida de agua (WL), la ganancia de sólidos (SG), la absorción de sal (SA) y la absorción de sorbitol (SO) fueron las respuestas en un diseño central compuesto 2⁴. Los resultados sugieren que las condiciones óptimas de procesamiento de 5,5 g sal/100 g y 6g sorbitol/100 g a 30 °C después de 240 min resultaría en WL=23,3%, SG=4,1%, SA=8g/100g pimiento seco y SO= 2,4 g/100 ml de extracto (Ozdemir *et al.*, 2008).

Eren *et al.*, 2007, utilizaron la metodología de superficie de respuesta para determinar las condiciones óptimas de procesamiento que producen pérdida de agua

máxima, reducción de peso, ganancia de sólidos mínimo y la actividad de agua durante la deshidratación osmótica de papa. Consideraron como variables temperatura de (20-60 °C), tiempo de procesamiento de (0,5-8 h), sacarosa de (40-60% w/w) y la sal de (0-15% w/w), fueron los factores investigados con respecto a la pérdida de agua (WL), ganancia de sólidos (SG), la reducción de peso (WR) y la actividad del agua (aw). La aplicación del método de función de conveniencia, se encontró las condiciones óptimas de operación a una temperatura de 22 °C, la concentración de sacarosa de 54,5%, la concentración de sal de 14% y el tiempo de tratamiento de 329 min. En este punto óptimo, la pérdida de agua, ganancia de sólidos, la reducción de peso y la actividad de agua se encontró que eran 59,1 (g/100 g de muestra inicial), 6,0 (g/100g de muestra inicial), 52,9 (g/100g de muestra inicial) y 0,785, respectivamente.

2.2 Generalidades sobre la manzana

2.2.1 Morfología y estructura

El manzano es uno de los cultivos más extendido por todo el planeta gracias a su fácil adaptación a distintas características edafoclimáticas. Sin embargo, la zona donde más se cultiva es en el Hemisferio Norte con un 92%, mientras que en el Hemisferio Sur solo se alcanza un 8%. La manzana es una fruta que crece más ampliamente en nuestra costa peruana y Norteamérica, es de la familia de la Rosa (*Rosaceae*), de la

subfamilia *Pomoidea*, y del genero *Malus*. La gran cantidad de manzanas comerciales son especies procedente de *M. Sylvestris* de Europa y del sudoeste de Asia o de *M. Pumila*, o quizá híbridos de esta dos especies. No obstante, las variedades cultivadas para la comercialización pertenecen a la especie *Malus x domestica* Borkh. (Domínguez, 2008).

Aunque el origen todavía genera controversia, se considera como una especie obtenida mediante aportaciones de otras especies del género *Malus*. No obstante, los investigadores no se ponen de acuerdo ya que mientras que algunos autores piensan que su principal progenitor es *Malus Sieversii* cuyo lugar de procedencia es la república de Kazajstán, otros autores sostienen que todas las variedades cultivadas proceden de *M. sylvestris*, Mill., *M. dasyphyllus*, Borkh (sinónimo de *P. M. paradisiaca*, L. y *m. Pumila*, Mil.) y de *M. praecox*, Borkh (Domínguez, 2008).

Para conseguir un calibre adecuado en el fruto, lo importante es el grado de división celular que ocurre durante las primeras semanas, tras el cuajado. La intensidad de esta división depende del número de manzanas existentes en el árbol, de ahí la importancia de la poda para eliminar las yemas de flor. Además de esto, es necesaria una correcta iluminación para tener una adecuada función fotosintética y así obtener frutos de buen tamaño. La fruta es de tamaño mediano a grande; cascara delgada, dura, roja brillante sobre amarillo, con áreas de luz y oscuridad, rayado rojo a solidos rojo. La coloración exacta depende del caso particular. La pulpa es blanca, finamente

graneada, dulce, crujiente, jugosa, moderadamente baja en ácido y medianamente aromática. Generalmente no se usa para cocción (Domínguez, 2008). Es la fruta por excelencia, ya que es bien tolerada por la mayoría de personas y combina sin problemas con cualquier otro alimento. Hoy se sabe con certeza de la existencia y la función de algunos de los componentes de esta fruta que le confieren su carácter antioxidante y la doble particularidad de actuar como alimento astringente o laxante según cómo sea consumida. Sin embargo, los consumidores no ven normalmente reflejadas en las etiquetas las características dietéticas de las frutas ni el interés de la textura de éstas en la protección dental.

FIGURA N° 2.1

APARIENCIA DE LA MANZANA VARIEDAD DELICIA



Fuente: Propia

La figura N° 2.1 esquematiza la apariencia de esta variedad de manzana.

2.2.2 Composición química

La manzana es una parte importante en la dieta humana, ya que son fuente de monosacáridos, minerales, fibras dietéticas y diversos compuestos biológicamente activos, como la vitamina C y ciertos compuestos fenólicos que se sabe que actúan como antioxidantes naturales (Wu et al, 2007), ocupando el segundo nivel más alto de actividad antioxidante y concentración total de compuestos fenólicos y mayor porción de fenólicos libres comparado con otras frutas (Boyer *et al.*, 2004). La concentración de estos compuestos fenólicos que dependen en gran medida de la variedad de las manzanas y su estado de madurez, está estrechamente relacionado con las cualidades nutricionales y sensoriales de los frutos. A bajas concentraciones puede proteger a las manzanas de deterioro de oxidación. A altas concentraciones de compuestos fenólicos y sus productos de oxidación puede causar decoloración de los productos frutícolas y la formación de neblina en los jugos, como resultados de las interacción de las proantocianidinas (taninos condensados) con las proteínas, carbohidratos y minerales (Wu *et al.*, 2007). En el cuadro N° 2.1 se presentan las cantidades mínimas y máximas de algunos de sus constituyentes.

Los contenidos de flavonoides y su composición química mostrados en el cuadro N° 2.2, varían de acuerdo a la variedad de las manzanas. La vitamina C en las manzanas representa menos de 0,4 por ciento de la actividad antioxidante total (Boyer *et al.*, 2004).

CUADRO N° 2.1

COMPOSICIÓN POR 100 GRAMOS DE PORCIÓN COMESTIBLE EN
MANZANAS DE LA VARIEDAD *SMOOTHEE GOLDEN DELICIOUS*

	Composición por 100 gramos de porción
Vitamina A (µg)	2,0
Vitamina C (µg)	1,3
Calcio (mg)	5
Hierro (mg)	1,4
Magnesio (mg)	5.6
Zinc (mg)	0,05
Fosforo (mg)	11
Calorías (Kcal)	54
Proteína	0,3
Fibra cruda (g)	0,8
Grasa (g)	0,1
Carbohidratos totales (g)	
Agua (g)	84,7

Fuente: Tablas Peruanas de Composición de Alimentos, 2009

2.2.3 Cambios morfológicos durante la maduración

La mayoría de los frutos se ablandan durante la maduración y esto es un atributo principal en la calidad que a menudo determina el periodo de conservación. El ablandamiento de los frutos puede derivar de tres mecanismos: pérdida de turgor; degradación del almidón y ruptura de las paredes celulares del fruto, la pérdida de turgor es en gran parte un proceso no fisiológico asociado con la deshidratación durante la post recolección del fruto, y como tal puede tomar importancia comercial durante el almacenamiento. La pérdida de agua equivalente al 5-10% del peso en fresco de la fruta puede ser causa de una inaceptación comercial.

CUADRO N° 2.2

CONTENIDO DE AZUCARES, ACIDOS Y SOLIDOS SOLUBLES TOTALES DE OCHO CULTIVARES DE LA FRUTA DE MANZANA

Cultivar	Constituyentes					
	Tiempo de madurez	TSS(%)	Azúcares totales (g/l)	Total de ácidos (g/l)	pH	Azúcar/ácido
Delicious	Julio	10,48 ± 0,46	83,7 ± 0,8	2,8 ± 0,1	4,15 ± 0,07	32,17 ± 7,59
Golden Delicious	Agosto	13,40 ± 1,55	113,8 ± 1,4	3,8 ± 0,1	3,79 ± 0,12	33,78 ± 6,59
Ralls	Octubre	14,68 ± 1,49	122,3 ± 1,3	5,7 ± 0,1	3,59 ± 0,09	24,12 ± 6,70
Fuji	Setiembre	13,84 ± 1,21	125,0 ± 1,7	3,2 ± 0,1	3,91 ± 0,07	41,67 ± 9,35
QinGuan	Setiembre	13,62 ± 0,68	123,4 ± 1,0	3,0 ± 0,1	4,16 ± 0,13	42,67 ± 9,35
Granny Smith	Octubre	12,03 ± 0,75	97,0 ± 1,2	7,3 ± 0,1	3,40 ± 0,07	12,84 ± 7,15
Jonagold	Octubre	12,28 ± 0,55	105,5 ± 1,0	3,9 ± 0,1	3,82 ± 0,16	31,20 ± 6,75
Orin	Octubre	13,81 ± 0,38	104,7 ± 1,6	3,0 ± 0,1	4,12 ± 0,17	36,15 ± 7,30
Promedio		13,02 ± 0,88	109,4 ± 1,3	4,1 ± 0,1	3,87 ± 0,11	31,83 ± 7,25

Fuente: Wu *et al*, (2007).

La degradación del almidón resulta en un cambio pronunciado de la textura, especialmente en frutos como el plátano, donde el almidón se encuentra en un alto porcentaje del peso fresco. Sin embargo, en general se piensa que el cambio en la textura durante la maduración de la mayoría de los frutos es en gran parte resultado de la degradación de la pared celular. Los cambios en la estructura de la pared celular durante la maduración han sido observados por microscopía electrónica en muchos frutos. Estos cambios normalmente consisten en una disolución aparente de la región de la lámina media rica en pectina de la pared celular. A nivel bioquímico, los

cambios más grandes pueden observarse en los polímeros de pectina de la pared. Durante la maduración hay una pérdida de azúcares neutros, en la mayoría de los frutos predominantemente es la galactosa, pero también hay pérdida de arabinosa. Estos dos azúcares son los componentes principales de la pectina en la pared celular (Xue Keqing, 2004).

2.2.4 Producción y comercio

En el Perú la producción de manzana ocupa una superficie de cultivo permanente y en estos últimos 10 años se ha visto incrementando, según el Ministerio de Agricultura – oficina de estudios económicos y estadísticos, en el 2009 llega a ocupar una superficie de 10,8 miles de hectáreas, alcanzando el 0,5 del valor bruto de la producción agrícola en el país. La mayoría de la producción total de manzanas es para consumo directo y para el mercado interno, por lo que SA-EMMSA-mmⁿ2-frutas indica que es la tercera fruta de mayor comercialización con un 13 por ciento del total de frutas comercializadas después de la naranja y plátano, con una producción de 90,000 toneladas anuales y con un precio promedio de 1,5 soles por kilo.

2.3 Deshidratación de alimentos

2.3.1 Consideración general

La deshidratación o secado de alimentos es una de las operaciones unitarias más utilizadas en la conservación de los mismos. En los procesos de deshidratación el agua del alimento es eliminada, en mayor o menor grado, y se consigue con ello una mejor conservación microbiológica, además de retardar muchas reacciones indeseables, con la deshidratación también se logra disminuir los costos de envasado, manejo, almacenado y transporte ya que se disminuye el peso del alimento, y en algunos casos el volumen (Ibarz, 2005).

La conservación de frutas y hortalizas mediante su deshidratación supone un importante desafío, pues debido a la estructura de estos productos la eliminación del agua debe hacerse de modo que el perjuicio sobre su calidad sea mínimo. Esto exige que el producto seco pueda rehidratarse hasta un producto prácticamente de la misma calidad que el original. Para obtener estos resultados con frutas y verduras deshidratadas los procesos de transferencia de materia y de calor deben ser optimizados (Singh, 2009).

2.3.2 Deshidratación osmótica

La concentración de alimentos mediante la inmersión de los mismos en una solución hipertónica se conoce como deshidratación osmótica. La osmosis consiste en el

movimiento molecular de ciertos componentes de una solución a través de membranas semipermeables, hacia otra solución de menor concentración (Ibarz, 2005).

Barbosa-Cánovas y Vega, 1996, menciona que las pérdidas de agua por parte del alimento en el proceso de secado osmótico, se puede dividir en dos períodos: 1) un período de alrededor de dos horas, con una velocidad decreciente de eliminación de agua y 2) un período, de dos a seis horas, con una velocidad decreciente de eliminación agua. La temperatura y concentración de la solución osmótica afectan la velocidad de pérdida de agua del producto. Comparada con el secado por aire o con la liofilización, la deshidratación osmótica es más rápida, ya que la eliminación de agua ocurre sin cambio de fase.

La diferencia de potencial químico a través de la membrana semipermeable entre el producto y la solución osmótica, es la fuerza impulsora para la transferencia de materia, el potencial químico μ_i está relacionado con la actividad de agua según la expresión:

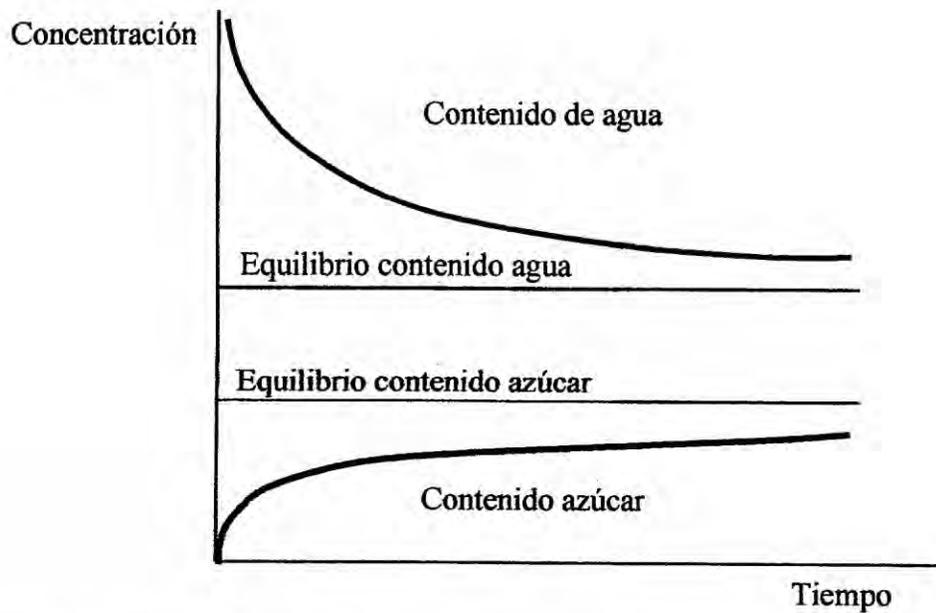
$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_w \quad (1)$$

Donde μ_i^0 es el potencial químico de referencia, R la constante de gases y T la temperatura absoluta. La transferencia de materia se realiza hasta que las actividades de agua de la solución osmótica y del alimento se igualan. El mecanismo mayoritario

por el que se realiza la transferencia de materia es la difusión debida al gradiente de concentración existente entre el alimento y la solución osmótica.

En el alimento, el contenido de agua y de solutos es función del tiempo; así, en la figura No 2.2 se muestra esta variación para la deshidratación de fruta en la que se observa una disminución de agua y un aumento de los azúcares con el tiempo.

FIGURA N° 2.2
CONTENIDO DE AGUA Y AZUCAR DURANTE LA DESHIDRATACIÓN
OSMOTICA



Fuente: Adaptado de Barbosa-Cánovas y Vega, 1996.

El proceso de deshidratación osmótica se caracteriza por una etapa transiente antes de alcanzar el equilibrio. Durante el período dinámico la velocidad de transferencia de masa disminuye hasta llegar al equilibrio. Cuando éste se alcanza la velocidad de transporte neta de masa es nula y es el final del proceso osmótico. La remoción del agua se realiza por dos mecanismos: flujo capilar y difusivo, mientras que el transporte de solutos ya sea de consumo o de lixiviación se realiza sólo por difusión (Rocca, 2010). Xue Keqing, 2004, menciona las ventajas e inconvenientes de la DO sobre los métodos tradicionales son las siguientes:

Ventajas:

- Comparada con el secado por aire o con la liofilización, la deshidratación osmótica es más rápida, ya que la eliminación de agua ocurre sin cambio de fase.
- La estructura de los alimentos se conserva mejor.
- El daño en el color y sabor en los alimentos se ve minimizado debido a que la DO se puede realizar a bajas temperaturas.
- La alta concentración de solutos alcanza en la parte externa de la pieza contribuye a prevenir el oscurecimiento en muchos productos, evitando así el uso de aditivo químico como los sulfitos.
- Un pre tratamiento de deshidratación osmótica anterior a una operación de secado hace posible la reducción del tiempo del mismo y como consecuencia una reducción en los costos de producción.

Inconvenientes:

- Después del secado puede formarse una capa de azúcar que no favorezca la textura de los mismos.
- La oxidación de productos puede aparecer en pocas semanas como consecuencia de la alta retención de aceites esenciales, deteriorando el sabor del producto.

2.3.3 Factores que influyen en la deshidratación osmótica

La transferencia de masa durante la deshidratación osmótica ocurre a través de las membranas y paredes celulares. El estado de las membranas celulares puede variar de parcialmente a totalmente permeable. Este fenómeno puede llevar a cambios significativos en la arquitectura de los tejidos. Durante la remoción osmótica de agua de los alimentos, el frente de deshidratación se mueve desde la superficie que está en contacto con la solución hacia el centro. El esfuerzo osmótico asociado puede resultar en la desintegración celular. La causa más probable del daño celular puede atribuirse a la reducción de tamaño causada por la pérdida de agua durante la deshidratación osmótica, resultando en la pérdida de contacto entre la membrana celular externa y la pared celular (Rastogi *et al.*, 2002).

El transporte de masa en la deshidratación osmótica depende de varios factores:

a) Efecto del agente osmótico

La elección del soluto de la solución osmótica, se debe tener presente tres factores muy importantes: 1) las características sensoriales del producto; 2) el costo del soluto, y 3) la masa molecular del mismo.

El proceso osmótico también depende de las propiedades fisicoquímicas de los solutos empleados: pesos moleculares, estado iónico y solubilidad del soluto en el agua. Esta última es muy importante pues define la máxima concentración del soluto que puede emplearse en la solución. Cuando se utilizan soluciones con solutos de mayor peso molecular, la pérdida de agua se incrementa y la ganancia de solutos resulta despreciable respecto de cuando se usa un soluto de menor peso molecular. Por consiguiente en el proceso osmótico, la pérdida de agua se favorece con el empleo de solutos de peso molecular alto y la impregnación es superior con solutos de bajo peso molecular. La combinación de dos o más solutos en la solución puede hacer más eficiente la deshidratación al proporcionar cada uno de ellos la ventaja que los caracteriza. Cuando se usan dos solutos como sacarosa y sal se forma una barrera de sacarosa en la superficie que evita la penetración de la sal, cuya presencia en la solución mantiene una baja actividad de agua y en consecuencia produce una continua pérdida de agua y una ganancia de solutos baja. Esta combinación resulta ser más eficiente que si se usa la sal o la sacarosa solas; de esta manera la deshidratación es mayor y la penetración de solutos es menor (Rocca, 2010).

El uso de los diferentes solutos en soluciones acuosas o multicomponentes tiene impacto en la cinética, el grado de pérdida de agua y el fenómeno relacionado como niveles de impregnación, además juega un rol importante como componentes protectores como el azúcar (Ferrando *et al.*, 2001).

El uso de solutos de alto peso molecular favorece la pérdida de agua a expensas de la ganancia de sólidos. Vale la pena señalar que estas variables sólo se pueden manipular en un intervalo limitado, fuera de los cuales afectan negativamente a la calidad a pesar de que las tasas de transferencia de masa pueden ser mejores (Eren *et al.*, 2007).

Los más comúnmente usados son la sacarosa para frutas y el cloruro de sodio para vegetales, pescados y carnes; si bien también distintas mezclas de solutos han sido probados, se pueden observar en el cuadro n° 2.3. Otros agentes osmóticos pueden ser usados como: glucosa, fructosa, dextrosa, lactosa, maltosa, polisacáridos, maltodextrina, jarabes de almidón de maíz y sus mezclas. La elección dependerá de varios factores tales como costo del soluto, compatibilidades organolépticas con el producto terminado y preservación adicional otorgada por el soluto al producto final y de la influencia del soluto sobre las características organolépticas del producto tratado (Rocca, 2010).

CUADRO N° 2.3

USOS Y VENTAJAS DE ALGUNOS SOLUTOS OSMÓTICOS

Nombre	Usos	Ventajas
Cloruro sódico	Carnes y verduras Soluciones superior 10%	Alta capacidad de depresión de a_w
Sacarosa	Frutas	Reduce pardeamientos y aumenta retención de volátiles
Lactosa	Frutas	Sustitución parcial de la sacarosa
Glicerol	Frutas y verduras	Mejora la textura
Combinación	Frutas, verduras y carnes	Características sensoriales ajustadas, combina la alta capacidad de depresión de a_w de las sales con alta capacidad de eliminación de agua del azúcar

Fuente: Barbosa-Cánovas y Vega, 1996

b) Efecto de la concentración de la solución osmótica

La pérdida de agua y la velocidad de secado aumentan con el incremento de la concentración de la solución osmótica, ya que la actividad de agua de la solución decrece con un aumento en la concentración de solutos. Con el incremento en la concentración de la solución se forma una capa de soluto sobre la superficie del producto que actúa como barrera reduciendo la pérdida de nutrientes y a muy altas concentraciones, pueden dificultar también la pérdida de agua. Cuando se utilizan mezclas de sacarosa y sal la fuerza impulsora para la transferencia de masa aumenta al bajar la actividad de agua de la solución. Además, como se mencionó anteriormente, se forma una capa de sacarosa sobre la superficie del producto que

impide la penetración de sal en el producto y permite mejorar la pérdida de agua sin afectar tanto el sabor (Rocca, 2010).

c) Efecto de la temperatura de la solución osmótica

Singh, 2009, menciona que la temperatura es una de las variables que más afecta el proceso de deshidratación osmótica, ya que un aumento de la misma intensifica la eliminación de agua y la penetración de la sustancia osmótica en el tejido. La ganancia de solutos es menos afectada que la pérdida de agua por la temperatura ya que a altas temperaturas el soluto no puede difundir tan fácilmente como el agua a través de la membrana celular de los tejidos del producto.

La temperatura presenta dos efectos. Uno de ellos es que el aumento de temperatura favorece la agitación molecular y por consiguiente mejora la velocidad de difusión. El otro es la modificación de la permeabilidad de la membrana celular con un incremento de la temperatura. La temperatura crítica a la cual se produce la variación en la permeabilidad de la membrana depende de las distintas especies, pero se estima que para frutihortícolas ronda en el rango de (50°C-55°C), aproximadamente (Rocca, 2010).

Un aumento en la temperatura acelera la remoción de agua y la penetración de la sustancia osmótica al interior del tejido, aunque la cinética está influenciada por el

tipo de sustancia utilizada. La deshidratación se realiza a baja temperaturas en productos donde se desea mayor eliminación de agua y poca penetración del soluto (Colina, 2010). La difusividad másica (D_m) depende de la temperatura y esto se aprecia en la ecuación 2.

$$D_{ef} = D_m \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

Donde:

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

D_m = Difusividad másica de referencia (m^2/s).

E_a = Energía de activación (J/mol).

R = Constante general de los gases = 8,314 J/mol K.

T = Temperatura absoluta ($^{\circ}K$).

d) Efecto de pH de la solución

La acidez de la solución aumenta la pérdida de agua debido a que se producen cambios en las propiedades tisulares y consecuentemente cambios en la textura de las frutas y vegetales que facilitan la eliminación de agua (Rocca, 2010).

e) Efecto de la agitación de la solución osmótica

La deshidratación osmótica puede mejorarse mediante la agitación. La misma disminuye la resistencia a la transferencia de masa en la superficie del producto,

además de uniformizar la temperatura y la concentración de solutos en la solución, a bajas concentraciones el efecto con agitación y sin agitación es pequeño, mientras que cuando se incrementa aumenta la viscosidad y la resistencia a la transferencia de masa. En este caso el efecto de la agitación es importante debido a que se ve una diferencia entre el proceso con agitación y sin agitación. Sin embargo existen casos en que puede dañarse el producto y debe evitarse. Es por ello que se prefiere el uso de los agitadores orbitales (que oscilan sobre rulemanes) que los agitadores mecánicos de paletas (Rocca, 2010).

f) Efecto de la geometría y tamaño del producto

La geometría del producto es muy importante ya que variará la superficie por unidad de volumen expuesta a la difusión. Asimismo, el tamaño influye en la velocidad de deshidratación y en la absorción de solutos puesto que la superficie por unidad de volumen se modifica para los diferentes tamaños. En el caso de cubos o esferas al aumentar el lado o el radio, respectivamente, la superficie por unidad de volumen disminuye y entonces, la pérdida de agua resulta inferior para tamaños superiores. Se encontraron que al aumentar la superficie por unidad de volumen, la pérdida de agua aumenta hasta un máximo y luego decrece para los diferentes tamaños mientras que los sólidos ganados aumentan. La disminución en la pérdida de agua se atribuye a la formación de una capa superficial de solutos sobre el producto que impide la difusión

de agua hacia la solución, en el caso de soluciones muy concentradas de soluto (Rocca, 2010).

g) Efecto de la relación masa de solución a masa del producto

La pérdida de agua y la ganancia de solutos aumentan con un incremento de la relación masa de solución a masa de producto empleada en la experiencia. La concentración constante de la solución es un requisito previo para la determinación del coeficiente de difusión de la solución aplicando la ley de Fick de la difusión en estado no estacionario (Rastogi *et al.*, 2002).

h) Efecto de las propiedades físico-químicas del alimento

La composición química (proteínas, carbohidratos, grasas, contenido de sal, etc.), la estructura física (porosidad, arreglo de células, orientación de fibras y tipo de piel) y el manejo previo del alimento como tratamientos como congelación y escaldado pueden afectar la cinética de deshidratación osmótica debido a que modifican las características originales del producto a deshidratar (Colina, 2010).

La variabilidad en los resultados obtenidos en el proceso de deshidratación osmótica entre los diferentes productos depende de la compacidad de los tejidos, contenido inicial de sólidos solubles e insolubles, espacios intercelulares, presencia de gas en el interior de los tejidos, relación entre fracciones de diferentes pectinas (pectinas

solubles en agua y protopectinas) y niveles de gelificación de pectinas. Generalmente cuando el producto a deshidratar es muy poroso conviene someterlo a deshidratación osmótica en vacío para facilitar la salida de aire de su interior (Rocca, 2010).

i) Efecto de la presión de operación

La presión de funcionamiento es un factor importante para la transferencia de masa entre la solución osmótica y el fruto (Teles *et al.*, 2006). La transferencia de agua total en la deshidratación osmótica depende como se mencionó precedentemente de una combinación de dos mecanismos: la difusión y el flujo por capilaridad. Los tratamientos al vacío aumentan el flujo capilar, incrementando la transferencia de agua pero no influyen en la ganancia de solutos. El flujo capilar de agua depende de la porosidad y de la fracción de espacios huecos del producto (Rocca, 2010).

j) Efecto del tiempo de inmersión del producto en la solución

El tiempo de inmersión (hasta que alcance el equilibrio) es una variable importante para definir la cantidad de agua removida y/o la cantidad de sólidos ganados. El tiempo requerido para obtener un nivel de concentración de sólidos específicos en el alimento durante la deshidratación osmótica varía mucho, depende de los factores antes mencionados y pueden ir de 1 a 18 horas (Colina, 2010).

2.3.4 Bases termodinámicas y cinéticas de deshidratación osmótica (DO)

En la deshidratación osmótica se presentan varios fenómenos físicos simultáneos, en mayor o menor proporción: osmosis, difusión y capilaridad. La entrada capilar adquiere gran importancia cuando en el sistema se dan cambios de presión o temperatura debido a la actuación del mecanismo hidrodinámico (Xue Keqing, 2004).

a. Fenómeno osmótico

El fenómeno osmótico se produce durante la transferencia de agua a través de la membrana celular semipermeable de la fruta hacia la solución osmótica en tres situaciones.

- Transferencia célula-célula (intercelular).
- Transferencia célula-espacio intercelular.
- Transferencia célula-disolución (superficial).

La transferencia de solutos por este mecanismo está limitada por la permeabilidad selectiva de las membranas celulares.

La fuerza impulsora responsable del fenómeno osmótico, que provoca la transferencia de agua, viene dada por la diferencia de potencial químico del agua en las células y en la disolución osmótica. El potencial químico (μ) está a su vez relacionado con la a_w y con la presión osmótica (π) de cada una de las fases líquidas.

$$\mu_w = \mu_w^0 + RT \ln a_w \quad (3)$$

$$\pi = \frac{-RT \ln a_w}{\bar{V}^0} \quad (4)$$

Donde:

μ_w^0 = potencial químico del estado de referencia

R = constante de los gases

T = temperatura

\bar{V}^0 = volumen del agua pura

b. Fenómeno difusional

La difusión de agua y los solutos en el producto durante la DO ocurren dentro de cada una de las fases líquidas y en los espacios intercelulares, a través del líquido presente en los mismos.

La fuerza impulsora para la difusión de los diferentes componentes en el sistema son las diferencias de potencial químico de los mismos en los diferentes puntos del sistema. Cuando estas diferencias desaparecen, el sistema alcanza el equilibrio y no hay transferencia de materia. El agua es el componente que difunde mayoritariamente durante los procesos de DO, debido a su pequeño tamaño molecular y a la alta permeabilidad que presentan las membranas celulares a este componente. Las condiciones de equilibrio para el agua serán:

$$\mu_{w,SO} = \mu_{w,FPL} \quad (5)$$

Donde:

$\mu_{w,SO}$ = potencial químico del agua en la disolución osmótica.

$\mu_{w,FPL}$ = potencial químico del agua en la fracción líquida del producto.

La ecuación 6 expresa las siguientes contribuciones al valor del potencial químico del agua en frutas:

$$\mu_w - \mu_w^0 = RT \ln a_w + \bar{v}_w^0 \Delta P + \Delta \phi \quad (6)$$

El primer término ($RT \ln a_w$) está asociado con el valor de la a_w y contribuye en gran medida a las diferencias de potencial químico en el sistema alimento disolución osmótica externa. El segundo término ($\bar{v}_w^0 \Delta P$) no influye si no hay gradiente de presión en el sistema. Esto se cumple una vez que las células han perdido su turgencia, lo cual ocurre en las primeras etapas del proceso. El tercer término ($\Delta \phi$) corresponde al llamado potencial mátrico (asociado a las interacciones agua-matriz estructural de la fruta). Este término es despreciable para contenidos de humedad altos, como los obtenidos en DO de este modo. Durante la mayor parte del tiempo del proceso de DO la relación de equilibrio para el agua puede ser simplificada a la ecuación 7:

$$a_{w,SO} = a_{w,FPL} \quad (7)$$

Donde:

$a_{w,SO}$ = actividad del agua de la disolución osmótica.

$a_{w,FPL}$ = actividad del agua de la fracción líquida del producto.

Si la fruta y en la disolución osmótica los solutos mayoritarios son los mismos, la ecuación se simplifica a:

$$X_{w,SO} = X_{w,FPL} \quad (8)$$

Donde:

$X_{w,SO}$ = fracción másica de agua en la disolución osmótica.

$X_{w,FPL}$ = fracción másica de agua en la fracción líquida del producto.

Esta es la base de la definición habitual de la fuerza impulsora reducida (Y) para la transferencia de un componente "i" en el sistema, en términos de las diferencias de sus fracciones másicas.

$$Y = \frac{X_{it} - X_{ie}}{X_{it} - X_{ie}} \quad (9)$$

Donde:

X_{it} = fracción másica de i a un tiempo t.

X_{ie} = fracción másica de i en el equilibrio

X_{i0} = fracción másica de i a un tiempo t=0.

Las ecuaciones basadas en el modelo de Fick proporcionan la relación entre la fuerza impulsora reducida (dependiente de la concentración), el tiempo de proceso y la posición del sistema. No obstante, la aplicación de estas ecuaciones a sistemas de estructura compleja no isotrópica, como las frutas, las convierte en ecuaciones empíricas, debido a que no se cumplen las condiciones de contorno en las que se deducen las ecuaciones Fickianas integradas (Xue Keqing, 2004).

2.4 Metodología de superficie de respuesta

2.4.1 La metodología de Superficie de Respuesta

El objetivo de la metodología de superficies de respuesta es optimizar una o más variables de interés, lo cual se logra al determinar sus mejores condiciones de operatividad. Para ello se utiliza un conjunto de técnicas estadísticas que nos permiten analizar y modelar la forma en que la variable de interés es influenciada por otras (Siqueiros, 2004).

La metodología de superficie de respuesta consiste en tres palabras clave: diseño, modelo y técnica de optimización. El diseño y modelos se piensan al mismo tiempo, las cuales dependen del tipo de comportamiento que se espera en la respuesta. Según el comportamiento de la respuesta. El modelo puede ser de primero o de segundo orden (plana o con curvatura), por ello, el tipo de diseño utilizado y el método de optimización se clasifican, según sea el caso, como de primero o de segundo orden.

La palabra diseño implica que para optimizar un proceso se debe saber diseños de experimentos, en particular aquellos que sirven para ajustar los modelos de regresión lineal múltiple. Los diseños factoriales completos o fraccionados y algunas variantes de estos, son los más recomendados en la práctica. La palabra modelo, supone el conocimiento de análisis de regresión lineal múltiple. Se requiere conocer algunos elementos básicos como son: parámetros del modelo, modelo ajustado, significancia

del modelo, prueba de falta de ajuste, residuos predichos, intervalos de confianza para predichos, coeficiente de determinación.

Por último, la palabra optimización lleva a recordar algunas técnicas matemáticas que sirven para, dado un modelo ajustados, explorarlo para obtener información sobre el punto óptimo. Las técnicas que conviene recordar son las siguientes: derivadas de funciones, multiplicadores de LaGrange, operaciones con matrices, valores y vectores propios y sistemas de ecuaciones simultaneas. Las técnicas de optimización son útiles cuando se controlan entre tres y ocho factores; para dos factores la superficie de respuesta se puede explorar muy bien de manera gráfica (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

2.4.2 Diseños de Superficie de Respuesta

El grado de los modelos polinomiales usados generalmente en el análisis de superficies de respuesta permite la clasificación de los diseños; los más comúnmente usados son el modelo lineal o de primer orden y el modelo cuadrático o de segundo orden (Siqueiros, 2004).

Modelo de primer orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (10)$$

Modelo de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (11)$$

Donde β representa a la escala y es el corte de la superficie con el eje Y en el origen; β_i representa el efecto principal i individual del factor x_i ; β_{ij} mide el efecto de interacción $x_i x_j$ y ε representa el error experimental (aleatorio). Los parámetros β_0 , β_i , β_{ii} , β_{ij} se estiman a partir de los datos. Por ejemplo. En el caso de un diseño factorial 2^k los parámetros (con excepción de β_{ii}) se estiman a partir de los efectos, solo dividiéndolos entre 2 para expresarlos en una escala unitaria; el estimador de β_0 es la media global de los datos. En general se puede aplicar, el modelo de mínimos cuadrados para estimar los parámetros del modelo para cualquier diseño (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

2.4.3 Método de Escalonamiento Ascendente

Este método es un procedimiento preliminar que se usa cuando el sistema está siendo investigado por primera vez y sirve para determinar la dirección de ascenso (o descenso) máximo a partir del centro del diseño inicial. Generalmente le sigue un ajuste de segundo orden, es decir, es la base de una experimentación secuencial.

En las etapas iniciales de un experimento es posible mejorar bastante la respuesta. Se debe seleccionar una región de operatividad, que generalmente es una subregión de toda la región de interés, y que muchas veces va cambiando conforme la investigación progresa (Siqueiros, 2004).

Etapas de escalonamiento:

Etapas que consisten en escalar sucesivamente hacia la región óptima hasta llegar a ubicarla. Como quien comienza a caminar o escalar hacia el punto más alto de un cerro. Para este propósito se utilizan los diseños experimentales secuenciales siguientes:

a) Directos

Búsqueda simple (simplex search)

Búsqueda múltiple (multiple search)

b) Indirectos

Método de pendientes ascendentes o descendentes.

Es indudable que cuando se dispone de suficiente información, acerca de un proceso, y se conoce próximamente la región donde se encuentra el óptimo (en base de la experiencia del investigador) la etapa de escalonamiento se puede obviar, para pasar directamente a la etapa de optimización final.

2.4.4 Diseños para estimar superficies de respuesta de segundo orden

Los diseños de segundo orden son aquellos que permiten estudiar los efectos de interacción y efectos cuadráticos, aparte de los efectos lineales. Se utilizan ante la necesidad de explorar una superficie más compleja o bien cuando se tiene identificada la región de respuesta óptima y se quiere caracterizar esa superficie de respuesta. La selección de estos diseños depende de las características del problema, pero deben en general cumplir ciertos requerimientos como capacidad para realizar estimaciones eficientes de los coeficientes del modelo y medir tanto el error experimental como la posible presencia de falta de ajuste (Siqueiros, 2004).

2.4.4.1 Diseño Central Compuesto

Cuando se busca un modelo de segundo orden que se ajuste a los datos, el diseño central compuesto, también llamado Box-Wilson es uno de los diseños más utilizados, por su gran flexibilidad. Se empieza con un diseño factorial o factorial fraccionado a dos niveles (conocido como la porción factorial), n_0 puntos centrales (que sirve para examinar la presencia de curvatura, dar información acerca de los efectos cuadráticos y estimar la magnitud del error experimental) y $2k$ puntos axiales o puntos estrella, de la forma: $(-\alpha, 0, \dots, 0)$, $(\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, -\alpha, \dots, 0)$, $(0, \alpha, \dots, 0)$, \dots $(0, 0, \dots, -\alpha)$, $(0, 0, \dots, \alpha)$. Se tendrá por lo tanto, en total, $N = 2^k + 2k + n_0$ corridas.

La distancia de los puntos axiales al origen, que se denota por α , varía según las propiedades que se desean en el diseño. Las propiedades más buscadas generalmente, son rotabilidad, ortogonalidad y precisión uniforme.

Box y Hunter, establecen respecto a la Rotabilidad, que un diseño experimental es rotable o girable si la varianza de la respuesta predicha \hat{y} , en algún punto x , es función sólo de la distancia al punto desde el centro del diseño y no es una función de la dirección. Un diseño central compuesto se hace rotable mediante una elección apropiada del espaciamiento axial α . Si el diseño es rotable, la desviación estándar (o la varianza) de la respuesta predicha \hat{y} , es constante en todos los puntos que están a la misma distancia del centro del diseño. Para lograr rotabilidad en un diseño factorial completo a dos niveles, se debe elegir un valor de $\alpha = (2^k)^{1/4}$. Si consideramos, por ejemplo, que la respuesta a medir es el rendimiento, la predicción de este tendrá la misma precisión para todos los puntos que se encuentran a la misma distancia del centro del diseño. Esta propiedad de rotabilidad cobra importancia en la exploración de una superficie de respuesta, porque la precisión de la superficie estimada no depende de la orientación del diseño con respecto a la superficie de respuesta real o a la dirección de búsqueda de las condiciones óptimas. Dado que la finalidad del diseño de superficie de respuesta es la optimización y se desconoce la localización del óptimo antes de correr el experimento, tiene sentido usar un diseño que proporcione estimaciones igualmente precisas en todas las direcciones. Cuando se tienen r_f réplicas del factorial 2^k y r_a réplicas de los puntos axiales, se debe escoger la distancia

α como $\alpha = (r_j 2^k / r_a)^{1/4}$. Por otra parte, cuando se usa un factorial fraccionario 2^{k-p} , como base del diseño central compuesto, se escogerá $\alpha = (r_j 2^{k-p} / r_a)^{1/4}$ (Siqueiros, 2004).

Un diseño se llama rotatable si la varianza de $\hat{Y}(x)$ sólo depende de la distancia del punto x al centro del diseño y no de la dirección en la que se encuentra. Es decir, si pensamos en la variable $\text{var} [\hat{Y}(x)]$ como otra respuesta, su gráfica de contornos tiene la forma de círculos concéntricos alrededor del centro del diseño. La rotabilidad del diseño asegura que la calidad de la predicción, medida por la $\text{var} [\hat{Y}(x)]$, sea invariante en cualquier rotación del diseño alrededor del centro del mismo; de aquí el nombre de esta propiedad. La importancia práctica de la rotabilidad en el problema de encontrar un punto óptimo es porque asegura que, con independencia de la dirección en que se explore a partir del centro del diseño, la calidad de predicción se comporta de igual manera (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

2.4.5 Optimización final

Esta región puede ser descrita apropiadamente, mediante modelos matemáticos de segundo orden. Una vez definido el modelo matemático que represente satisfactoriamente la región óptima, se procede a optimizar dicho modelo. Es decir, a hallar los valores óptimos de las variables que maximicen o minimicen el modelo matemático estimado. Al ubicarse en las etapas previas la región experimental que

encierra el óptimo, en esta región los efectos de segundo orden son mayores en valor absoluto a los efectos de primer orden, lo que indica que esta región puede describirse apropiadamente por modelos matemáticos de segundo orden.

Los diseños experimentales de segundo orden más apropiados para estos casos son:

- a.- Diseño rotable
- b.- Diseños compuestos

Un diseño experimental rotable es aquel en el cual se tiene igual facultad de predicción en todas las direcciones a partir de un punto experimental central y donde los otros puntos experimentales están a una distancia constante del punto central. Esto significa que la variancia (S_e^2) depende solamente de la distancia del punto (X_1, X_2, \dots, X_k) al punto central del diseño (X_0). El hecho de que la variancia dependa solamente de la distancia, significa que el diseño permanece inalterado si este es rotado a un ángulo arbitrario tomando como eje de rotación el punto central. Esta característica es muy útil cuando las unidades de las variables controladas están dadas en escala natural, en este caso, la distancia dependerá de las unidades en las cuales las variables controlables son las medidas, y que cambios en la magnitud de estas unidades cambiaran la localización de los puntos a una distancia constante del origen. Los diseños compuestos no son otra cosa que un diseño factorial 2^k para menores de cinco variables ($k < 5$) o un diseño factorial fraccionado 2^{k-p} para mayores de cinco variables ($k > 5$), más las siguientes características:

Puntos adicionales ($2k$) en los ejes coordenadas a una distancia del punto central del diseño. Puntos replicados en el centro del diseño necesarios para hallar la variancia del error experimental.

A. Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza de un conjunto de datos pendientes del experimento, pueden ser presentados según el cuadro N° 2.4, cuyas entradas representan medidas de información acerca de las fuentes de variación de los datos.

CUADRO N° 2.4

REPRESENTACIÓN DEL ANÁLISIS DE VARIANZA

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio
Regresión (modelo ajustado)	$p - 1$	$SS_{REG} = \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$\frac{SS_{REG}}{(p - 1)}$
Residual	$N - p$	$SS_R = \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$\frac{SS_R}{(N - p)}$
Falta de ajuste	$N - p - n_c - 1$	$SS_R - SS_{REG}$	$\frac{SS_R - SS_{REG}}{N - p - n_c - 1}$
Error puro	$n_c - 1$	$SS_E = \sum_{i=1}^N (Y_i^\circ - \bar{Y}^\circ)^2$	$\frac{SS_E}{n_c - 1}$
Total	$N - 1$	$SS_T = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2$	$\frac{SS_T}{N - 1}$

Fuente: Box y Draper (1987)

Donde:

SS_{REG} : Suma de cuadrados de la regresión

SS_R : Suma de cuadrados del residual

SS_T : Suma de cuadrados del total

Y_i : Valores observados en el diseño experimental

\hat{Y}_i : Valores predichos por el modelo

\bar{Y} : Media de los valores observados en el diseño experimental

Y_i° : Valores observados en el punto central

\bar{Y}° : Media de los valores observados en el punto central

Cabe indicar que la suma total de cuadrados (SS_T) representa la variación total en un conjunto de datos y la suma de cuadrados de regresión (SS_{REG}) representa la porción de SS_T atribuible a la ecuación de la regresión ajustada. Por otro lado, el Lack of Fit permite conocer la existencia o no de la falta de ajuste del modelo observado a la ecuación de regresión estimada, y la SS_E da idea de la buena reproducibilidad del experimento (Box y Draper, 1987).

B. Localización del punto estacionario

El punto estacionario es el conjunto de las x_1, x_2, \dots, x_k que optimizan la respuesta predicha, tal que sus derivadas parciales $\partial \hat{y} / \partial x_1 = \partial \hat{y} / \partial x_2 = \dots = \partial \hat{y} / \partial x_k = 0$.

El punto estacionario podría representar un punto de respuesta máxima, un punto de respuesta mínima, o un punto de silla (Montgomery, 2004).

Montgomery (2004) afirma que es posible obtener una solución matemática general para la localización del punto estacionario y escribe el modelo de segundo orden en notación matricial presentado a continuación:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'Bx \quad (12)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad B = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{21}/2 & \dots & \hat{\beta}_{1k}/2 \\ & \hat{\beta}_{22} & \dots & \hat{\beta}_{2k}/2 \\ & & \ddots & \\ \text{simetria} & & & \hat{\beta}_{kk} \end{bmatrix}$$

En otras palabras, b es un vector ($k \times 1$) de los coeficientes de regresión de primer orden y B es una matriz simétrica cuyos elementos de la diagonal principal son los coeficientes cuadráticos puros ($\hat{\beta}_{ii}$), mientras que los elementos que están fuera de esta diagonal corresponden a un medio del valor de los coeficientes cuadráticos mixtos ($\hat{\beta}_{ij}, i \neq j$). La derivada de \hat{y} con respecto a los elementos del vector x igualada a 0 es:

$$\partial \hat{y} / \partial x = b + 2Bx = 0 \quad (13)$$

El punto estacionario será:

$$x_s = -1/2 B^{-1}b \quad (14)$$

2.4.6 Optimización simultanea de varias respuestas

Muchos problemas de superficie de respuesta incluyen el análisis de varias respuestas a la vez. Ello implica que se debe construir primero un modelo de superficie de respuesta apropiado para cada respuesta y después intentar encontrar un conjunto de condiciones de operación que optimicen en cierto sentido todas las respuestas, o que al menos la mantenga en rangos deseados (Montgomery, 2004). La *superposición de las gráficas de contorno* constituye relativamente un método directo para optimizar varias respuestas; pero cuando hay más de tres variables en el diseño es muy complicado, ya que están en un espacio bidimensional, y por ello $k-2$ de las variables del diseño deberán mantenerse constantes para construir la gráfica (Montgomery, 2004).

Sin embargo, la técnica de optimización simultanea popularizada por Derringer y Suich (1980), citados por Montgomery (2004), Corzo y Gómez (2004), Eren y Kaymak (2007), Corzo *et al.* (2008) y Shi *et al.* (2008) han ganado popularidad con los creadores de programas. Su procedimiento hace uso de las funciones con condición de deseabilidad. El enfoque general de dicha técnica consiste en convertir primero cada respuesta y_i en una función con condición de deseable individual o de deseabilidad (d_i) que varía en el rango $0 \leq d_i \leq 1$, donde, si la respuesta y_i está en su meta u objetivo, entonces $d_i = 1$, y si la respuesta está en una región aceptable, $d_i = 0$. Los valores individuales de deseabilidad (d_i) para cada respuesta, son luego

combinados utilizando la media geométrica para obtener la condición de deseabilidad global, presentada en la siguiente ecuación:

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m)^{1/m} \quad (15)$$

Donde hay m respuestas.

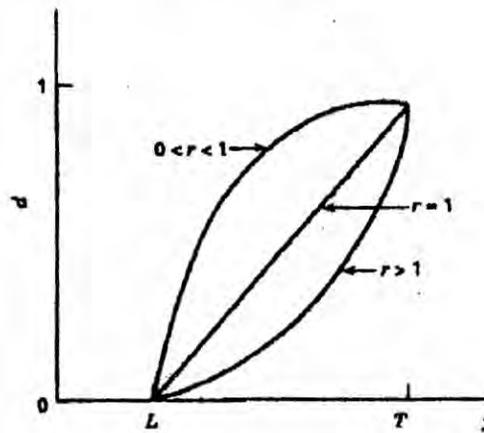
El valor de D brinda una estimación total de deseabilidad de los niveles de respuestas combinadas. Claramente, el rango de los valores de D estará dentro del intervalo $[0,1]$ y D se incrementará conforme al balance de las características o respuestas se haga más favorable. Un valor alto de D indica la mejor función del sistema, la cual es considerado como la solución óptima de este sistema. El valor óptimo de los factores son determinados de los valores de las funciones de deseabilidad individual que maximicen D (Cornell, 2002; Corzo y Gómez, 2004; Corzo *et al.*, 2008; Corzo y Centeno, 2003).

La función de deseabilidad individual a utilizar cuando se desea maximizar una respuesta es la siguiente:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i \leq A \\ \left(\frac{\hat{y}_i - A}{B - A}\right)^r & A < \hat{y}_i < B \\ 1 & \hat{y}_i \geq B \end{cases} \quad (16)$$

Donde B representa el objetivo de la respuesta, es decir, el valor máximo que se desea alcanzar; y A , es el mínimo valor aceptable. La representación gráfica de dicha respuesta se muestra en la figura N° 2.3.

FIGURA N° 2.3
FUNCIÓN DE DESEABILIDAD INDIVIDUAL PARA LA MAXIMIZACIÓN DE
UNA RESPUESTA



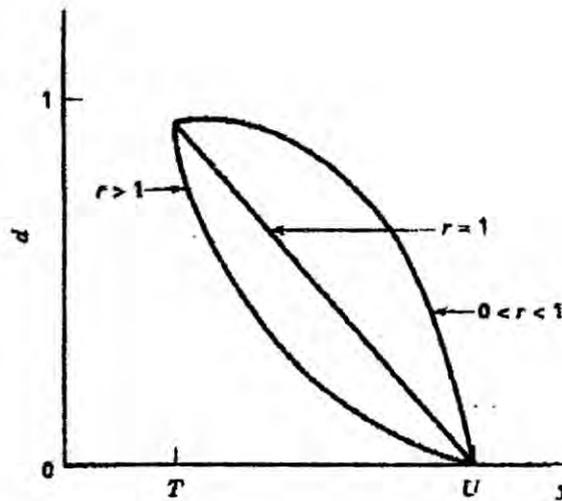
Fuente: Montgomery (2004)

Si el objetivo es minimizar una respuesta, la función de deseabilidad es la siguiente:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i \leq B \\ \left(\frac{C - \hat{y}_i}{C - B} \right)^r & B < \hat{y}_i < C \\ 1 & \hat{y}_i \geq C \end{cases} \quad (16)$$

Donde B representa el objetivo de la respuesta, es decir, el valor mínimo que se desea alcanzar; y C es el máximo valor aceptable. La representación gráfica de dicha respuesta se muestra en la figura N° 2.4.

FIGURA N° 2.4
FUNCIÓN DE DESEABILIDAD INDIVIDUAL PARA LA MINIMIZACIÓN DE
UNA RESPUESTA



Fuente: Montgomery (2004)

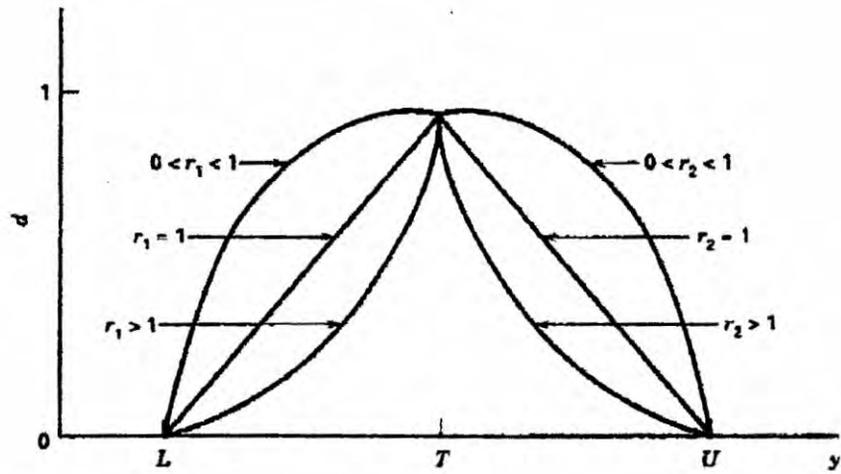
Si el objetivo es obtener una respuesta a nivel específico, la función de deseabilidad es:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \hat{y}_i \leq A \\ \left(\frac{\hat{y}_i - A}{B - A}\right)^{r_1} & A < \hat{y}_i < B \\ \left(\frac{C - \hat{y}_i}{C - B}\right)^{r_2} & B < \hat{y}_i < C \\ 1 & \hat{y}_i \geq C \end{cases} \quad (18)$$

Donde B representa el punto que se desea obtener y A y C los valores mínimos y máximos aceptable, respectivamente. La representación gráfica de dicha respuesta se muestra en la figura N° 2.5.

FIGURA N° 2.5

FUNCIÓN DE DESEABILIDAD PARA LA OBTENCIÓN DE UN NIVEL
ESPECÍFICO DE UNA RESPUESTA



Fuente: Montgomery (2004)

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 Definición de las variables

Variable Independiente:

- Concentración de la glucosa
- Temperatura de proceso
- Tiempo de proceso.

Variable Dependiente:

- Deshidratación osmótica

3.2 Operacionalización de variables

Variable Independiente:

- Temperatura de proceso: Se utilizará un equipo de baño termostático con sensor de temperatura.
- Concentración de glucosa: Se determinará previo cálculo.
- Tiempo de proceso: Se utilizará un cronómetro.

Variable Dependiente:

- Deshidratación osmótica: Se determinará dos parámetros.

- Pérdida de agua: Una balanza analítica para la medición de peso y se determinará la humedad y su variabilidad en el tiempo.
- Ganancia de sólidos: Una balanza analítica para la medición de peso y se determinará por diferencia de la humedad se determinará los sólidos totales y su variabilidad en el tiempo.

3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas

3.3.1 Hipótesis general

La inmersión de cilindros de manzana en soluciones acuosas de glucosa (concentraciones 40-60% en peso) por periodos de tiempo (60-180min) y a varias temperaturas (30-40°C) permitirá la deshidratación osmótica de éstas.

3.3.2 Hipótesis específicas

La temperatura de proceso, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa aceleran la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de cilindros de manzana delicia.

El diseño experimental y el modelo de ajuste para los datos obtenidos se expresan como una ecuación polinomial de segundo orden en función de la temperatura, tiempo de procesamiento y concentración de glucosa.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación

Este proyecto se enfocó en un tipo de investigación explicativo experimental por que se estudió el efecto que pueda tener los parámetros que influyen en la optimización de la deshidratación osmótica.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación será determinada por la metodología de superficie de respuesta que estimará los efectos principales de las variables independientes del proceso como temperatura (X_1), concentración de glucosa (X_2) y el tiempo de proceso (X_3) sobre la deshidratación osmótica de la manzana en donde se evaluará la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG). El dominio experimental explorado se seleccionó a través de estudio de la literatura y ensayos previos.

Un diseño central compuesto se utilizó para el diseño de los datos experimentales. El centro se ejecuta por cuatro veces para proporcionar un medio para estimar el error experimental y una medida de la falta de ajuste.

Una vez obtenido el modelo de ajuste que permitirá maximizar la deshidratación osmótica de la manzana, se obtendrá una superficie de contorno que determinará los valores óptimos de las variables independientes.

4.3 Población y muestra

La población: Manzana variedad delicia (*Malus domestica B.*) producido en el valle del Distrito San Lorenzo de Putinza-Provincia Yauyos-Departamento Lima en el periodo de Agosto-October del 2013.

La muestra: El tamaño de la muestra fue extraída según la capacidad de producción semanal de la localidad.

Determinación del tamaño de muestra:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * N * p * q}{i^2(N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q} \quad (19)$$

Donde:

n = tamaño muestral

N = 4000 Kg/semana; tamaño de la población

Nivel de confianza $(1 - \alpha) = 95\%$; $Z_{\alpha=0,05} = 1,96$

$p = 0,7$; prevalencia esperada del parámetro

$q = 1 - p$

$i = 0,18$; error que se prevee cometer

$$n = \frac{1,96^2 * 4000 * 0,7 * 0,3}{0,18^2(4000 - 1) + 1,96^2 * 0,7 * 0,3}$$

$$n = 24,75 \text{ Kg}$$

Por otro lado, se requerirá 100 g muestras de manzana en forma cilíndrica con diámetro de 18mm y 11 mm de altura por cada corrida experimental.

Por lo que se necesitará:

g total = g de muestra x °Ncorridas experimentales x °Nrepeticiones

$$\text{g total cilindros de manzana} = 100 * 18 * 3$$

$$\text{g total cilindros de manzana} = 5400\text{g}$$

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Estructurada y Sistemática: Para la recopilación de los datos sobre los hechos abordados como objeto de la investigación se empleará los análisis fisicoquímicos y los cálculos matemáticos a las muestras evaluadas.

4.4.1 Método de análisis

A. Análisis físico-químico

- Análisis proximal de humedad. Método de la AOAC (1995)
- Cenizas totales. Método de la AOAC (1995)
- Grasa. Método de la AOAC (1995)
- Fibra. Método de la AOAC (1995)
- Proteína. Método de la AOAC (1995)
- Carbohidratos. Método de la AOAC (1995)
- Sólidos solubles. Método de la AOAC (1995)

- Acidez titulable total. Método de la AOAC (1995)
- Sólidos totales. Se obtuvo por la diferencia 100% -% humedad (Guevara, 1990)
- Índice de madurez. La relación sólidos solubles/acidez titulable (Konopacka y Plochanski, 2001)
- Actividad de agua. Método de la AOAC (1995)
- pH. Método de la AOAC (1995)

B. Análisis de cálculos matemático

Para la determinación de los parámetros de la deshidratación osmótica se usaron los cálculos matemáticos utilizados por Mandala *et al.* (2005).

- Pérdida de agua:

$$WL = \frac{(ww_0) - (w_t - ws_t)}{(ws_0 + ww_0)} \times 100$$

- Ganancia de sólidos:

$$SG = \frac{(ws_t - ws_0)}{(ws_0 + ww_0)} \times 100$$

Donde:

ww_0 : Peso del agua (g/g producto fresco)

w_t : Peso de la fruta al final del tratamiento (g/g producto fresco)

ws_0 : Peso del sólido inicial presente en la fruta (g/g producto fresco)

ws_t : Peso del sólido en la fruta al final del tratamiento (g/g producto fresco).

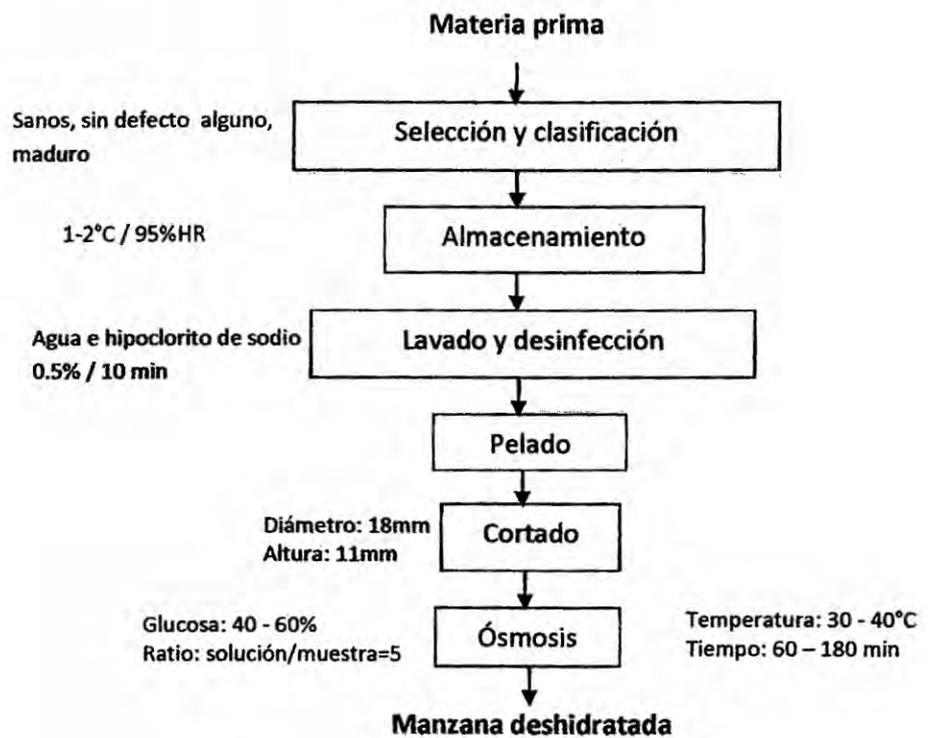
4.4.2 Metodología experimental

A. Etapas de la investigación

En el gráfico N° 4.1 se presenta el esquema experimental para optimizar el proceso de deshidratación osmótica de cilindros de manzana.

GRÁFICO N° 4.1

DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA OBTENCIÓN DE MANZANA OSMOTIZADA.



Fuente: Propio

Etapa I. Se caracterizó la manzana determinando el índice de madurez, humedad y sólidos solubles.

Etapa II. Se determinaron las condiciones de la deshidratación osmótica como la temperatura, concentración de glucosa y tiempo de proceso para los cilindros de manzana delicia, siguiendo el flujo de operaciones.

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 la pérdida de agua, ganancia de sólidos de los cilindros de manzana delicia.

4.5 Procedimientos de recolección de datos

Estructurada y Sistemática: Para la recopilación de los datos sobre los hechos abordados como objeto de la investigación se empleó los análisis fisicoquímicos y los cálculos matemáticos a las muestras evaluadas.

Para la recolección de datos se tomó muestras aleatorias por triplicado de 100 gramos aproximadamente de cada tratamiento para los análisis fisicoquímicos y cálculos matemáticos correspondientes.

4.5.1 Materiales y métodos

A. Lugar de ejecución

La presente investigación se ejecutó en los laboratorios de instrumentación e investigación y de fisicoquímica de la Facultad de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

B. Materia prima

Se utilizó manzana variedad “delicious” (*Malus domestica Borkh*) procedente del valle del Distrito San Lorenzo de Putinza-Provincia de Yauyos – Departamento de Lima.

C. Equipos y materiales

Equipos

Se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza analítica H. W. Kessell S.A, rango de medición 0- 210g, sensibilidad 0,1mg
- Balanza de precisión Adventurer OHAUS, rango de medición 0-3100g, sensibilidad 0,01g

- Refractómetro Pocket Pal-1Atago, rango de medición 0-53%Brix, sensibilidad 0.1%Brix.
- Medidor de actividad de agua, Aqualab Model Series 3TE, sensibilidad 0,001
- Estufa al vacío
- Baño María o Thermoshake CIMATEC, rango 0-200 rpm, 0- 100°C, sensibilidad 0,1°C
- Sacabocados de 18mm de diámetro y 11mm de altura

Materiales

Se utilizaron los siguientes insumos y materiales:

- Hipoclorito de sodio
- Glucosa
- Ácido ascórbico
- Fenolftaleína 1%
- Hidróxido de sodio 0,1N
- Agua destilada
- Mortero
- Vasos precipitados de 1000 ml, 500 ml, 250 ml
- Probetas graduadas de 100 ml
- Bureta 25 ml
- Erlenmeyer 100 ml

- Placas Petri
- Papel de aluminio

4.5.2 Procedimiento experimental

A. Operaciones para el proceso de deshidratación osmótica de cilindros de manzana delicia

El procedimiento experimental utilizado para la obtención de los cilindros de manzana y el proceso osmótico se presenta en el gráfico N° 4.2.

Las operaciones realizadas se describen a continuación:

- Para materia prima se utilizó frutos de manzana provenientes del Distrito San Lorenzo de Putinza-Provincia de Yauyos-Departamento de Lima, en estado fresco.

- **Selección - clasificación**

Se seleccionó la manzana a deshidratar en función al tamaño, calidad (sanas sin daños físicos y microbiológicos, lo cual evitará contaminar el producto final) y en estado de madurez adecuada. La clasificación permitió contar con los mejores frutos maduros (rojos) y con madurez intermedia “verdes-rojos”, mostrado en la figura N° 4.1.

GRÁFICO N° 4.2
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

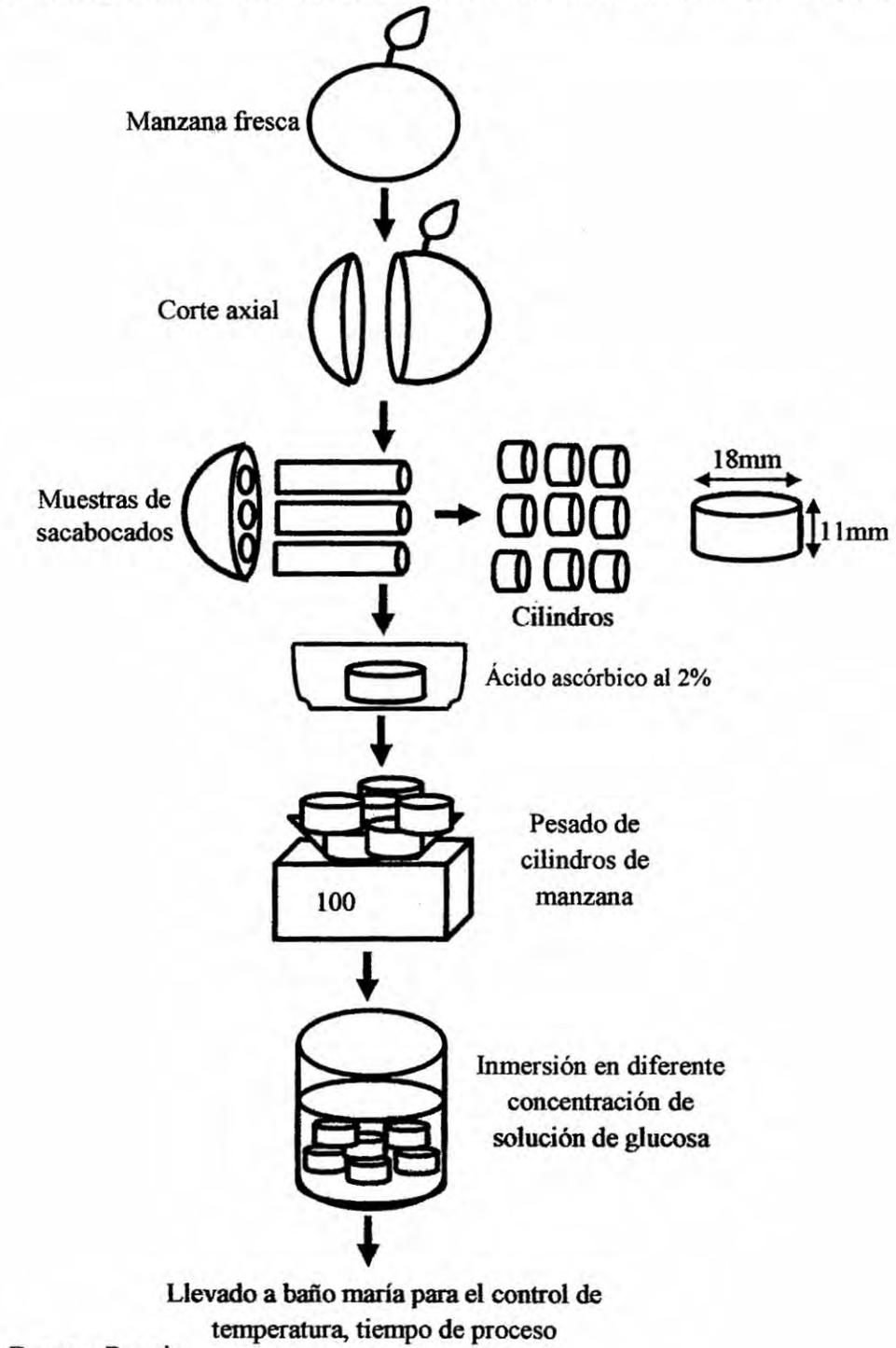
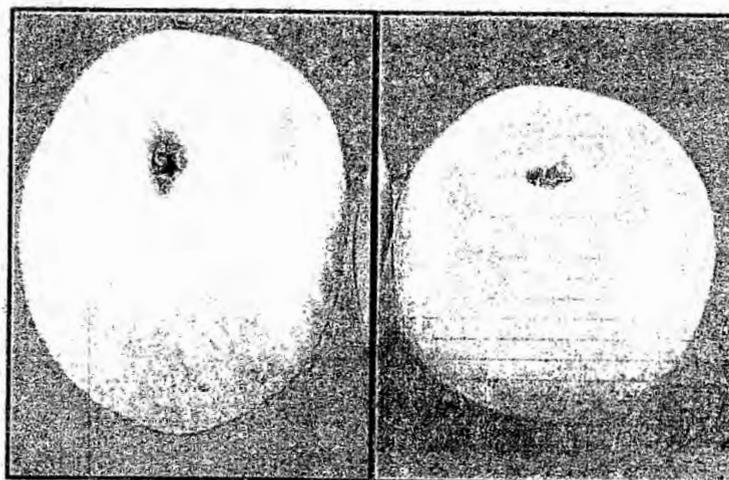


FIGURA N° 4.1

SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS MANZANAS



Fuente: Propia

- Almacenamiento

Las manzanas fueron mantenidas a temperatura de refrigeración de 1-2° C y 95%HR, hasta el momento del ensayo, aproximadamente 2 meses tiempo en el cual, según Konopacka y Plochanski (2001), las manzanas en general obtienen la calidad organoléptica optima (sabor, aroma, color y textura) para ser procesada por deshidratación osmótica.

- Lavado - desinfección

El lavado se realizó con el objetivo de eliminar las partículas extrañas que se encuentran adheridas en la superficie de los frutos, con el agua circundante, el desinfectado tuvo la finalidad de reducir e inactivar la carga microbiana, el cual se

realizó por inmersión en agua potable con hipoclorito de sodio al 0.5% durante 10 minutos aproximadamente, luego se procedió a un enjuagado con agua.

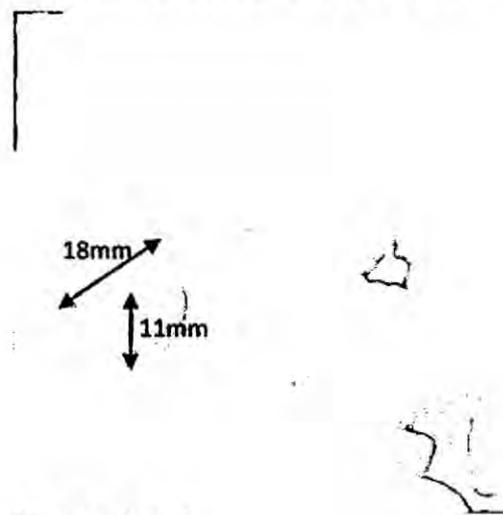
- Cortado

El cortado se realizó con el fin de obtener muestras de manzana en forma cilíndrica, para ello se utilizó un sacabocados, haciendo una perforación transversal al tejido, con un diámetro de 18mm y 11mm de altura. Mostrado en la figura N° 4.2.

- Inmersión en solución ácido ascórbico

Se sumergió los cilindros de manzana en una solución de ácido ascórbico (2%) durante 10 min para evitar la oxidación (pardeamiento enzimático) de éstas.

FIGURA N° 4.2
CILINDROS DE MANZANA



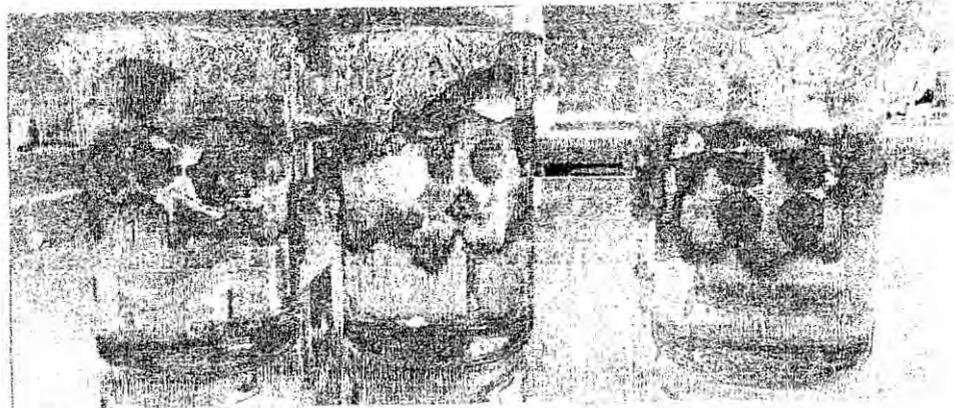
Fuente: Propia

• **Osmodeshidratación**

Se utilizó un Baño María CIMATEC (ver anexo 1) para el control de la temperatura y la agitación, se colocó la fruta cortada en vasos de 500ml, donde contiene una solución osmótica de glucosa, el objetivo fue homogenizar la concentración de la solución osmótica para una mayor transferencia de masa en el tejido, caracterizándose por conservar sus atributos de calidad. Ver figura N° 4.3.

FIGURA N° 4.3

CILINDROS DE MANZANA EN SOLUCIÓN OSMÓTICO



Fuente: Propio

B. Procedimiento para obtención de los datos experimentales

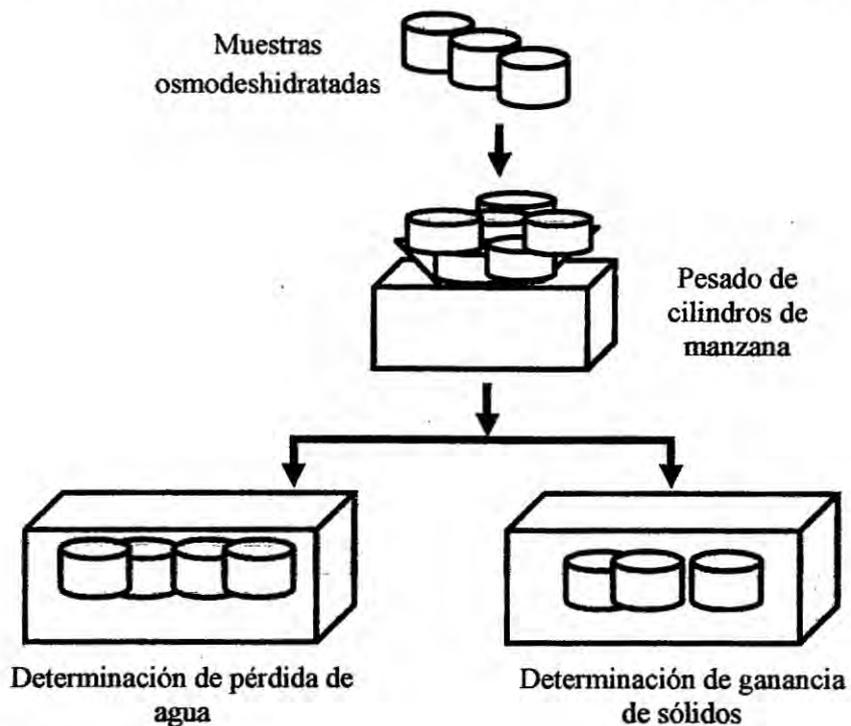
Estos procedimientos fueron realizados para cada una de las corridas experimentales.

- Concluido el tiempo correspondiente de la deshidratación osmótica, se procedió a retirar los cilindros de manzana osmodeshidratadas, con la ayuda de una piceta y agua destilada en flujo corriente se retiró el exceso de azúcar

de la superficie de la manzana. Luego los cilindros de manzana osmodeshidratadas fueron colocados sobre papel absorbente para quitar el agua del lavado.

- Luego las muestras fueron pesadas en balanza de precisión, para la obtención del peso final. Se tomó 10g de muestra para determinar la humedad correspondiente, usando la metodología de AOAC (1995). Además, con la ayuda de un refractómetro se determinó los sólidos solubles.

GRÁFICO N° 4.3
PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES



Fuente: Propio

En el gráfico N° 4.3 se muestra el procedimiento para la obtención de los resultados o datos experimentales.

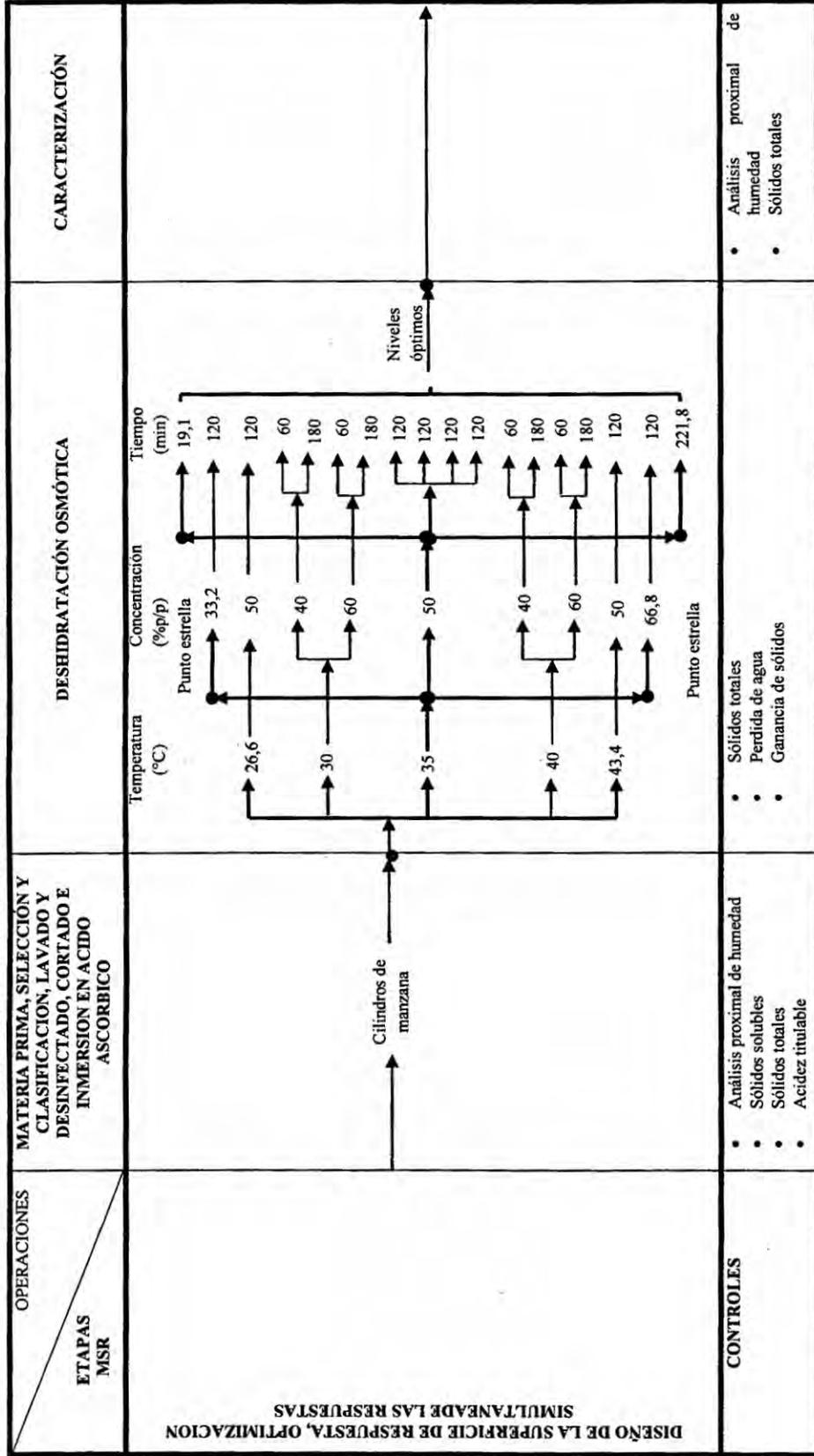
4.6 Procedimiento estadístico y análisis de datos

Para la evaluación del efecto de la temperatura, concentración de glucosa y el tiempo sobre la pérdida de agua (Y_1) y ganancia de sólidos (Y_2) y la posterior determinación de los niveles de dichas variables que optimicen el proceso de Osmodeshidratación, se aplicó el Método de Superficie de Respuesta, con un Diseño Central Compuesto (DCC) (Montgomery, 2004).

Los análisis estadísticos correspondientes al Método de Superficie de Respuesta se realizaron utilizando el Programa Estadístico Minitab 17.

GRÁFICO N° 4.4

ESQUEMA EXPERIMENTAL PARA OPTIMIZAR LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CILINDROS DE MANZANA APLICANDO EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA



Fuente: Propio siguiendo la metodología de Box y Wilson, 1951. Método Superficie de Respuesta Compuesto Central

A. Diseño de la Superficie de Respuesta: Estimación de los modelos matemáticos de segundo orden.

El análisis de superficie de respuesta de segundo orden para la pérdida de agua (Y_1) y ganancia de sólidos (Y_2), se realizaron mediante un Diseño Central Compuesto (DCC), que según Box y Draper (1987), para $k=3$ variables consta de 8 puntos factoriales (2^k), 6 Puntos axiales (estrella) en los ejes coordenados (a una distancia α) y 4 repeticiones en el punto central; dando un total de 18 puntos experimentales. Para determinar la ubicación de los puntos axiales se consideró $\alpha = (F)^{1/4} = (8)^{1/4} = 1,68$ que, garantiza un diseño central compuesto rotatable (Montgomery, 2004).

Los niveles de la variable X_1 , X_2 y X_3 se establecieron en base a la investigación realizada por Erle y Schubert, 2001; Mandala *et al.*, 2005 y Puente *et al.*, 2010.

El cuadro N° 4.1 muestra los niveles de las variables codificadas para el Diseño Central Compuesto (DCC).

CUADRO N° 4.1

**VARIABLES INDEPENDIENTES NATURALES Y CODIFICADAS
CONSIDERADAS PARA EL DISEÑO COMPUESTO CENTRAL (DCC)**

Variable	Unidad	Símbolo		Niveles				
		Codificada	Natural	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Temperatura	°C	x_1	X_1	26,6	30	35	40	43,4
Concentración de glucosa	%(p/p)	x_2	X_2	33,2	40	50	60	66,8
Tiempo	min	x_3	X_3	19,1	60	120	180	221,8

Fuente: Propio

El cuadro N° 4.2 presenta el Diseño Compuesto Central (DCC) utilizado, donde muestran los 18 puntos experimentales (8 puntos factoriales, 6 puntos axiales y 4 repeticiones en el punto central).

CUADRO N° 4.2
DISEÑO COMPUESTO CENTRAL (DCC)

Puntos experimentales	(X ₁) Temperatura (°C)	(X ₂) Concentración %(p/p)	(X ₃) Tiempo (min)
1	-1 (30)	-1 (40)	-1 (60)
2	-1 (30)	-1 (40)	1 (180)
3	-1 (30)	1 (60)	-1 (60)
4	-1 (30)	1 (60)	1 (180)
5	1 (40)	-1 (40)	-1 (60)
6	1 (40)	-1 (40)	1 (180)
7	1 (40)	1 (60)	-1 (60)
8	1 (40)	1 (60)	1 (180)
9	-1,68 (26,6)	0 (50)	0 (120)
10	1,68 (43,4)	0 (50)	0 (120)
11	0 (35)	-1,68 (33,2)	0 (120)
12	0 (35)	1,68 (66,8)	0 (120)
13	0 (35)	0 (50)	-1,68 (19,1)
14	0 (35)	0 (50)	1,68 (221,8)
15	0 (35)	0 (50)	0 (120)
16	0 (35)	0 (50)	0 (120)
17	0 (35)	0 (50)	0 (120)
18	0 (35)	0 (50)	0 (120)

Fuente: Propio siguiendo la metodología de Box y Wilson, 1951

A.1 Pérdida de agua

Los valores promedios obtenidos de la pérdida de agua, fueron sometidos a un Análisis de Regresión Múltiple (método de mínimos cuadrados) y ajustados a un

modelo de segundo orden, que incluye la curvatura de la superficie y la dependencia de dicha respuesta en función de las variables bajo estudio. Dicho polinomio correspondió a la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1; i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (20)$$

Donde:

\hat{y} : Pérdida de agua (%)

$\hat{\beta}_0$: Término independiente

$\hat{\beta}_i$: Coeficiente de regresión lineal

$\hat{\beta}_{ii}, \hat{\beta}_{ij}$: Coeficientes de regresión cuadráticos

x_1, x_2, x_3 : Temperatura (°C), Concentración de Glucosa (% p/p) y Tiempo (min).

Posteriormente se realizó el Análisis de Varianza y la Prueba de significancia de los coeficientes del modelo estimado (nivel de significancia $\alpha=0,05$).

En referencia al ANVA, de acuerdo con Bunhan *et al.* (2004); Cornell (2002); Corzo y Gómez (2004); Eren y Kaymak-Ertekin (2007); Ozdemi *et al.* (2008); Sin *et al.* (2006); Corzo *et al.* (2008); Shi *et al.* (2008) y Ravi y Susheelamma (2005), consistió en establecer la significancia estadística del modelo y coeficientes del mismo; además de una falta de ajuste no significativo. La significancia estadística del modelo y de los coeficientes se establecieron mediante la prueba de Fischer; debiéndose registrar un valor de probabilidad F (Prob > F) menor a 0,05. Por otro lado, la falta de ajuste

del modelo fue establecida mediante ésta prueba; debiendo ser un valor de probabilidad F (Prob > F) mayor a 0,05. La bondad del ajuste de la ecuación de regresión de las observaciones experimentales fue verificada por el Coeficiente de Determinación (R^2), Coeficiente de Determinación Ajustado (R^2_{adj}), coeficiente de determinación Estimado (R^2_{pred}), Suma de Cuadrados del Error Estimado (PRESS) y la precisión del ajuste. Un buen modelo tendría un R^2_{pred} comparable al R^2_{adj} , bajo PRESS y una Precisión del Ajuste mayor que 4.

Con la finalidad de brindar una visión panorámica de la pérdida de agua en función de las variables estudiadas se graficaron las curvas de contorno (en dos dimensiones) y la superficie de respuesta (en tres dimensiones) correspondientes a la ecuación 20; gráficos que representan el efecto de las tres variables sobre la respuesta.

A.2 Ganancia de sólidos

Los valores promedios obtenidos de la ganancia de sólidos, fueron sometidos a un Análisis de Regresión Múltiple (método de mínimos cuadrados) y ajustados a un modelo de segundo orden, que incluye la curvatura de la superficie y la dependencia de dicha respuesta en función de las variables bajo estudio. Dicho polinomio correspondió a la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1; i < j}^k \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (21)$$

Donde:

\hat{y} : Ganancia de sólidos (%)

$\hat{\beta}_0$: Término independiente

$\hat{\beta}_i$: Coeficiente de regresión lineal

$\hat{\beta}_{ii}, \hat{\beta}_{ij}$: Coeficientes de regresión cuadráticos

x_1, x_2, x_3 : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), concentración de glucosa (% p/p) y tiempo (min).

Posteriormente se realizó el Análisis de Varianza y la Prueba de significancia de los coeficientes del modelo estimado (nivel de significancia $\alpha=0,05$).

En referencia al ANVA, de acuerdo con Bunhan *et al.* (2004); Cornell (2002); Corzo y Gómez (2004); Eren y Kaymak-Ertekin (2007); Ozdemi *et al.* (2008); Sin *et al.* (2006); Corzo *et al.* (2008); Shi *et al.* (2008) y Ravi y Susheelamma (2005), consistió en establecer la significancia estadística del modelo y coeficientes del mismo; además de una falta de ajuste no significativo. La significancia estadística del modelo y de los coeficientes se establecieron mediante la prueba de Fischer; debiéndose registrar un valor de probabilidad F (Prob > F) menor a 0,05. Por otro lado, la falta de ajuste del modelo fue establecida mediante ésta prueba; debiendo ser un valor de probabilidad F (Prob > F) mayor a 0,05. La bondad del ajuste de la ecuación de regresión de las observaciones experimentales fue verificada por el Coeficiente de Determinación (R^2), Coeficiente de Determinación Ajustado (R^2_{adj}), coeficiente de determinación Estimado (R^2_{pred}), Suma de Cuadrados del Error Estimado (PRESS) y

la precisión del ajuste. Un buen modelo tendría un R^2_{pred} comparable al R^2_{adj} , bajo PRESS y una Precisión del Ajuste mayor que 4.

Con la finalidad de brindar una visión panorámica de la pérdida de agua en función de las variables estudiadas se graficaron las curvas de contorno (en dos dimensiones) y la superficie de respuesta (en tres dimensiones) correspondientes a la ecuación 21; gráficos que representan el efecto de las tres variables sobre la respuesta.

B. Optimización simultánea de las respuestas

La optimización simultánea se llevó a cabo luego de obtener los modelos matemáticos correspondientes a cada respuesta evaluada y aplicando la Metodología de Deseabilidad Global, descrita por Cornell (2002); Corzo y Gómez (2004), Eren y Kaymak-Ertekin (2007); Corzo *et al.* (2008) y Shi *et al.* (2008), asignando un valor de 1 para el exponente r en las funciones de deseabilidad para cada respuesta implicada.

El objetivo de la optimización simultánea fue encontrar las condiciones de la deshidratación osmótica que cumplieran de la mejor forma con determinadas restricciones, siendo la pérdida de agua y para la ganancia de sólidos establecido en base a las recomendaciones de Azuara *et al.* (2002); Conway *et al.* (1983); Mauro *et al.*; Torringa *et al.* (2001); Kowalska y Lenart (2001); Eren y Kaymak-Ertekin (2007) y Burhan *et al.* (2004). De esta forma, las restricciones consideradas fueron las siguientes:

- Pérdida de agua: Mayor o igual a 25%
- Ganancia de sólidos: Menor o igual a 2%

Bajo estas restricciones, las funciones de deseabilidad individual para la pérdida de agua, ganancia de sólidos fueron respectivamente las siguientes:

$$\text{Maximización de la Pérdida de Agua } d_1 = \begin{cases} 0 & \hat{y}_1 < 25 \\ \left(\frac{\hat{y}_1 - 25}{PA_{MAX} - 25}\right)^1 & 25 \leq \hat{y}_1 \leq PA_{MAX} \\ 1 & \hat{y}_1 > PA_{MAX} \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{Minimización de la Ganancia de Sólidos } d_2 = \begin{cases} 1 & \hat{y}_2 < GS_{MIN} \\ \left(\frac{2 - \hat{y}_2}{2 - GS_{MIN}}\right)^1 & GS_{MIN} \leq \hat{y}_2 \leq 2 \\ 0 & \hat{y}_2 > 2 \end{cases} \quad (23)$$

Donde:

d_1 : Función de Deseabilidad para la Pérdida de agua

d_2 : Función de Deseabilidad para la Ganancia de sólidos

\hat{y}_1 : Pérdida de agua (%)

\hat{y}_2 : Ganancia de sólidos

PA_{MAX} : Máximo pérdida de agua (%)

GS_{MIN} : Mínimo ganancia de sólidos (%)

El valor denominado Deseabilidad Global (D) representó la media geométrica de los valores de las deseabilidades individuales (d_i), es decir:

$$D = (d_1 * d_2)^{1/2} \quad (24)$$

Se eligió como tratamiento óptimo aquella combinación de niveles de las variables que tuvieron el valor D más elevado.

Para la realización de esta optimización simultánea, también se utilizó el programa estadístico Minitab 17.

C. Verificación de los niveles óptimos de las variables

Considerando los niveles óptimos de las variables, las muestras de manzana fueron osmodeshidratadas, con fines de verificación, de los valores que se obtuvieron de cada respuesta fueron comparados con sus respectivos valores estimados por el modelo.

V. RESULTADOS

5.1 Características Físico- Químicas de la manzana delicia

En el cuadro N°5.1 se presenta los resultados de las características físico-químicas de la manzana delicia, las que concuerdan con Konopacka y Plocharski, (2007) y Wu *et al.* (2007).

CUADRO N° 5.1
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LA MANZANA DELICIA

COMPONENTES	Media ± DE Base Húmeda
Humedad (g/100g de fruta fresca)	83,84 ± 0,54
Cenizas Totales (g/100g de fruta fresca)	0,27
Grasa (g/ 100g de fruta fresca)	0,10
Fibra (g/100g de fruta fresca)	0,84
Proteína (g/100g de fruta fresca)	0,31
Carbohidratos (g/100g de fruta fresca)	14,80
Sólidos solubles (°Brix)	13,58 ± 1,05
Solidos totales (g/100g de fruta fresca)	16,41 ± 0,75
Acidez titulable (g/100g de muestra)	0,32 ± 0,05
Índice de Madurez	40,27 ± 5,6
Actividad de agua	0,987 ± 0,001
pH	3,79 ± 0,04

Fuente: Propio

5.2 Resultados experimentales

Se presentan los resultados experimentales obtenidos por triplicado en la deshidratación osmótica para la pérdida de agua en el cuadro N° 5.2:

CUADRO N° 5.2
RESULTADOS DE LA PÉRDIDA DE AGUA EN EL DISEÑO COMPUESTO CENTRAL

Puntos Experimentales	X ₁ Temperatura (°C)	X ₂ Concentración (%p/p)	X ₃ Tiempo (min)	Contenido de pérdida agua (%)		
1	30 (-1)	40(-1)	60(-1)	4,92	4,81	5,0
2	30(-1)	40(-1)	180(1)	7,97	7,5	7,5
3	30(-1)	60(1)	60(-1)	12,97	12,84	13,2
4	30(-1)	60(1)	180(1)	18,9	20,66	19,
5	35(0)	33,182(-1,682)	120(0)	3,27	3,07	2,9
6	35(0)	66,818(1,682)	120(0)	24,45	24,22	23,7
7	35(0)	50(0)	19,092(-1,682)	7,9	7,08	8,0
8	35(0)	50(0)	221,27(1,682)	16,69	18,4	18,1
9	35(0)	50(0)	120(0)	15,25	14,53	15,1
10	35(0)	50(0)	120(0)	16,19	15,32	16,
11	35(0)	50(0)	120(0)	16,67	17,34	17,3
12	35(0)	50(0)	120(0)	15,8	15,58	17,
13	40(1)	40(-1)	60(-1)	6,78	7,09	6,8
14	40(1)	40(-1)	180(1)	13,82	14,08	14,5
15	40(1)	60(1)	60(-1)	18,01	18,72	18,8
16	40(1)	60(1)	180(1)	29,56	30,76	30,0
17	26,591(-1,682)	50(0)	120(0)	10,63	11,37	11,3
18	43,4089(1,682)	50(0)	120(0)	18,66	19,41	19,2

Fuente: Propio

Se presentan los resultados experimentales obtenidos por triplicado en la deshidratación osmótica para la ganancia de sólidos en el cuadro N° 5.3:

CUADRO N° 5.3
RESULTADOS DE LA GANANCIA DE SÓLIDO EN EL DISEÑO COMPUESTO
CENTRAL

Puntos Experimentales	X₁ Temperatura (°C)	X₂ Concentración (%p/p)	X₃ Tiempo (min)	Contenido de ganancia de sólido (%)		
1	30 (-1)	40(-1)	60(-1)	1,6	1,46	1,4
2	30(-1)	40(-1)	180(1)	1,77	1,83	1,4
3	30(-1)	60(1)	60(-1)	2,87	3,14	2,4
4	30(-1)	60(1)	180(1)	1,68	1,8	1,4
5	35(0)	33,182(-1,682)	120(0)	1,87	1,7	2,4
6	35(0)	66,818(1,682)	120(0)	2,69	2,61	2,4
7	35(0)	50(0)	19,092(-1,682)	2,08	2,01	2,4
8	35(0)	50(0)	221,27(1,682)	1,76	1,79	1,4
9	35(0)	50(0)	120(0)	1,46	1,47	1,4
10	35(0)	50(0)	120(0)	1,39	1,45	1,4
11	35(0)	50(0)	120(0)	1,49	1,39	1,4
12	35(0)	50(0)	120(0)	1,39	1,47	1,4
13	40(1)	40(-1)	60(-1)	1,76	1,84	1,4
14	40(1)	40(-1)	180(1)	1,26	1,43	1,4
15	40(1)	60(1)	60(-1)	2,55	2,5	2,4
16	40(1)	60(1)	180(1)	2,24	2,5	2,4
17	26,591(-1,682)	50(0)	120(0)	2,76	2,91	2,4
18	43,4089(1,682)	50(0)	120(0)	2,8	2,76	2,4

Fuente: Propio

5.3 Optimización del proceso de deshidratación osmótica de cilindros de manzana

5.3.1 Estimación de los modelos matemáticos de segundo orden y análisis de la superficie de respuesta

- Pérdida de agua

Los valores promedios de la pérdida de agua obtenidos y estimados para cada punto experimental analizado se presentan en el cuadro N° 5.4.

El Análisis de Regresión Múltiple realizado con los valores obtenidos generó la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = -12,8 - 0,295x_1 + 0,47x_2 - 0,099x_3 - 0,00818x_1^2 - 0,0073x_2^2 - 0,000292x_3^2 + 0,01895x_1x_2 + 0,003967x_1x_3 + 0,001706x_2x_3 \quad (25)$$

Donde \hat{y} representa la pérdida de agua estimado (%); x_1 , x_2 y x_3 la temperatura (°C), concentración de glucosa (%p/p) y el tiempo (min), respectivamente, en su forma codificada.

CUADRO N° 5.4
PÉRDIDA DE AGUA OBTENIDO Y ESTIMADO POR EL DISEÑO
COMPUESTO CENTRAL

Punto experimentales	X ₁ Temperatura (°C)	X ₂ Concentración de glucosa (%p/p)	X ₃ Tiempo (min)	Perdida de Agua Obtenido (y _i) ^a (%)	Perdida de Agua Estimado (ŷ _i) (%)
1	30 (-1)	40(-1)	60(-1)	4,94	5,19
2	30(-1)	40(-1)	180(1)	7,66	7,34
3	30(-1)	60(1)	60(-1)	13,01	13,4
4	30(-1)	60(1)	180(1)	19,59	19,69
5	35(0)	33,18(-1,682)	120(0)	3,11	3,72
6	35(0)	66,82(1,682)	120(0)	24,14	24,17
7	35(0)	50(0)	19,09(-1,682)	7,68	7,47
8	35(0)	50(0)	221,27(1,682)	17,75	18,6
9	35(0)	50(0)	120(0)	14,96	15,89
10	35(0)	50(0)	120(0)	16,14	15,89
11	35(0)	50(0)	120(0)	17,12	15,89
12	35(0)	50(0)	120(0)	16,23	15,89
13	40(1)	40(-1)	60(-1)	6,92	6,47
14	40(1)	40(-1)	180(1)	14,16	13,42
15	40(1)	60(1)	60(-1)	18,54	18,47
16	40(1)	60(1)	180(1)	30,11	29,52
17	26,59(-1,682)	50(0)	120(0)	11,13	11,22
18	43,41(1,682)	50(0)	120(0)	19,1	20,56

^a Valor que representa el promedio de las tres replicas

Fuente: Propio

En el cuadro N° 5.5 se representa el Análisis de Varianza (ANVA) para el modelo cuadrático de la ecuación 25.

CUADRO N° 5.5
ANÁLISIS DE VARIANZA (ANVA) DE LA REGRESIÓN PARA LA PÉRDIDA DE AGUA

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F_c	Prob > F
Modelo	2405,08	8	300,63	421,41	0,0001
Residual	32,10	45	0,71		
Falta de ajuste	14,65	6	2,44	5,46	0,0004
Error puro	17,45	39	0,45		
Total	2437,18	53			

Media = 14,57 , Desviación Estándar (SD) = 0,84 , $R^2 = 0,986$, $R^2_{adj} = 0,984$
CV = 5,8 % , PRESS = 43,79 , $R^2_{pred} = 0,982$, Precisión de ajuste = 74,741

Fuente: Propio

En la evaluación estadística, el análisis de varianza del modelo de regresión indica que el modelo cuadrático es altamente significativo, tanto al 95 como al 99% de nivel de confianza, puesto que representa un valor F calculado (421,41) es superior al F tabular $F_{(8,39, \alpha=0,05)} = 2,19$ e incluso superior a $F_{(8,39, \alpha=0,01)} = 3,15$. Dicho modelo también mostro una falta de ajuste significativo a niveles de confianza de 95% y 99% pues el valor F calculado (5,46) es superior a los valores tabulados $F_{(6,29, \alpha=0,05)} = 2,35$ y $F_{(6,39, \alpha=0,01)} = 3,32$ respectivamente.

Con respecto al Error Puro, teniendo lo expresado por Cornell (2002), la suma de cuadrados fue calculado utilizando las repeticiones en el punto central del diseño experimental, obteniéndose un valor bajo en comparación con la suma de cuadrados total, presentando así una buena reproducibilidad, coincidiendo con Eren y Kaymak - Ertekin (2007) para la interpretación de esta fuente de variabilidad.

Al evaluar el coeficiente de Determinación Múltiple (R^2) se pudo establecer que el 98,6 % de variabilidad de los datos es explicado por el modelo seleccionado (existe una adecuada correlación entre los valores obtenidos y estimados de las respuesta, tal como se muestra en la figura N° 5.1); siendo así altamente significativo y suficiente para representar la relación existente entre la respuesta (perdida de agua) y las variables estudiadas (temperatura, concentración de glucosa y tiempo) coincidiendo con Eren y Kaymak - Ertekin (2007) y Shi *et al.* (2008) para la interpretación del coeficiente de determinación múltiple (R^2).

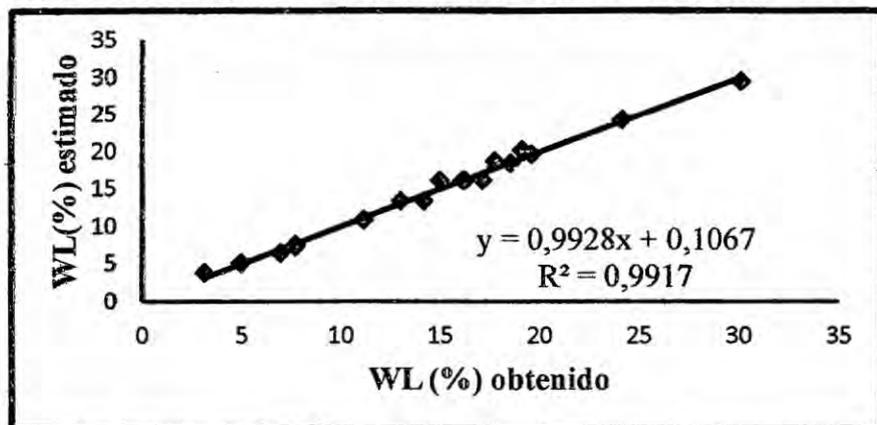
Eren y Kaymak - Ertekin (2007), mencionan que un valor alto de R^2 no siempre implica que el modelo de regresión sea bueno. Es decir que si adicionamos una variable al modelo se incrementara siempre el R^2 , sin hacer caso de que si la variable adicional es estadísticamente significativa o no. Por esta consideración el R^2_{adj} se usa para evaluar el ajuste del modelo el que debería ser mayor a 90%. El cuadro N° 5.5 muestra que el valor de R^2 (0,986) y R^2_{adj} (0,984) para el modelo no difieren

dramáticamente indicando así, que los términos no significativos no tendrían que incluirse en el modelo.

Al evaluar el coeficiente de variación (CV), se pudo establecer un 5,8% de dispersión relativa de los puntos experimentales del modelo polinomial de segundo orden (SOP).

Del mismo modo, el PRESS, R^2_{pred} y la Precisión de Ajuste, cuyos valores fueron 43,79; 98,2% y 74,741, respectivamente, se pudo establecer que el modelo de la ecuación 25 se ajusta adecuadamente a los datos experimentales (cuadro N° 5.4). En tal sentido Eren y Kaymak - Ertekin (2007) y Corzo *et al.* (2008) mencionan que la verificación de ajuste del modelo puede realizarse antes de evaluar los efectos no significativos ($p > 0,05$) y consideran que un bajo PRESS, un R^2_{pred} comparable al R^2_{adj} y una Precisión de ajuste mayor que 4 indican que el modelo ajustado es adecuado para la predicción (estimación).

FIGURA N° 5.1
RESULTADO DE LA PÉRDIDA DE AGUA OBTENIDA VERSUS LA PÉRDIDA DE AGUA ESTIMADO POR EL MODELO DE SEGUNDO ORDEN



Fuente: Propio

En el cuadro N° 5.6 se presenta la prueba de significancia de los coeficientes de la ecuación de regresión cuadrática para la pérdida de agua. Los coeficientes del modelo estimado, fueron analizados mediante la prueba F de Fischer, con la finalidad de eliminar aquellos que no presentan significancia estadística (nivel de significancia $\alpha=0,05$).

CUADRO N° 5.6

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DE LOS COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE REGRESIÓN CUADRÁTICA PARA LA PÉRDIDA DE AGUA.

Termino del modelo	Coefficiente estimado	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor Fc	p-value Prob>F
Lineal						
X ₁	2,78	316,25	1	316,25	443,29	0,0001
X ₂	6,07	1511,38	1	1511,38	2118,5	0,0001
X ₃	3,3	445,58	1	445,58	624,58	0,0001
Interacción						
X ₁ X ₂	0,95	21,55	1	21,55	30,20	0,0001
X ₂ X ₃	1,02	25,13	1	25,13	35,23	0,0001
X ₁ X ₃	1,19	33,99	1	33,99	47,64	0,0001
Cuadráticos						
X ₂ ²	-0,69	18,75	1	18,75	26,28	0,0001
X ₃ ²	-1,01	40,46	1	40,46	56,71	0,0001

Fuente: Propio

En base a las recomendaciones de Cornell (2002), se eliminaron del modelo aquellos coeficientes que resultaron ser no significativos por presentar valores de probabilidad F ($Prob > F$) mayores al nivel de significancia escogido ($\alpha = 0,05$). Por lo tanto, los

coeficientes asociados a los términos X_1 , X_2 , X_3 , X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 , X_2^2 y X_3^2 . Son significativos a un nivel de confianza de 95%, mientras que el coeficiente asociado al X_1^2 es no significativo a un nivel de confianza de 95%.

En las figuras N° 5.2 y N° 5.3 se muestran la superficie de respuesta y las curvas de contorno, respectivamente, donde se muestran la influencia de la temperatura, concentración de glucosa y el tiempo sobre la pérdida de agua.

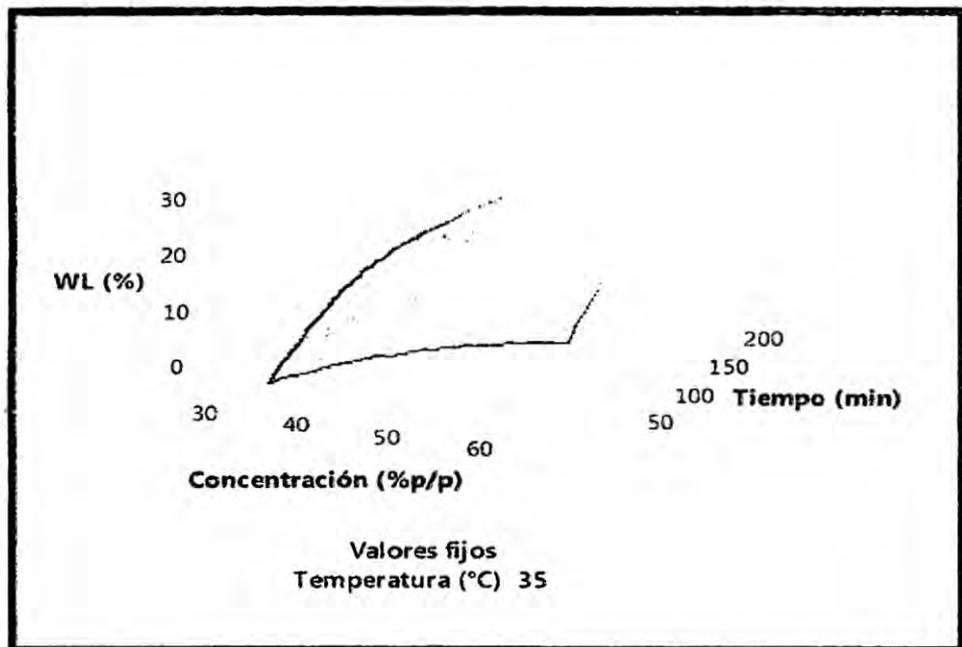
Se puede apreciar que el incremento de la pérdida de agua (%WL) se ve influenciada por la temperatura, concentración de la glucosa y el tiempo de procesamiento, además a una temperatura constante de 35°C, la concentración de glucosa y el tiempo de procesamiento conforme aumentan la pérdida de agua también incrementa. Burhan *et al.* (2004); Barrera (2007) afirma que la velocidad de pérdida de agua aumentó conforme lo hizo la temperatura del medio, debido al descenso en la permeabilidad selectiva de las membranas celulares, así como la disminución en la viscosidad osmótica empleada. Por otro lado Beristatni *et al.* (1990); Eren y Kaymak-Ertekin mencionan que el aumento de temperatura con el tiempo de procesamiento eleva la pérdida de agua rápidamente, especialmente las temperaturas de procesos más altas parecen promover la pérdida de agua más rápido, por lo que reduce el tiempo requerido para alcanzar las concentraciones de equilibrio. Además menciona que en los tiempos de procesamiento cortos, el aumento de temperatura aumenta la pérdida

de agua más que la ganancia de sólidos lo que provoca un aumento en la reducción de peso.

Kaymak-Ertekin y Sultanoglu (2000) y Panagiotou *et al.* (2007) mencionan que a mayor concentración de solución de glucosa, sacarosa y dextrosa, resulta mayor pérdida de agua en la manzana en condiciones de temperatura similares. Además éstos últimos investigadores indican que una concentración de glucosa de 40%w/w proporciona una mayor pérdida de agua de la manzana que las concentraciones de sacarosa de 30, 40 y 50%w/w para todas las temperaturas de proceso examinados.

FIGURA N° 5.2

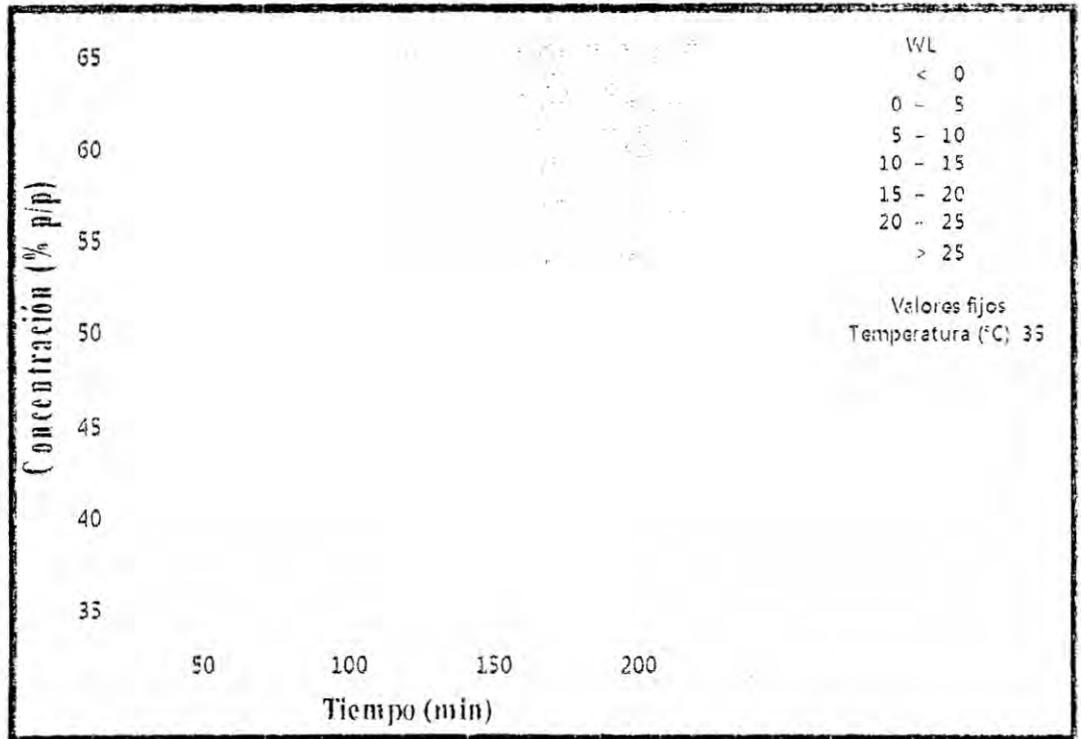
SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA PÉRDIDA DE AGUA EN EL DISEÑO COMPUESTO CENTRAL



Fuente: Propio

FIGURA N° 5.3

CURVAS DE CONTORNO PARA LA PÉRDIDA DE AGUA EN EL DISEÑO
COMPUESTO CENTRAL



Fuente: Propio

• Ganancia de sólidos

Los valores promedios de la ganancia de sólidos obtenidos y estimados para cada punto experimental analizado se presentan en el cuadro N° 5.7.

El Análisis de Regresión Múltiple realizado con los valores obtenidos genero la siguiente ecuación polinomial de segundo grado:

$$\hat{y} = 23,71 - 1,107x_1 - 0,1415x_2 + 0,00232x_3 + 0,01576x_1^2 + 0,002007x_2^2 + 0,000032x_3^2 - 0,000254x_2x_3 \quad (26)$$

Donde \hat{y} representa la ganancia de sólido estimado (%); x_1 , x_2 y x_3 la temperatura (°C), concentración de glucosa (%p/p) y el tiempo (min) respectivamente, en su forma codificada.

CUADRO N° 5.7
GANANCIA DE SÓLIDOS OBTENIDO Y ESTIMADO POR EL DISEÑO
COMPUESTO CENTRAL

Punto experimentales	X ₁ Temperatura (°C)	X ₂ Concentración de glucosa (%p/p)	X ₃ Tiempo (min)	Ganancia de sólido Obtenido (y _i) ^a (%)	Ganancia de sólido Estimado (ŷ _i) (%)
1	30 (-1)	40(-1)	60(-1)	1,57	1,88
2	30(-1)	40(-1)	180(1)	1,84	1,86
3	30(-1)	60(1)	60(-1)	2,99	2,76
4	30(-1)	60(1)	180(1)	1,67	2,13
5	35(0)	33,182(-1,682)	120(0)	1,88	1,51
6	35(0)	66,818(1,682)	120(0)	2,56	2,48
7	35(0)	50(0)	19,092(-1,682)	2,15	2,03
8	35(0)	50(0)	221,27(1,682)	1,81	1,48
9	35(0)	50(0)	120(0)	1,40	1,43
10	35(0)	50(0)	120(0)	1,40	1,43
11	35(0)	50(0)	120(0)	1,46	1,43
12	35(0)	50(0)	120(0)	1,42	1,43
13	40(1)	40(-1)	60(-1)	1,82	1,84
14	40(1)	40(-1)	180(1)	1,38	1,82
15	40(1)	60(1)	60(-1)	2,40	2,72
16	40(1)	60(1)	180(1)	2,31	2,09
17	26,591(-1,682)	50(0)	120(0)	2,40	2,58
18	43,4089(1,682)	50(0)	120(0)	2,74	2,51

^a Valor que representa el promedio de las tres repeticiones
Fuente: Propio

En el cuadro N° 5.8 se representa el Análisis de Varianza (ANVA) para el modelo cuadrático de la ecuación 26.

CUADRO N° 5.8

ANÁLISIS DE VARIANZA (ANVA) DE LA REGRESIÓN PARA LA GANANCIA DE SÓLIDOS

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F_c	<i>Prob >F</i>
Modelo	11,41	7	1,63	19,82	0,0001
Residual	3,78	1	0,082		
Falta de ajuste	3,22	7	0,46	32,10	0,0001
Error puro	0,56	39	0,014		
Total	15,20	53			

Media = 1,98 , Desviación Estándar (SD) = 0,29 , $R^2 = 0,751$, $R^2_{adj} = 0,713$
 CV = 14,51 % , PRESS = 5,38 , $R^2_{pred} = 0,646$, Precisión de ajuste = 12,018

Fuente: Propio

En la evaluación estadística, el Análisis de Varianza del modelo de regresión indica que el modelo cuadrático es altamente significativo, tanto al 95 como al 99% de nivel de confianza, puesto que representa un valor F calculado (19,82) superior al F tabular $F_{(7,39,\alpha=0,05)} = 2,26$ e incluso superior a $F_{(7,39,\alpha=0,01)} = 3,15$. Dicho modelo también mostro una falta de ajuste significativo a niveles de confianza de 95% y 99% pues el valor F calculado (32,10) es superior a los valores tabulados $F_{(7,39,\alpha=0,05)} = 2,26$ y $F_{(7,39,\alpha=0,01)} = 3,15$ respectivamente. Con respecto al Error Puro, teniendo lo expresado por Cornell (2002), la suma de cuadrados fue calculado utilizando las repeticiones en

el punto central del diseño experimental, obteniéndose un valor bajo en comparación con la suma de cuadrados total, presentando así una buena reproducibilidad, coincidiendo con Eren y Kaymak - Ertekin (2007) para la interpretación de esta fuente de variabilidad.

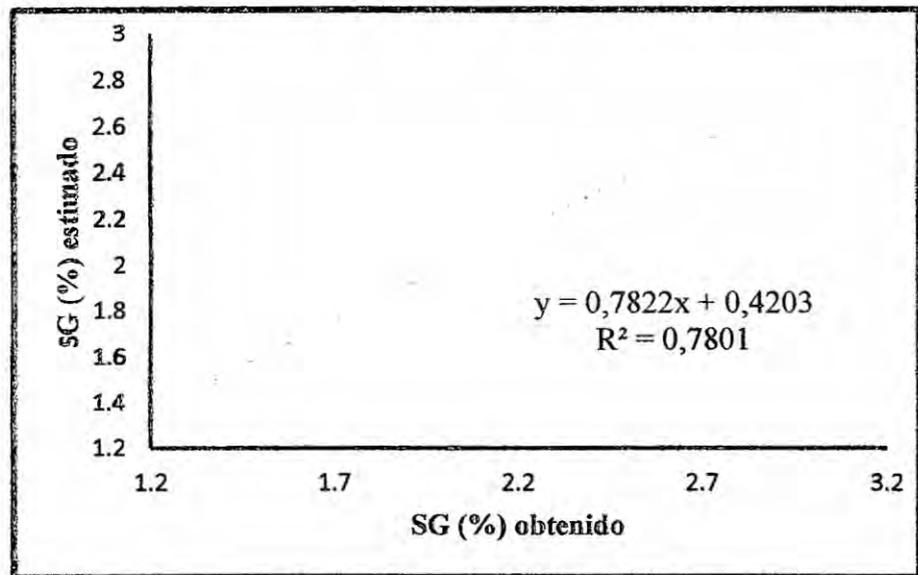
Al evaluar el Coeficiente de Determinación Múltiple (R^2) se pudo establecer que el 75,1% de variabilidad de los datos es explicado por el modelo seleccionado (existe una adecuada correlación entre los valores obtenidos y estimados de las respuesta, tal como se muestra en la figura N° 5.4; siendo así altamente significativo y suficiente para representar la relación existente entre la respuesta (ganancia de sólidos) y las variables estudiadas (temperatura ($^{\circ}\text{C}$), concentración de glucosa (%p/p) y tiempo (min)) coincidiendo con Eren y Kaymak - Ertekin (2007) y Shi *et al.* (2008) para la interpretación del coeficiente de determinación múltiple (R^2).

Eren y Kaymak - Ertekin (2007) mencionan que un valor alto de R^2 no siempre implica que el modelo de regresión sea bueno. Es decir que si adicionamos una variable al modelo se incrementara siempre el R^2 , sin hacer caso de que si la variable adicional es estadísticamente significativa o no. Por esta consideración el R^2_{adj} se usa para evaluar el ajuste del modelo el que debería ser mayor a 90%. El cuadro N° 5.6 muestra que el valor de R^2 (0,751) y R^2_{adj} (0,713) para el modelo no difieren dramáticamente indicando así, que los términos no significativos no tendrían que incluirse en el modelo. Al evaluar el Coeficiente de Variación (CV), se pudo establecer un 14,51% de dispersión relativa de los puntos experimentales del modelo polinomial de segundo orden (SOP).

Del mismo modo, el PRESS, R^2_{pred} y la Precisión de Ajuste, cuyos valores fueron 5,38; 64,6% y 12,018, respectivamente, se pudo establecer que el modelo de ecuación 26 se ajusta adecuadamente a los datos experimentales (cuadro N° 5.7). En tal sentido Eren y Kaymak - Ertekin (2007) y Corzo *et al.* (2008) mencionan que la verificación de ajuste del modelo puede realizarse antes de evaluar los efectos no significativos ($p > 0,05$) y consideran que un bajo PRESS, un R^2_{pred} comparable al R^2_{adj} y una Precisión de Ajuste mayor que 4 indican que el modelo ajustado es adecuado para la predicción (estimación).

FIGURA N° 5.4

RESULTADO DE LA GANANCIA DE SÓLIDO OBTENIDA VERSUS LA GANANCIA DE SÓLIDO ESTIMADO POR EL MODELO DE SEGUNDO ORDEN



Fuente: Propio

En el cuadro N° 5.9 se presenta la prueba de significancia de los coeficientes de la ecuación de regresión cuadrática para la ganancia de sólido. Los coeficientes del modelo estimado, fueron analizados mediante la prueba F de Fischer, con la finalidad de eliminar aquellos que no presentan significancia estadística (nivel de significancia $\alpha=0,05$).

CUADRO N° 5.9

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA DE LOS COEFICIENTES DE LA ECUACIÓN DE REGRESIÓN CUADRÁTICA PARA LA GANANCIA DE SÓLIDO

Termino del modelo	Coefficiente estimado	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F _c	p-value Prob > F
Lineal						
X ₁	1,44	0,014	1	0,014	0,17	0,679
X ₂	-0,019	3,37	1	3,37	40,93	0,0001
X ₃	-0,16	1,02	1	1,02	12,43	0,0010
Interacción						
X ₂ X ₃	-0,15	0,56	1	0,56	6,78	0,0123
Cuadráticos						
X ₁ ²	0,39	5,89	1	5,89	71,59	0,0001
X ₂ ²	0,20	1,53	1	1,53	18,57	0,0001
X ₃ ²	0,12	0,51	1	0,51	6,25	0,0161

Fuente: Propio

En base a las recomendaciones de Cornell (2002), se eliminaron del modelo aquellos coeficientes que resultaron ser no significativos por presentar valores de probabilidad F (*Prob > F*) mayores al nivel de significancia escogido ($\alpha=0,05$). Por lo tanto, los coeficientes asociados a los términos X₂, X₃, X₂X₃, X₁², X₂², X₃² son significativos a un nivel de confianza de 95%, mientras que el coeficiente asociado al X₁X₂, X₁X₃, X₁

es no significativo a un nivel de confianza de 95%, pero X_1 se considera en la ecuación porque X_1^2 es un factor significativo.

En las figuras N° 5.5 y N° 5.6 se muestran las superficie de respuesta y las curvas de contorno, respectivamente, donde se muestran la influencia de la temperatura, concentración de glucosa a y el tiempo sobre la ganancia de sólido.

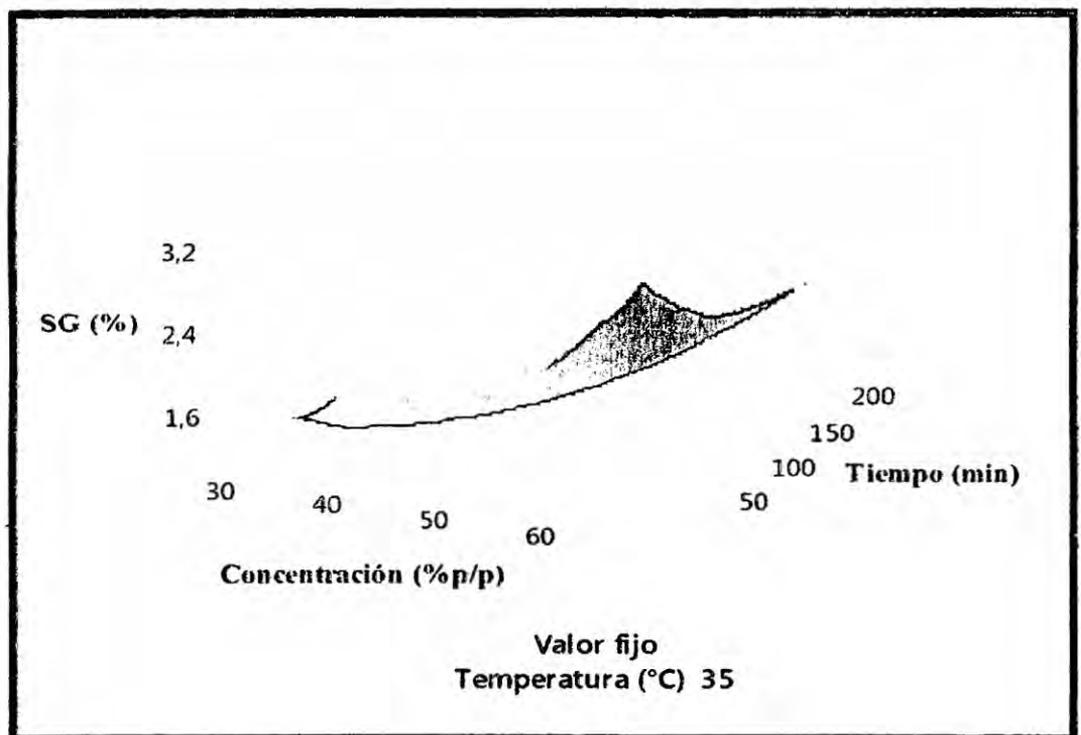
Se puede apreciar que el incremento de la ganancia de sólidos es influenciado por el tiempo de procesamiento y la concentración de la glucosa. Se muestra que para una mayor concentración de glucosa y mayor tiempo de proceso se obtiene mayor ganancia de sólidos. Se ha encontrado que la temperatura tiene una influencia estadística no significativa en la ganancia de sólidos.

Burhan *et al.* (2004); Barrera (2007) afirma que la velocidad de ganancia de sólidos solubles aumentó conforme lo hizo la temperatura del medio, debido al descenso en la permeabilidad selectiva de las membranas celulares, así como la disminución en la viscosidad osmótica empleada. Por otro lado Beristatni *et al.* (1990); Eren y Kaymak-Ertekin (2006) mencionan que el aumento de temperatura con el tiempo de procesamiento eleva la ganancia de sólidos rápidamente. Además menciona que en los tiempos de procesamiento cortos, el aumento de temperatura aumenta la pérdida de agua más que la ganancia de sólidos lo que provoca un aumento en la reducción de peso. Mientras que Torres *et al.* (2013), señala que el tiempo de inmersión favorece la ganancia de sólidos, pero tiempos muy largos van a ocasionar la impregnación de los

sólidos en el producto, un aumento en la concentración de la solución osmótica favorece la ganancia de sólidos, la temperatura eleva favorece también la ganancia de sólidos.

Kaymak-Ertekin y Sultanoglu (2000) concluyeron que la ganancia de sólidos aumenta a medida que la concentración de dextrosa aumenta y Panagiotou *et al.* (2007) mencionan que el aumento de ganancia de sólidos experimentado por el plátano es conforme el incremento de la concentración del soluto (glucosa o sacarosa).

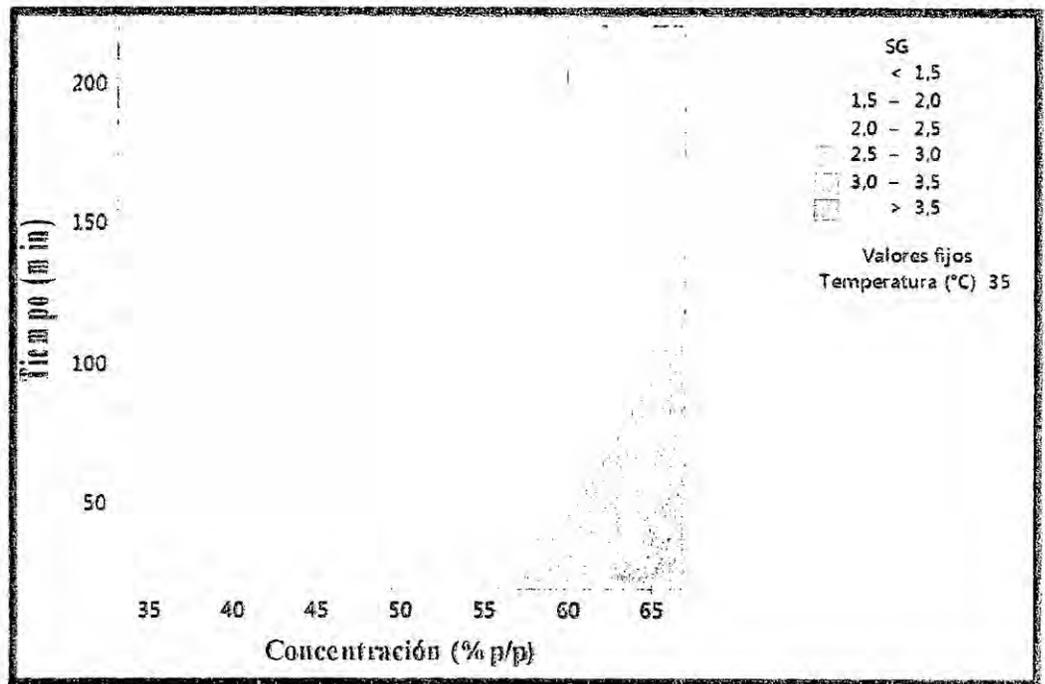
FIGURA N° 5.5
SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA GANANCIA DE SÓLIDO EN EL DISEÑO COMPUESTO CENTRAL



Fuente: Propio

FIGURA N° 5.6

CURVAS DE CONTORNO PARA LA GANANCIA DE SÓLIDO EN EL DISEÑO
COMPUESTO CENTRAL



Fuente: Propio

B: Optimización simultanea de las respuestas

La optimización simultanea se llevó a cabo aplicando la metodología de Deseabilidad Global, determinando restricciones que cumplan las mejores condiciones de deshidratación osmótica de cilindros de manzana y funciones de deseabilidad individual para la pérdida de agua y ganancia de sólidos, las restricciones consideradas fueron las siguientes:

- Pérdida de agua: Mayor o igual a 25%
- Ganancia de sólido: Menor o igual a 2%

Bajo estas restricciones las funciones de deseabilidad individual para la pérdida de agua y ganancia de sólido fueron respectivamente las siguientes:

$$\text{Maximización de la Pérdida de Agua } d_1 = \begin{cases} 0 & \hat{y}_1 < 25 \\ \left(\frac{\hat{y}_1 - 25}{PA_{MAX} - 30}\right)^1 & 25 \leq \hat{y}_1 \leq PA_{MAX} \\ 1 & \hat{y}_1 > PA_{MAX} \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{Minimización de la Ganancia de Sólido } d_2 = \begin{cases} 1 & \hat{y}_2 < GS_{MIN} \\ \left(\frac{2 - \hat{y}_2}{2 - GS_{MIN}}\right)^1 & GS_{MIN} \leq \hat{y}_2 \leq 2 \\ 0 & \hat{y}_2 > 2 \end{cases} \quad (23)$$

Luego de considerar las restricciones y funciones de deseabilidad antes señaladas y haciendo uso del programa estadístico MINITAB 17 se determinó una solución. El cuadro N° 5.10, muestran las condiciones óptimas, deseabilidad global y respuestas estimadas por el *software* para la deshidratación osmótica de la manzana delicia. Los niveles de las variables correspondientes al tratamiento óptimo son:

- Temperatura: 37,12 °C
- Concentración de glucosa: 59 %p/p
- Tiempo: 217,3 min

CUADRO N° 5.10

CONDICIONES ÓPTIMAS, RESPUESTAS ESTIMADAS Y DESEABILIDAD GLOBAL OBTENIDAS LUEGO DE LA OPTIMIZACIÓN SIMULTANEA DE LAS RESPUESTAS

N°	X ₁ Temperatura (°C)	X ₂ Concentración de glucosa (% p/p)	X ₃ Tiempo (min)	Pérdida de agua (%)	Ganancia de sólidos (%)	D
1	37,1	59	217,3	27,32	1,75	0,81

Fuente: Propio

C: Verificación de los niveles óptimos de las variables

La comparación entre los valores obtenidos (bajo las condiciones óptimas de proceso mostradas en el cuadro N° 5.10) se obtuvieron, para la pérdida de agua es de 27,95% y para la ganancia de sólidos es de 1,70%, para un nivel 95% de confianza, estadísticamente no hay diferencia significativa entre los valores estimados y los valores obtenidos, mostrados en el cuadro N° 5.11.

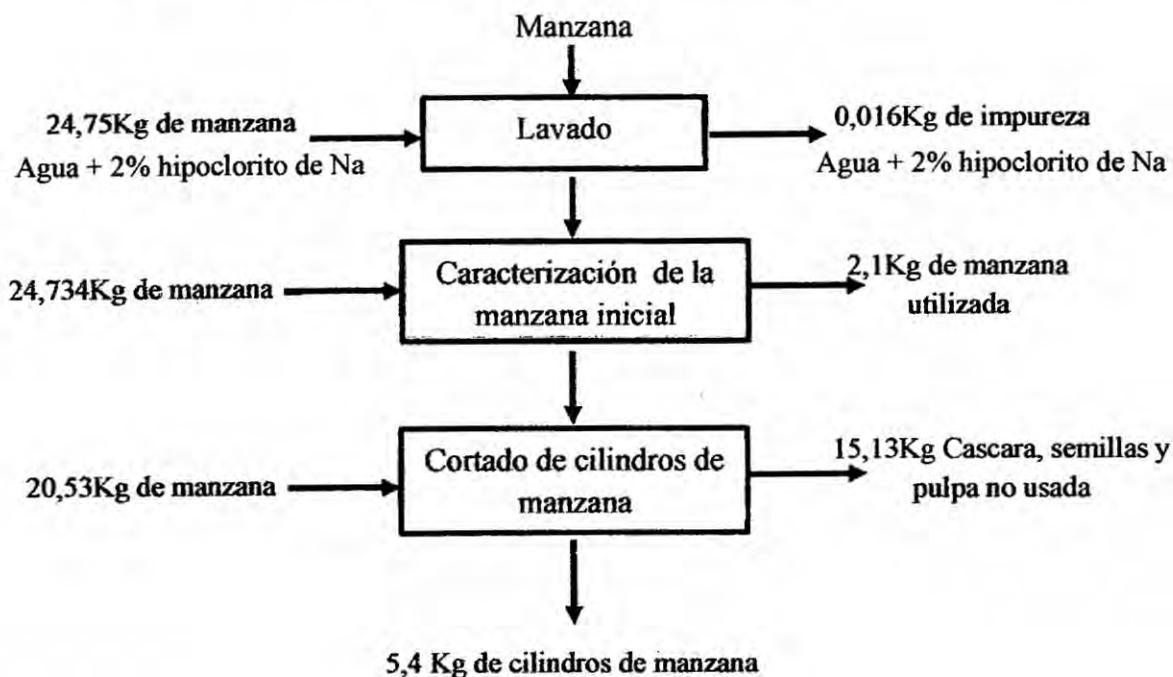
CUADRO N° 5.11

COMPARACIÓN DE LOS VALORES ESTIMADOS Y OBTENIDOS PARA LAS RESPUESTAS EN EL PUNTO ÓPTIMO

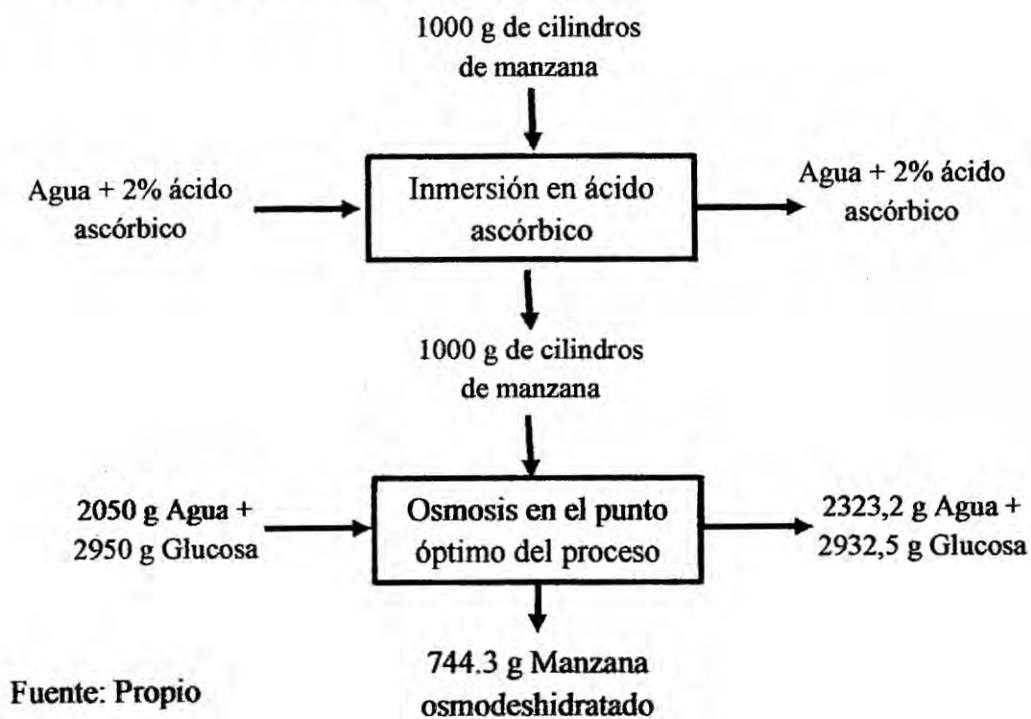
	Pérdida de agua	Ganancia de sólido
Estimados	27,32 %	1,75 %
Obtenidos	27,95%	1,70%

Fuente: Propio

D. Balance de masa general del proceso experimental



E. Balance de masa del proceso



Fuente: Propio

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados

- Hipótesis General

H₀: La inmersión de cilindros de manzana en soluciones acuosas de glucosa (concentraciones 40-60% en peso) por periodos de tiempo (60-180min) y a varias temperaturas (30-40°C) permitirá la deshidratación osmótica de éstas.

H₁: La inmersión de cilindros de manzana en soluciones acuosas de glucosa (concentraciones 40-60% en peso) por periodos de tiempo (60-180min) y a varias temperaturas (30-40°C) no permitirá la deshidratación osmótica de éstas.

- Los resultados muestran que a una temperatura de 37,1°C; concentración de una solución acuosa de glucosa de 59% en peso y un tiempo de inmersión de 217,3min, se obtuvo la condición óptima para la deshidratación osmótica de cilindros de manzana, permitiendo una máxima pérdida de agua y ganancia de sólidos mínimas. Por lo tanto se acepta la hipótesis H₀ (Hipótesis nula) planteada.

- Hipótesis Específica 1

H₀: La temperatura de proceso, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa aceleran de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de cilindros de manzana delicia.

H₁: La temperatura de proceso, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa no aceleran y/o afectan de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de cilindros de manzana delicia.

- Como se muestra en la figura N° 5.3 y 5.6 cuando existe mayor temperatura, concentración de glucosa y tiempo de inmersión se obtiene mayor pérdida de agua y mayor ganancia de sólidos, lo que demuestra que hay una mayor transferencia de masa en el proceso de deshidratación osmótica. Entonces se puede decir que la hipótesis H₀ (hipótesis nula) no se rechaza.

- **Hipótesis Específica 2**

H₀: El diseño experimental y el modelo de ajuste para los datos obtenidos se expresan como una ecuación polinomial de segundo orden en función de la temperatura, tiempo de procesamiento y concentración de glucosa.

H₁: El diseño experimental y el modelo de ajuste para los datos obtenidos se no expresan como una ecuación polinomial de segundo orden en función de la temperatura, tiempo de procesamiento y concentración de glucosa.

- La hipótesis H₀ no se rechaza debido a que el diseño experimental y el modelo de ajuste se expresan en ecuaciones polinomiales de segundo orden en función de los factores (temperatura, concentración de glucosa y tiempo de inmersión).

Ecuación polinomial para la pérdida de agua:

$$\hat{y} = -12,8 - 0,295x_1 + 0,47x_2 - 0,099x_3 - 0,00818x_1^2 - 0,0073x_2^2 - 0,000292x_3^2 \\ + 0,01895x_1x_2 + 0,003967x_1x_3 + 0,001706x_2x_3$$

Ecuación polinomial para la ganancia de sólidos:

$$\hat{y} = 23,71 - 1,107x_1 - 0,1415x_2 + 0,00232x_3 + 0,01576x_1^2 + 0,002007x_2^2 + 0,000032x_3^2 - 0,000254x_2x_3$$

6.2 Contratación de resultados con otros estudios similares

6.2.1 Análisis de las características Físico-Químicas de la manzana delicia

Se puede observar que los datos obtenidos en las características físico-químicas de la manzana delicia (*Malus Domestica B.*) están dentro de lo mencionado por Badui (2006). Además la cantidad de sólidos solubles, pH y la relación azúcar/acidez (índice de madurez) coinciden con lo obtenido por Wu *et al.* (2007), reportan $13,40 \pm 1,55\%$, $3,79 \pm 0,12$ y $33,78 \pm 6,59$ respectivamente. Similares resultados fueron reportados por Konopacka y Pocharski (2007), además indican que no habrán variaciones significativas de éstas características por un periodo de dos meses bajo condiciones de 90% HR a 2-5°C, lo cual es importante tener en cuenta para la conservación de todo el periodo de duración de los experimentos.

6.2.2 Análisis de la optimización de los cilindros de manzana delicia

Aunque se han realizado trabajos de optimización por MSR en diferentes alimentos y trabajos de deshidratación osmótica en manzana, no se puede hacer comparaciones con los resultados obtenidos en dichas investigaciones y en este estudio porque son

procesos diferentes y por consiguiente la modelación y optimización no son comparables. Con este estudio se presenta un nuevo aporte al proceso de **deshidratación osmótica en manzana.**

Fermín y Corzo (2005) utilizaron el método grafico RSM convencional y fueron efectivos en la determinación de la zona óptima dentro de la región experimental seleccionada para la **deshidratación osmótica de melón.** Las condiciones óptimas son pulso de vacío (740 mbar), concentración de la solución osmótica (49,5-52,5°Brix) y el tiempo de deshidratación (75 a 84 min).

En la deshidratación osmótica de papa Eren y Kaymak-Ertekin (2006) obtuvieron las condiciones óptimas para la máxima pérdida de agua y la reducción de peso y **ganancia de sólidos y actividad de agua mínimo que corresponden a la temperatura de 22°C,** la concentración de Sacarosa de 54,5%, la concentración de sal 14% y tiempo de proceso de 329 min, con el fin de obtener: pérdida de agua de 59,1(g/100g de muestra fresca), reducción de peso de 52,9 (g/100g de muestra fresca), ganancia de sólidos 6,0 (g/100g de muestra fresca) y actividad de agua de 0,785.

Torres *et al.* (2013) realizaron un estudio en la deshidratación osmótica de espárrago donde obtuvieron los valores óptimos del proceso al superponer las figuras de contorno, obteniéndose valores de temperatura (36-42°C), concentración (30-32%) y tiempo de inmersión (350-370 min), obteniendo una humedad final de (68,87%) y la

ganancia de sólidos fue de (0,148g ó 14,8%) en el proceso de deshidratación osmótica. Mientras que Ozdemir *et al.* (2008) utilizaron la metodología de superficie de respuesta y métodos gráficos de optimización para la localización de las condiciones óptimas de procesamiento de la deshidratación osmótica de pimientos verdes cortados en cubos, donde lograría reducir el contenido original de agua del producto en aproximadamente 23,3%.

VII. CONCLUSIONES

La zona óptima o de convergencia de una máxima pérdida de agua (27,3%) y ganancia de sólidos mínima (1,75%) se logró con 37,1°C de temperatura, 59% en peso de solución acuosa de glucosa y 217,3 min de tiempo de inmersión.

Se puede concluir a partir de los resultados de esta investigación, la temperatura, concentración de glucosa y el tiempo de inmersión fueron factores importantes en la deshidratación osmótica, debido que, a mayores niveles de los factores se obtiene una mayor deshidratación porque existe mayor transferencia de masa.

El modelo del diseño experimental fue expresado en ecuaciones polinomiales de segundo orden en función de la temperatura, tiempo de procesamiento y concentración de glucosa para la pérdida de agua y la ganancia de sólidos.

Este estudio permitió modelar la pérdida de agua y ganancia de sólidos que ocurren durante la deshidratación osmótica de manzana en forma cilíndrica y optimizar adecuadamente dichas respuestas mediante la MSR.

VIII. RECOMENDACIONES

Realizar un estudio de la deshidratación osmótica de manzana incluyendo otros factores como la presión, diferentes agentes osmóticos que puede acelerar mucho más el proceso de deshidratación osmótica manteniendo la calidad del producto final.

Realizar posteriormente el proceso de secado por aire caliente de las manzanas osmodeshidratadas en el punto óptimo de la deshidratación osmótica y ver cómo afecta éste proceso en las características de la manzana deshidratada.

Evaluar el tiempo de vida en anaquel de las manzanas osmodeshidratadas con pruebas fisicoquímicas y sensoriales.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZUARA, E.; BERISTAIN, CI. Y GUTIERREZ, GF. **Osmotic Dehydration of Apples by Immersion in Concentrated Sucrosa/Maltodextrin Solutions.** *Journal of Food Processing Preservation.* Vol. 26: 295-306. 2002.
2. BADUI DERGAL, S. **Química de los Alimentos.** México. Editorial Pearson Educación. Cuarta edición. 2006.
3. BARBOSA-CÁNOVAS, G. Y VEGA, H. **Dehydration of Foods.** United State of America. Editorial Chapman & Hall. 1996.
4. BARRERA, MC. **Estudio de la Deshidratación Osmótica y del Secado por aire Caliente como Operaciones de Estabilización de Productos de Manzana (var. *Granny Smith*) Enriquecidos en Calcio.** Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 2007.
5. BERISTATNI, CI.; AZUARA, E.; CORTES, R. Y GARCIA, HS. **Mass Transfer During Osmotic Dehydration of Pineapple rings.** *International Journal of Food Science and Technology.* Vol. 25: 576-582. 1990.
6. BOX, G. Y DRAPER, N. **Empirical Model-Building and Response Surfaces.** *John Wiley & Sons, Inc.* New York-USA. 1987.
7. BOX, G Y WILSON, K. **On the Experimental Attainment of Optimum Conditions.** *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological),* Vol. 13, No. 1:1-45. 1951.

8. BOYER, J; LIU RH. **Apple phytochemicals and their health benefits.** *Nutrition Journal*. Vol. 3: 5. May 2004.
9. BURHAN, MU.; AINSWORTH, P.; IBANOGLU, S. **Evaluation of Mass Exchange during Osmotic Dehydration of Carrot Using Response Surface Methodology.** *Journal of Food Engineering*. Vol. 65: 473-477. 2004.
10. CANO-CHAUCA, M; RAMOS, AM; STRINGHETA, PC; PEREIRA, AM. **Drying curves and water activity evaluation of dried banana.** *Proceeding of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil*. Vol. C: 2013-2020. August 2004.
11. COLINA IREZABAL M. **Deshidratación de alimentos.** México. Editorial trillas. Primera edición. 2010.
12. CONWAY, JF.; CASTAIGNE, G.; PICARD, et X. Y VOVAR. **Mass transfer considerations in the osmotic dehydration of apples.** *Canadian Institute of Food Science and Technology*. Vol. 16. N° 1: 025-029. 1983.
13. CORNELL, J. **Experiments with Mixtures: Designs Models and Analysis of Mixture Data.** New York. John Willey and Sons, Inc. Third Edition. 2002.
14. CORZO, O; CENTENO, AE. **Superficies de respuesta de la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica del melón (*Cucumis melo*, variedad Edisto).** *Revista de la Facultad de Farmacia. Universidad de Oriente*. Vol. 45. (1): 54-60. 2003.

15. CORZO, O.; BRACHO, N.; VÁSQUEZ, A. Y PEREIRA, A. **Optimization of a thin layer drying process for coroba slices.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 85: 372-380. 2008.
16. CORZO, O. Y GOMEZ, E. **Optimization of Osmotic Dehydration of Cantaloupe.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 64: 213-219. 2004.
17. DOMÍNGUES, M. **Estudio de la variabilidad morfológica en el banco nacional de germoplasma de manzano.** 2008.
18. EREN, I; KAYMAK-ERTEKIN, F. **Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 79: 344-352. 2007.
19. ERLE, U; SCHUBERT, H. **Combined osmotic and microwave-vacuum dehydration of apples and strawberries.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 49: 193-199. 2001.
20. FERNANDO, FA; LINHARES, FE; RODRIGUES, S. **Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple.** *Ultrasonics Sonochemistry.* Vol. 15: 1049-1054. 2008.
21. FERMIN, W.; CORZO, O. **Optimization of Vacuum Pulse Osmotic Dehydration of Cantaloupe using Response Surface Methodology.** *Journal of Food Processing and Preservation.* Vol. 29: 20-32. 2005.
22. FERRANDO, M; SPIESS, WEL. **Cellular response of plant tissue during the osmotic treatment with sucrose, maltose, and trehalose solutions.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 49: 115-127. 2001.

23. GUTIERREZ, H Y DE LA VARA, R. **Análisis y diseño de experimentos.** México. Editorial Mc Graw Gill Interamericana Editores S.A. Primera edición. 2004.
24. IBARZ, A. Y BARBOSA-CÁNOVAS, G. **Operaciones Unitarias en la Ingeniería de los Alimentos.** España. Editorial Mundi Prensa. 2005.
25. KARATHANOS, VT. **Determination of water content of dried fruits by drying kinetics.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 39: 337-344. 1999.
26. KAYMAK-ERTEKIN, F; SULTANOGLU, M. **Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 46: 243-250. 2000.
27. KONOPACKA, D Y PLOCHARSKI, W. **Effect of raw material storage time on the quality of Apple.** *Drying technology.* 19, issue 3&4. 2001.
28. KOWALSKA, H. Y LENART, A. **Mass Exchange During Osmotic Pretreatment of Vegetables.** *Journal of Food Engineering.* Vol. 49: 137-140. 2001.
29. MANDALA, IG; ANAGNOSTARAS, EF; OIKONOMOU, CK. **Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics.** *Journal of Food Engineering* Vol. 69: 307-316. 2005.
30. MAURO, MA.; SHIGEMATSU, E.; EIKE, NM. Y MINURA, M. **Osmotic Dehydration an Air Drying Kinetic of Star Fruit (*Averrhoa Carambola L.*).** *UNESP, Sao Paulo State University Department of Food Engineering an Technology. 2° Mercosur Congress on Chemical Engineering.*

31. MEZA V, JA; QUINTANA B, ML; MEZA V, M. **Aplicación de jugo de piña como agente inhibidor del oscurecimiento enzimático en rodajas de plátano deshidratadas.** *Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango.* 2000.
32. MONTGOMERY, DC. **Diseño y Análisis de Experimentos.** Editorial Limusa S.A. de C.V. Segunda edición. Mexico. 2004.
33. MOURA, SC; BERBARI, SA; GERMER, SP; ALMEIDA, ME; FEFIM, DA. **The determination of dehydration apple shelf-life using accelerated assays.** *Cienc. Tecnol. Aliment., Campinas.* Vol. 27. (1): 141-148. 2007.
34. Official Methods of Analysis of AOAC International. In T.R Mulvaney (Ed). 1995.
35. OZDEMIR, M; OZEN, BF; DOCK, LL; FLOROS, JD.. **Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology.** *LWT-Food Science and Technology.* Vol. 41: 2044-2050. 2008.
36. PANAGIOTOU, NM.; KARATHANOS, VT.; MAROULIS, ZB. **Effect of Osmotic Agent on Osmotic Dehydration of Fruits.** *Drying Technology: An International Journal.* Vol. 17:1-2, 175-189. 2007.
37. PUENTE, L.; LASTRETO, S.; MOSQUEDA, MJ.; SAAVEDRA, J.; CORDOVA, A.. **Influencia de un Pre-tratamiento Osmótico sobre la Deshidratación por Aire Caliente de Manzana *Granny Smith*.** *Dyna.* Vol. 164: 274-283. 2010.

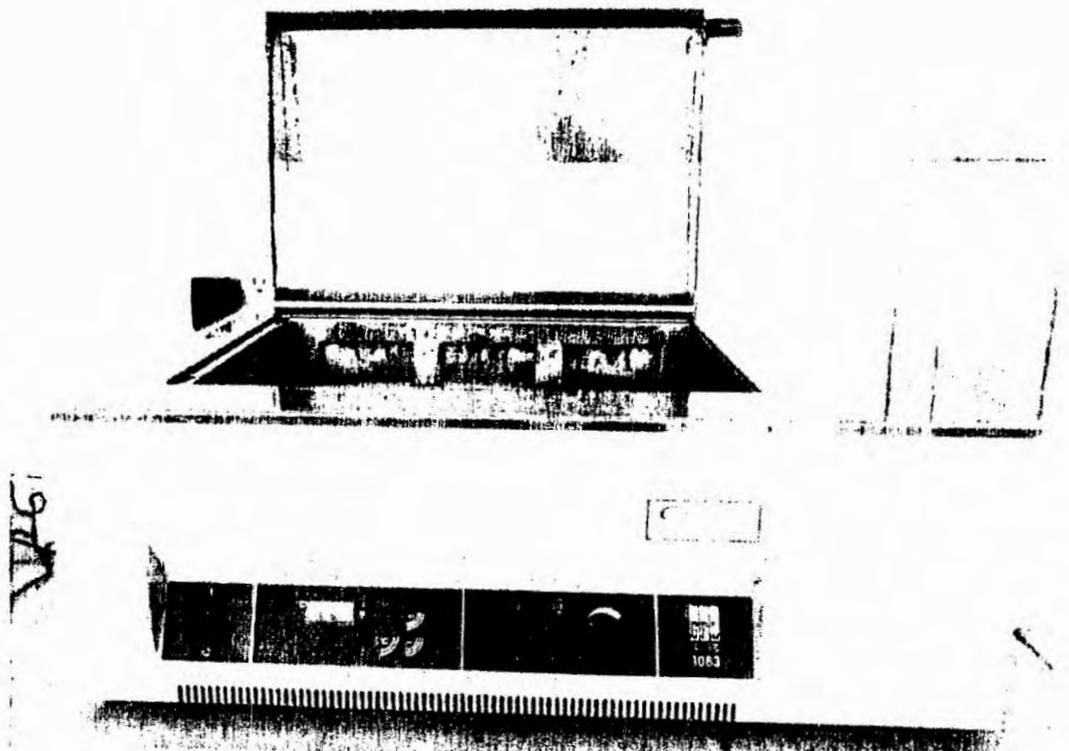
38. RASTOGI, NK; RAGHAVARAO, KSMS; NIRANJAN, K; KNORR, D. **Recent developments in osmotic dehydration: methods to enhance mass transfer.** *Trends in Food Science & Technology*. Vol. 13: 48-59. 2002.
39. RAVI. R. Y SUSHEELAMMA, NS. **Simultaneous Optimization of a Multi-response System by Desirability Function Analysis of Boondi-making: A Case Study.** *Journal of Food Science*. Vol. 70. Issue 8. 2005.
40. ROCCA, PD. **Secado de alimentos por métodos combinados: Deshidratación osmótica y secado por microondas y aire caliente.** *Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Buenos Aires*. 2010.
41. SHI, Q.; XUE, C.; ZHAO, Y.; LI, Z. Y WANG, X. **Optimization of Processing Parameters of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology.** *Journal of food Engineering*. Vol. 87: 74-81. 2008.
42. SIN, HN.; YUSOF, S.; SHEIKH ABDUL HAMID, N.; ABD RAHMAN, R. **Optimization of Enzymatic Clarification of Sapodilla Juice Using Response Surface Methodology.** *Journal of Food Engineering*. Vol. 73: 313-319. 2006.
43. SINGH, RP. Y HELDMAN, DR. **Introduction to Food Engineering.** USA. Food Science and Technology International Series. Fourth Edition. 2009.
44. SIQUEIROS, A. **Aplicación de la Metodología de Superficie de Respuesta para el Mejoramiento de la Calidad del Aceite de Soya.** *Universidad de Sonora-División de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Matemáticas*. 2004.

45. TELES, UM; FERNANDES, FA; RODRIGUES, S; LIMA, AS; MAIA, GA; FIGUEIREDO, RW. **Optimization of osmotic dehydration of melons followed by air-drying.** *International Journal of Food Science and Technology*. Vol. 41: 674-680. October 2005.
46. TORRES, D.; SALVADOR, D.; BALTAZAR, F. Y SICHE, R. **Optimización de las Condiciones de Deshidratación Ósmotica de Esparrago (*Asparragus officinalis*) Utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta.** *Agroindustrial Science*. Vol. 3: 1-12. Abril 2013.
47. TORRINGA, E.; ESVELD, E.; SCHEEWE, I.; BERG, R. Y BARTELS, P. **Osmotic Dehydration as a Pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms.** *Journal of Food Engineering*. Vol. 49: 185-191. 2001.
48. UREÑA, MILBER. **Obtención de alimentos Modelo a partir de mezclas de bentonita: glicerol: agua para estudios de tratamientos térmicos.** *Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia*. España. 1990.
49. WU, J; GAO, H; ZHAO, L; LIAO, X; CHEN, F; WANG, Z; HU, X. **Chemical compositional characterization of some apple cultivars.** *Food Chemistry*. Vol. 103: 88-93. 2007.
50. XUE KEQING. **Optimización del secado por aire caliente de pera (Variedad Blanquilla).** *Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia*. España. 2004.

ANEXOS

ANEXO N°1

BAÑO MARIA UTILIZADO PARA LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CILINDROS DE MANZANA



Laboratorio instrumentación e investigación de la Facultad de Industrias
Alimentarias-UNALM

Fuente: Propio

ANEXO N°2

DISEÑO COMPUESTO CENTRAL (DCC)

Puntos experimentales	(X ₁) Temperatura (°C)	(X ₂) Concentración %(p/p)	(X ₃) Tiempo (min)
1	-1 (30)	-1 (40)	-1 (60)
2	-1 (30)	-1 (40)	1 (180)
3	-1 (30)	1 (60)	-1 (60)
4	-1 (30)	1 (60)	1 (180)
5	1 (40)	-1 (40)	-1 (60)
6	1 (40)	-1 (40)	1 (180)
7	1 (40)	1 (60)	-1 (60)
8	1 (40)	1 (60)	1 (180)
9	-1,68 (26,6)	0 (50)	0 (120)
10	1,68 (43,4)	0 (50)	0 (120)
11	0 (35)	-1,68 (33,2)	0 (120)
12	0 (35)	1,68 (66,8)	0 (120)
13	0 (35)	0 (50)	-1,68 (19,1)
14	0 (35)	0 (50)	1,68 (221,8)
15	0 (35)	0 (50)	0 (120)
16	0 (35)	0 (50)	0 (120)
17	0 (35)	0 (50)	0 (120)
18	0 (35)	0 (50)	0 (120)

Fuente: Propio siguiendo la metodología de Box y Wilson, 1951

ANEXO Nº3
ESQUEMA EXPERIMENTAL PARA OPTIMIZAR LA DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA DE CILINDROS DE MANZANA
APLICANDO EL MÉTODO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

OPERACIONES ETAPAS MSR	MATERIA PRIMA, SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN, LAVADO Y DESINFECTADO, CORTADO E INMERSIÓN EN ACIDO ASCORBICO	DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA	CARACTERIZACIÓN
<p align="center">DISEÑO DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA, OPTIMIZACIÓN SIMULTANEA DE LAS RESPUESTAS</p>	<p align="center">Cilindros de manzana</p>	<p align="center"> Temperatura (°C): 26,6, 30, 35, 40, 43,4 Punto estrella: 33,2, 50, 40, 60, 60, 180, 180, 120, 120, 120, 120, 60, 180, 60, 180, 120, 120 Concentración (%p/p): 33,2, 50, 40, 60, 50, 40, 60, 50, 66,8 Tiempo (min): 19,1, 120, 120, 60, 180, 60, 180, 120, 120, 120, 60, 180, 60, 180, 120, 120, 221,8 Niveles óptimos </p>	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis proximal de humedad • Sólidos totales • Pérdida de agua • Ganancia de sólidos
<p align="center">CONTOLES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis proximal de humedad • Sólidos solubles • Sólidos totales • Acidez titulable 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos totales • Pérdida de agua • Ganancia de sólidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis proximal de humedad • Sólidos totales 	

Fuente: Propia siguiendo el método de Box y Wilson, 1951. Método Superficie de Respuesta Compuesto Central

ANEXO N° 4

MATRIZ DE CONSISTENCIA- PROYECTO DE INVESTIGACION

Optimización de la deshidratación osmótica de manzana (*Malus domestica B.*) por la metodología de superficie de respuesta.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLE	OPERACIONALIZACION DE LA VARIABLE	METODOLOGIA	POBLACION
<p>Problema general</p> <p>¿Cuáles son los parámetros óptimos de temperatura, tiempo de proceso y concentración de glucosa que debería tener el proceso de deshidratación osmótica de manzana?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Encontrar las condiciones óptimas de temperatura, tiempo de proceso y concentración de glucosa de la deshidratación osmótica de manzana (<i>Malus domestica B.</i>)</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>La inmersión de cilindros de manzana en soluciones acuosas de glucosa (concentraciones 40-60% en peso) por períodos de tiempo (60-180min) y a varias temperaturas (30-40°C) permitirá la deshidratación osmótica de éstas.</p>	<p>Variable Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> Concentración de la glucosa. Temperatura de proceso. Tiempo de proceso. 	<p>Variable Dependiente:</p> <p>Concentración de glucosa: Se determinará previo cálculo.</p> <p>Temperatura de proceso: Se utilizará un equipo de baño termostático con sensor de temperatura.</p> <p>Tiempo de proceso: Se utilizará un cronómetro.</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>Este proyecto se enfocará en un tipo de investigación explicativo experimental por que se estudiará el efecto que pueda tener los parámetros que influyen en la optimización de la deshidratación osmótica.</p> <p>Diseño de la investigación</p> <p>El diseño de la investigación será determinada por la metodología de superficie de respuesta que estimara los efectos principales de las variables independientes del proceso como temperatura (X_1), concentración de glucosa (X_2) y el tiempo de proceso (X_3) sobre la deshidratación osmótica de la manzana en donde se evaluará la pérdida de agua (WL) y ganancia de sólidos (SG). El dominio experimental explorado se seleccionó a través de estudio de la literatura y ensayos previos.</p> <p>Un diseño central compuesto se utilizó para el diseño de los datos experimentales. El centro se ejecuta por cuatro veces para proporcionar un medio para estimar el error experimental y una medida de la falta de ajuste.</p> <p>Una vez obtenido el modelo de ajuste que permitirá maximizar la deshidratación osmótica de la manzana, se obtendrá superficies de contornos y que determinará los valores óptimos de las variables independientes.</p>	<p>La población: Manzana variedad <i>delicia</i> (<i>Malus domestica B.</i>) producido en el valle de Yauyos-Distrito San Lorenzo de Putinza en el periodo de Agosto- Octubre del 2013.</p> <p>La muestra: Se requerirá muestras en forma cilíndrica con diámetro de 18mm y 11mm de altura. Por lo que se necesitará un tamaño de muestra de</p> $n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot N \cdot p \cdot q}{t^2(N-1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$ <p>Donde: n = tamaño muestral N = 4000 Kg/semana, tamaño de la población Nivel de confianza $(1 - \alpha) = 95\%$, $Z_{\alpha=0.05} = 1.96$ $p = 0.7$; prevalencia esperada del parámetro $q = 1 - p$ $t = 0.18$; error que se prevee cometer $n = 25,75$ Kg de muestra</p>
<p>Problemas específicos</p> <p>¿Cómo influye la temperatura, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa en la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de manzana <i>delicia</i>?</p>	<p>Objetivos específicos</p> <p>Evaluar los efectos de la temperatura, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa en los fenómenos de transferencia de masa durante la deshidratación osmótica de manzana <i>delicia</i>.</p>	<p>Hipótesis específicos</p> <p>La temperatura de proceso, el tiempo de procesamiento y la concentración de glucosa aceleran durante la masa durante la deshidratación osmótica de manzana <i>delicia</i>.</p>	<p>Variable Dependiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> Deshidratación osmótica. 	<p>Variable Dependiente:</p> <p>Deshidratación osmótica: Se determinará dos parámetros. Pérdida de agua: Una balanza analítica para la medición de peso y se determinará la humedad y su variabilidad en el tiempo.</p> <p>Ganancia de sólidos: Se realizará lectura directa en refractómetro para el %Brix.</p>	<p>Una vez obtenido el modelo de ajuste que permitirá maximizar la deshidratación osmótica de la manzana, se obtendrá superficies de contornos y que determinará los valores óptimos de las variables independientes.</p>	
<p>¿Cuál es el diseño experimental y el modelo de ajuste a utilizar para los datos obtenidos?</p>	<p>Encontrar el diseño experimental y el modelo de ajuste que se utilizará para los datos obtenidos.</p>	<p>El diseño experimental y el modelo de ajuste para los datos obtenidos se expresan como una ecuación polinomial de segundo orden en función de la temperatura, tiempo de procesamiento y concentración de glucosa.</p>				

APÉNDICE

GLOSARIO

Optimización: Es la selección de un mejor elemento (con respecto a algunos criterios) a partir de un conjunto de alternativas disponibles. Consiste en maximizar o minimizar una función real por la elección sistemática de los valores de entrada desde el interior de un conjunto permitido y calculando el valor de la función. La técnica de optimización busca los mejores valores “disponibles” de una función objetivo a partir de un dominio definido dado (o un conjunto de restricciones), incluyendo una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y diferentes tipos de dominios.

Metodología de superficie de respuesta: Es un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas útiles para el desarrollo, mejora y optimización de procesos. Técnica que permite al experimentador determinar la relación entre la respuesta y las variables independientes.

Diseño compuesto rotatable: Consiste en un diseño factorial completo con puntos al centro o un diseño factorial fraccionado con resolución, agregado puntos estrella usados para modelar la curvatura con respecto a cada factor.

Deshidratación osmótica: Técnica que permite eliminar parcialmente el agua de los tejidos de los alimentos por inmersión en una solución acuosa hipertónica.

Solución hipertónica: Contiene una alta concentración de soluto en relación con la concentración del citoplasma. En este caso el agua se difunde desde el interior de la célula (medio hipotónico) al exterior. La célula perdería agua deshinchándose.

Glucosa: Es un carbohidrato, es el azúcar simple más importante en el metabolismo humano. La glucosa es una de las principales moléculas que sirven como fuente de energía para las plantas y animales.