



## Optimización de las condiciones de deshidratación osmótica de espárrago (*Asparragus officinalis*) utilizando la metodología de superficie de respuesta

*Optimizing conditions of osmotic dehydration asparagus (*Asparragus officinalis*), using response surface methodology*

David Torres Celis; Daniel Salvador Rodríguez; Roger Baltazar Flores; Raúl Siche \*

*Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú.*

Recibido 02 octubre 2012; aceptado 19 abril 2013.

### RESUMEN

Se realizó un Screening utilizando un diseño factorial fraccionado, las variables independientes fueron la concentración de NaCl (4 – 20%), temperatura (20 – 50°C), tiempo de inmersión (10 – 300 min), velocidad de agitación (0 – 150 rpm) y una relación solución/producto (10/1 – 30/1) y como variables dependientes la humedad final y la ganancia de sólidos. Las variables significativas ( $p < 0.05$ ) fueron la concentración de NaCl, la temperatura y el tiempo de inmersión. Luego se utilizó un Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR) para la segunda etapa de optimización. Los modelos obtenidos para la humedad final y ganancia de sólidos fueron validados a través del Análisis de Regresión y ANVA (significativo en ambos casos). Se determinó los valores óptimos ( $T^{\circ} = 36 - 42^{\circ}\text{C}$ , concentración = 30 - 32% y tiempo de inmersión = 350 a 370 min) que minimizan el contenido de humedad final y maximizan la ganancia de sólidos. Finalmente a condiciones óptimas fueron obtenidos los valores de difusividad efectiva media de  $7.89342 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para el agua y  $6.34758 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para la Ganancia de Sólidos.

**Palabras clave:** Screening, Diseño Central Compuesto Rotacional, difusividad efectiva media.

### ABSTRACT

Screening was performed using a fractional factorial design, the independent variables were the concentration of NaCl (4-20%), temperature (20-50 °C), soak time (10-300 min), agitation speed (0 - 150 rpm) and a solution / product (10/1 - 30/1) as dependent variables and the final moisture and solids gain. Significant variables ( $p < 0.05$ ) were the NaCl concentration, temperature and immersion time. Then we used a Central Composite Rotational Design (DCCR) for the second stage of optimization. The models obtained for final moisture and solid gain were validated through regression analysis and ANOVA (significant in both cases). Was determined optimum values ( $T^{\circ} = 36 - 42^{\circ}\text{C}$ , concentration = 30 - 32% and soak time = 350-370 min) to minimize the final moisture content and maximize solids gain. Finally, optimum conditions were obtained values of mean effective diffusivity  $7.89342 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$  for water and  $6.34758 \times 10^{-10} \text{ m}^2 / \text{s}$  for solids gain.

**Keywords:** Screening, Central Composite Rotational Design, mean effective diffusivity.

### 1. Introducción

Una alternativa del hombre para aprovechar más y mejor los alimentos, es conservarlos mediante la disminución del contenido de agua. En la

actualidad existe una amplia tendencia al desarrollo de técnicas de conservación de alimentos que permitan obtener productos de elevada calidad nutricional manteniendo sus características organolépticas.

\*Autor para correspondencia.

Email: rsiche@unitru.edu.pe (R. Siche).

Mediante la deshidratación se reducen contenido de agua, aumentando la eficacia de los procesos de transporte y almacenaje. Además la deshidratación de un alimento produce a menudo otro más apto para el consumo (Singh y Panesar, 2010).

La deshidratación osmótica consiste en la extracción de agua de un producto que se sumerge en una disolución hipertónica a un tiempo y temperatura específicos. Esto debe a la fuerza impulsora que se crea por la alta presión osmótica de la disolución o por el gradiente de concentración entre la disolución y el sólido (+). Durante la DO, la fase líquida del alimento está separada de la disolución osmótica por las membranas celulares, donde, el equilibrio entre fases se logra cuando se igualan los potenciales químicos a ambos lados de la membrana lo que depende principalmente de la reducción de la actividad del agua dentro de las membranas celulares del alimento (Waliszewski *et al.*, 2002) la cual ocurre por el intercambio de agua y de sólidos a través de la membrana (Sablani y Rahman, 2003).

El proceso de DO se caracteriza por períodos dinámicos y períodos de equilibrio. La cinética del proceso de DO está determinada por la aproximación al equilibrio, por la presión osmótica diferencial inicial entre el alimento y el agente osmótico y por las velocidades de difusión del agua y del soluto (Azuara *et al.*, 1998) y éstas velocidades de difusión están controladas por el transporte de humedad en el producto y por la estructura de la fruta (porosidad). El agua puede difundirse de 10 a 100 veces más rapidez que los solutos (glucosa, sacarosa, fructosa, etc.) en un rango de temperaturas entre 45° y 70° C. a través de la membrana celular (Sablani y Rahman, 2003). Mejora la cinética de DO, haciendo vacío durante todo el proceso de DO (VOD), o pulsos de vacío (PVOD) ocurre, un mecanismo hidrodinámico (HDM), que consiste en que el gas presente en los poros se expande y sale gradualmente. Una vez restaurada la presión del sistema, el gradiente de presión actúa como fuerza impulsora provocando la compresión del gas remanente y permitiendo que la disolución exterior ocupe dicho espacio (Salvatori, 1999) y se aumente el área de contacto interfacial, causando un aumento en la velocidad de transferencia de masa (Rastogi y Raghavarao, 2004).

En el proceso de DO, ocurren dos principales flujos de difusión en contracorriente a través de las paredes celulares. Un importante flujo de agua sale del producto hacia la solución hipertónica y simultáneamente un flujo en dirección opuesta de pequeñas concentraciones de la solución deshidratante hacia el producto (Torreggiani, 2001). Cuanto mayor sea la remoción de

humedad, menor será la actividad de agua del producto, llegando a su mayor estabilidad. La ganancia de sólidos es indeseable, pues puede producir alteraciones en las propiedades sensoriales del producto. Sin embargo hay procesos en los que se desea la incorporación de solutos, los llamados procesos de impregnación, donde la presencia de solutos confiere propiedades deseables (Barbosa, 2002). Según Raoult (1992) la transferencia de masa ocurre principalmente en las dos primeras horas, Este fenómeno de masa es fuertemente afectado por la naturaleza de la materia prima (variedad, grado de maduración, tamaño, forma, etc.) y por las variables del proceso (composición y concentración del medio osmótico, relación medio-producto, temperatura, superficie y tiempo de proceso). La eficiencia del proceso de DO puede ser cuantificada usándose los valores de pérdida de peso (que corresponderían básicamente a pérdida de agua) y la incorporación de sólidos (Querido, 2000). Los principales agentes osmóticos utilizados en la DO de frutas son soluciones de sacarosa, fructosa, glucosa y jarabe de miel; en tanto para legumbres y verduras la sal (NaCl) es la más utilizada (Lerici *et al.*, 1985; Torreggiani, 2001; Lenart, 1996).

Algunas ventajas de la DO son: Un producto de mejor color, textura y sabor que en secado térmico (Azuara *et al.*, 1998). Inhibir la transferencia de oxígeno a la fruta por la presencia de azúcar sobre la superficie, reduciendo el pardeamiento enzimático (Saptura, 2001). Es posible introducir solutos y especies tales como agentes conservantes, nutrientes, saborizantes o mejoradores de textura como componentes activos a través de la disolución osmótica (Sablani y Rahman, 2003) y Retardar la pérdida de volátiles durante el secado térmico (Azuara *et al.*, 1998).

#### **Variables del Proceso de Deshidratación Osmótica.**

De acuerdo con Torreggiani (2001) el tipo de agente utilizado, afecta la cinética de DO, ya que el aumento del peso molecular del soluto provoca un decrecimiento en la ganancia de sólidos y una mayor remoción de agua del producto, favoreciendo la pérdida de peso. Por otro lado agentes deshidratantes de bajo peso molecular favorecen la ganancia de sólidos, ocasionando una mayor impregnación de solutos en la muestra.

Para Torreggiani (2001) la temperatura óptima depende del producto estudiado. La tasa osmótica aumenta con la temperatura, pero a temperaturas encima de 45°C puede ocasionar daños en las características del producto (color, sabor, aroma). Panadés *et al.* (2003) constataron que a temperaturas mayores a 50 ° C en guayabas

que altas temperaturas favorecieron una mayor tasa de pérdida de agua y un aumento considerable en la ganancia de sólidos debido a la pérdida de la selectividad de la membrana celular.

Según Lenart (1996) la tasa de remoción de agua y de penetración de solutos es mayor en la etapa inicial de deshidratación. Betoret *et al.* (2001) evaluando la cinética de DO de trozos de mandioca con cloruro de sodio (NaCl) afirmaron que las tasas de transferencia de masa ocurrieron de manera más intensa en las dos primeras horas de tratamiento. Comportamiento semejante fue observado por Azoubel (2008) en la DO de tomate con soluciones binarias de cloruro de sodio (NaCl) y soluciones ternarias de cloruro de sodio y sacarosa, y por Panadés *et al.* (2003) en su trabajo con guayabas.

La transferencia de masa es favorecida por el aumento de la concentración de la solución deshidratante. Provoca un efecto mayor en la pérdida de agua del producto, reduciendo la pérdida de soluto hidrosolubles como vitaminas y sales minerales debido a la formación de una capa de soluto alrededor del alimento, impidiendo la salida de esas sustancias (Ferrari, 2005). Fue evaluado por Rastogi y Raghavarao (2004) en la DO de piña. La transferencia de masa se acelera con el aumento de la concentración de la solución osmótica, favoreciendo más la pérdida de agua que la ganancia de sólidos (Lerici *et al.*, 1985). La DO es más rápida cuando el proceso es realizado con agitación. Asegura la minimización de los efectos de resistencia externa a la transferencia de masa. (Ferrari, 2005).

La transferencia de masa cambia la composición de soluciones y mezclas se caracteriza por transferir una sustancia a través de otra u otras a escala molecular, de una más concentrada a menos concentrada "Difusividad de masa". Un valor significa que las moléculas se difunden en el medio (Mendoza y Schmalko, 2002).

La osmosis es el paso de un líquido a través de una membrana semipermeable. La entrada de agua desde la solución menos concentrada a la solución más concentrada hasta el equilibrio (Herrera *et al.*, 2011).

Jost (2001) define la difusión como un fenómeno en el cual se tiende a un equilibrio de la concentración dentro de una fase única. Al trabajar con mango y soluciones de sacarosa a dos temperaturas, Miguel *et al.* (2001) señalaron que la difusividad depende de la funcionalidad de la membrana celular que desempeña un carácter selectivo que permite al agua pasar más rápidamente que al soluto. Fernández (2006) señala que los factores que afectan la difusividad son la concentración, temperatura y viscosidad.

Para desarrollar un modelo fenomenológico que describa la transferencia de masa en la DO se deben conocer los fundamentos relacionados con

la fisicoquímica y la termodinámica del sistema, así como los mecanismos y las cinéticas de transferencia de masa (Barat, 1998). Azuara (1998) modeló la pérdida de agua y la ganancia de sólidos en la OD a partir de balances de masa, obteniéndose ecuaciones que requieren dos parámetros ajustables, propone calcular el coeficiente de difusión efectivo relacionando su modelo con la ecuación simplificada de Fick, entonces se tiene:

$$D_{e,w} = \frac{\pi}{4} \left[ \left( \frac{s_1 l}{1 + s_1 t} \right) \left( \frac{\Delta M_{\infty}^{w,mod}}{\Delta M_{\infty}^{w,exp}} \right) \right]^2$$

Donde  $\Delta M_{\infty}^{w,mod}$  corresponde a la pérdida de agua en el equilibrio y  $\Delta M_{\infty}^{w,exp}$  es el valor obtenido experimentalmente, el modelo de Azuara es un modelo empírico que se basa en el ajuste de una ecuación a los datos experimentales.

#### Nomenclatura:

$D_e$	difusividad efectiva
$l$	longitud característica
$M$	masa, kg
$\Delta M$	pérdida (o ganancia) de masa, kg
$\Delta K$	pérdida o ganancia de volumen, m <sup>3</sup>

#### **La metodología de Superficie de Respuesta.**

La metodología de Superficie de Respuesta es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas para modelar y analizar problemas en las que una variable de interés es influenciada por otras y el objetivo es optimizar las variables de interés (Myers y Montgomery, 1995). La MSR es definida como un modelo estadístico que pueden ser usadas de tres maneras: a) Describir cómo las variables a probar afectan la respuesta. b) Determinar las interrelaciones entre las variables a probar. c) Describir el efecto combinado de todas las variables a probar en la respuesta o variable control. La MSR es actualmente la técnica de optimización más empleada en la Ciencia de los Alimentos, debido quizás, a que es altamente eficiente y a que su fundamento teórico es muy simple (Arteaga, 2010). La optimización mediante superficies de respuesta le permite al tecnólogo de alimentos minimizar los costos, maximizar las ganancias, reducir el empleo de ingredientes o preservantes costosos, incrementar las características deseables del alimento sin comprometer su inocuidad durante el desarrollo de un nuevo producto (Floros y Chinnan, 1988). Según Ayala y Pardo (1995). La Superficie de Respuesta Estimada es la representación geométrica del modelo matemático obtenido debido principalmente a las tres consideraciones siguientes, A) A la omisión de un cierto número de las variables. B) Conocimiento inexacto de las variables de proceso. C) A la necesaria simplificación del modelo debido a las complejidades matemáticas. Ayala y Pardo

(1995) señalan que la superficie de respuesta real es la representación geométrica de un modelo perfecto, una idéntica réplica del proceso bajo estudio. Kuehl (2001) menciona que en general la función real se desconoce y las funciones polinomiales con frecuencia proporciona buenas aproximaciones. Los experimentos son llevados a cabo mediante un diseño predeterminado, el cual es un plan organizado de experimentos que permiten evaluar simultáneamente todas las variables consideradas y además evaluar la fuerza de interacción entre las variables y reducir el número de experimentos a llevarse a cabo (Ayala y Pardo, 1995). Para optimizar un proceso se requiere de una metodología apropiada, y de acuerdo a Ayala y Pardo (1995) existen tres etapas fundamentales: Screening, Escalamiento y Optimización Final. El objetivo principal del Screening, esta etapa es identificar aquellas variables que verdaderamente aumenten la eficiencia de un proceso. Al inicio de un proceso de optimización, cuando no se tiene un buen conocimiento del comportamiento del proceso, la lista de variables que pueden influir en el proceso son muchas (Ayala y Pardo, 1995). El escalamiento se da cuando se tiene evidencia que la región óptima se encuentra lejos de los experimentos iniciales (Screening), Optimización final En la región óptima 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 más apropiados para estos casos son los diseños rotatables y los diseños compuestos Ayala y Pardo (1995).

El espárrago (*Asparagus officinalis*) es una hortaliza originaria de las Costas del Mediterráneo, que se adapta bien a zonas templadas y tropicales. Es un producto perecedero cuyo brote tierno llamado turión, los atributos de esta hortaliza se encuentran el ser un producto bajo en calorías (menos de 4 calorías/espárrago), en grasa y colesterol, con alto contenido en vitamina C, A, B, tiamina y riboflavina y rico en potasio y en fosfato de calcio (UNALM, 2013). se distinguen tres tipos de espárragos: el espárrago verde, que se comercializa en fresco; el espárrago blanco, destinado al procesamiento (enlatado, congelado, deshidratado, encurtido) y el espárrago morado que se produce y comercializa espacialmente en Italia (MINAG, 2013). En la actualidad el Perú es uno de los principales países productores y exportadores de espárrago-frescos y procesados. El espárrago peruano es de mejor calidad y su valor mayor.

## 2. Materiales y métodos

El espárrago (*Asparagus officinalis*) que se utilizó fue comprado en el Mercado Central de

Trujillo, este provenía en su estado fresco desde los campos de cultivo del distrito de Paiján. El diagrama del proceso de deshidratación osmótica del espárrago se muestra en la figura 1.

**Recepción.** Los turiones de espárrago fueron comprados en el Mercado Central de Trujillo y llevados al Laboratorio Multifuncional de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Trujillo.

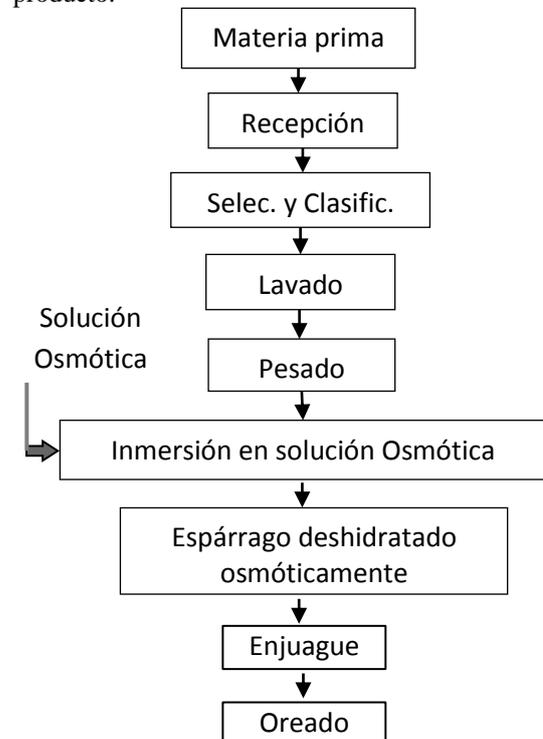
**Selección y Clasificación.** Recepcionados los turiones, las muestras procedieron a seleccionarse y clasificarse, eliminando aquellas que no cumplan con las condiciones requeridas.

**Lavado y Desinfección.** Los turiones fueron lavados para eliminar impurezas y residuos de tierra, utilizando agua muy limpia y usando desinfectante (cloro al 0.05%) para eliminar algunos microorganismos que puedan haberse impregnado durante el transporte.

**Pesado.** En esta operación las muestras fueron pesadas de manera homogénea, utilizando balanza de precisión.

**Preparación de la solución osmótica.** Se prepararon las concentraciones de la solución de cloruro de sodio (NaCl), las diferentes concentraciones de la solución serán de 4%, 12%, 20%.

**Inmersión en Solución Osmótica.** Las muestras completamente preparadas de forma cilíndrica fueron sumergidas en las soluciones osmóticas, a diferentes concentraciones, temperatura de trabajo, tiempo de inmersión, velocidad de agitación y a diferentes relaciones solución: producto.

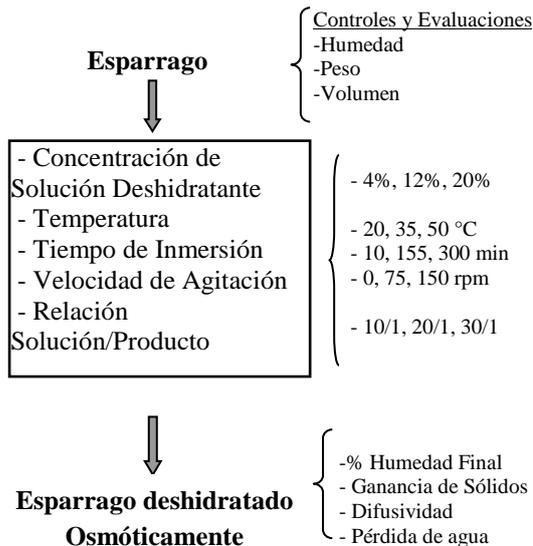


**Figura 01.** Diagrama del Proceso de Deshidratación Osmótica

**Enjuague.** Finalizado el proceso, las muestras fueron enjuagadas en agua pura (agua destilada) por un tiempo muy corto de aproximadamente 3 seg.

**Oreado.** Como operación final se tiene el oreado, esta operación será realizada después del enjuague para luego proceder con la respectiva toma de datos y mediciones.

Se trabajó con un Diseño Experimental para cinco (5) variables independientes en dos (2) etapas (figura 2).



**Figura 2.** Diseño experimental.

**Primera Etapa (Screening).** Es esta etapa se utilizó un diseño factorial fraccionado  $2^{5-1} + 4pc$  en total 20 ensayos (tabla1).

**Tabla 1.** Valores máximos y mínimos de las variables independientes utilizados en el diseño factorial  $2^{5-1}$

Nivel	-1	0	+1
Concentración de la Solución Osmótica (%)	4	12	20
Temperatura (° C)	20	35	50
Tiempo de Inmersión (min)	10	155	300
Velocidad de Agitación (rpm)	0	75	150
Relación Solución-Producto	10/1	20/1	30/1

Las respuestas obtenidas del diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ , fueron analizadas mediante el programa STATISTICA 6.0 para ver los efectos de cada variable en las respuestas, se analizó el valor-p. Resultado de este análisis se eliminaron las variables que no tuvieron efecto significativo en los experimentos, quedando 3 variables más significativas.

**Segunda Etapa (Optimización).** Las variables más significativas de la primera etapa fueron 3 (temperatura, tiempo, concentración). Se determinaron los valores axiales (-1.68 y +1.68) para las 3 variables que resultaron significativas (tabla 2).

**Tabla 2.** Determinación de valores para el DCCR

Variables	Nivel				
	-1.68	-1	0	+1	+1.68
[NaCl](%)	6	10.9	18	25.1	30
Temp.(°C)	20	26.1	35	43.9	50
Tiempo de Inmer.(min)	160	212.6	290	367.4	420

Los valores de los puntos axiales (-1.68 y +1.68) y el punto central fueron determinados por las superficies en las que se muestran los valores de trabajo; los valores de -1 y +1 fueron determinados por interpolación. La velocidad de agitación (150 rpm) y la relación solución / producto (30/1), fueron fijados como valores constante para la etapa de optimización. Luego se construyó el DCCR (Diseño Central Compuesto Rotacional)  $2^3 + 6$  axiales + 4 pc = 18 ensayos, haciendo un total entre la primera parte y la segunda parte, 38 ensayos. Se realizaron los cálculos de los Coeficientes de Regresión, utilizando el software estadística 6.0 Luego se realizó el Análisis de Varianza para las variables investigadas, Humedad final y Ganancia de sólidos solubles.

Analizados los resultados se procedió a generar las Superficies de Respuesta con las curvas de Contorno para de esta manera visualizar los valores óptimos, superponiendo las gráficas. De los rangos de datos obtenidos se tomó un valor por cada variable optimizada y se realizaron las corridas experimentales y validar el (los) modelo(s) obtenido(s).

### 3. Resultados y discusión

#### a) Primera Parte - Screening

En la tabla 3 se muestran los valores de los veinte (20) ensayos realizados en la primera etapa, realizado mediante un diseño factorial fraccionado  $2^{5-1}$ . El ensayo 16 presenta el menor porcentaje de Humedad final con 72.18 %, esto indica que a valores de 20% de NaCl, 50°C de Temperatura, 300 min. De tiempo de inmersión, 150 rpm y relación solución/producto de 30/1; ocurre mayor pérdida de agua durante el proceso de DO del espárrago verde. Esto indica que la humedad del espárrago verde varió desde 94.34 % hasta un valor de 72.18%, habiendo una variación de 22.16%. Esto indica que altas concentraciones de solución osmótica favorecen la transferencia de masa en la DO y provocan un efecto mayor en la pérdida de agua del producto (Ferrari, 2005).

**Tabla 3.** Diseño Factorial Fraccionado $2^{5-1}$  para la Humedad final y Ganancia de Sólidos.

Efecto	CEONCENT. (%) P/V		TEMP (°C)	T-INMER (min)		VEL-AGIT. (rpm)		REL-SOL- PTO. (v:v)		HUM-FIN. (%)	GAN- SOL- SOLB (g)	
1	-1	4	-1	20	-1	10	-1	0	1	30	93.4517	0.0035
2	1	2	-1	20	-1	10	-1	0	-1	10	91.4246	0.0202
3	-1	4	1	50	-1	10	-1	0	-1	10	93.0642	0.0068
4	1	20	1	50	-1	10	-1	0	1	30	88.4443	0.0402
5	-1	4	-1	20	1	300	-1	0	-1	10	91.3695	0.0135
6	1	20	-1	20	1	300	-1	0	1	30	77.974	0.1102
7	-1	4	1	50	1	300	-1	0	1	30	91.8909	0.0035
8	1	20	1	50	1	300	-1	0	-1	10	76.8176	0.1368
9	-1	4	-1	20	-1	10	1	150	-1	10	93.4544	0.0035
10	1	20	-1	20	-1	10	1	150	1	30	92.5263	0.0035
11	-1	4	1	50	-1	10	1	150	1	30	93.4938	0.0002
12	1	20	1	50	-1	10	1	150	-1	10	89.7109	0.0268
13	-1	4	-1	20	1	300	1	150	1	30	86.6769	0.0435
14	1	20	-1	20	1	300	1	150	-1	10	77.5691	0.1035
15	-1	4	1	50	1	300	1	150	-1	10	88.2448	0.0168
16	1	20	1	50	1	300	1	150	1	30	72.1805	0.1002
17	0	12	0	35	0	155	0	75	0	20	84.0225	0.0702
18	0	12	0	35	0	155	0	75	0	20	82.6023	0.0768
19	0	12	0	35	0	155	0	75	0	20	82.6016	0.0735
20	0	12	0	35	0	155	0	75	0	20	82.684	0.0768

La ganancia de sólidos presenta su mayor valor en el ensayo 08 (cuadro 3), con un valor de 0.1368 g. En este ensayo los valores de las variables concentración de la solución osmótica (20%), temperatura (50° C) y tiempo de inmersión (300 min.) son los mayores valores utilizados en este trabajo (+1) y la velocidad de agitación (0 rpm) y relación solución/ producto (10/1) son los menores valores utilizados en este trabajo. El tiempo de inmersión favorece a la ganancia de sólidos, pero tiempos muy largos van a ocasionar la impregnación de los sólidos en el producto, aumento en la concentración de la solución osmótica favorece la ganancia de sólidos, la temperatura elevada favorece también la ganancia de sólidos, el aumento de temperatura aumenta la permeabilidad de la pared celular del fruto u hortaliza, debido a la mayor movilidad de las moléculas y a la pérdida de la selectividad de la membrana, lo cual no solo permite un mayor intercambio de agua que sale de la fruta, sino un mayor ingreso de solutos o componentes del agente. La menor ganancia de sólidos se presenta en el ensayo 11 (tabla 3), cuando las variables independientes concentración (4%) y tiempo de inmersión (10 min.) están en sus valores (-1) y las variables independientes temperatura (50° C), velocidad de

agitación (150 rpm) y relación solución/producto (30/1) son los valores (+1). En los ensayos del 17 al 20 se muestran los resultados obtenidos tanto para la Humedad Final (%) y Ganancia de Sólidos Solubles (g) al trabajar con los cuatro puntos centrales (0) del diseño experimental fraccionado  $2^{5-1}$ . Los puntos centrales para ambas respuestas presentan una variación pequeña, indicando una buena repetitividad del proceso.

En la tabla 4 se muestra el Análisis de los Efectos para la Humedad Final y Ganancia de Sólidos. Para la respuesta Humedad Final todas las variables evaluadas (Concentración de la Solución Osmótica, Temperatura, Tiempo de inmersión, Velocidad de agitación) son estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) a excepción de la variable Relación Solución/Producto. Por otro lado, Lenart (1996), manifestó que el tiempo de inmersión es una variable bastante importante ya que de ello depende la mayor transferencia de masa.

Para la variable dependiente Ganancia de Sólidos Solubles sólo la Concentración de la Solución Osmótica ( $p < 0.05$ ) y el Tiempo de inmersión ( $p < 0.05$ ) fueron estadísticamente significativas.

Ya que son dos las respuestas bajo análisis (Humedad final y ganancia de sólidos), las variables independientes que son significativas

para ambas serían la Concentración de la Solución Osmótica y el Tiempo de inmersión. Adicionalmente a estas dos variables se creyó conveniente también considerar la Temperatura dentro de las variables para la optimización, ya que consideramos es una variable Torreggiani (2013) indica que a pesar de que la tasa osmótica aumenta con la temperatura, temperaturas elevadas pueden ocasionar daños en las características del producto como color, sabor, aroma.

**Tabla 4.** Análisis de los Efectos para la Humedad Final y Ganancia de Sólidos.

	Efecto	Valor - p	Efecto	Valor - p
Mean/Inter.	82.9775977	1.63E-07	0.07432625	0.0000218
(1)CONCENT. (%)	-8.1248526	0.00017339	0.05625	0.0000502
(2)TEMPERAT. (°C)	-1.3249629	0.03204315	0.00375	0.1003014
(3)TIEM. INMER (min)	-9.1058567	0.00012334	0.05291667	0.0000603
(4)VELOC AGIT. (rpm)	-1.3225296	0.03219557	-0.0045833	0.06393093
(5)REL.SOL/PTO.(V/V)	-0.6270944	0.17007613	-0.0029167	0.1650288

Humedad Final: R<sup>2</sup> = 0.9982  
 Ganancia de Sólidos: R<sup>2</sup> = 0.999

**b) Segunda Parte – Optimización**

Con las variables que resultaron significativas, se generó el Diseño Central Compuesto Rotacional (DCCR), en la tabla 5 se presenta el DCCR. El valor más bajo de Humedad Final (%) se presentó en el ensayo 10, con Concentración de la Solución Osmótica en 30%, Temperatura en 35°C y Tiempo de inmersión en 290 min.; este resultado también está asociado con la mayor Ganancia de Sólidos (g).

**Tabla 5.** Diseño y resultados

Ensayos	CONCENT. (%) v/v	TEMPERAT. (°C)	T- INMER. (min)	HUM FIN. (%)	GAN. SOL. SOLB (g)			
1	-1	10.9	-1	26.1	-1	212.6	86.5283	0.0654
2	-1	25.1	-1	26.1	-1	212.6	79.4165	0.1666
3	-1	10.9	1	43.9	-1	212.6	85.3026	0.12
4	-1	25.1	1	43.9	-1	212.6	75.8205	0.1966
5	-1	10.9	-1	26.1	1	367.4	86.8043	0.11
6	-1	25.1	-1	26.1	1	367	71.3683	0.23
7	-1	10.9	1	43.9	1	367.4	83.7497	0.1266
8	-1	25.1	1	43.9	1	367.4	70.2884	0.21
9	-1.68	6	0	35	0	290	88.2416	0.0933
10	1.68	30	0	35	0	290	69.6986	0.2666
11	0	18	-1.68	20	0	290	82.0711	0.15
12	0	18	1.68	50	0	290	75.815	0.1733
13	0	18	0	35	-1.68	160	82.9835	0.1366
14	0	18	0	35	1.68	420	75.7246	0.1666
15	0	18	0	35	0	290	77.629	0.17
16	0	18	0	35	0	290	77.4327	0.17
17	0	18	0	35	0	290	77.5802	0.1666
18	0	18	0	35	0	290	77.0994	0.1733

**Análisis de Regresión y Modelos**

En la tabla 6 se presentan los Coeficientes de Regresión para la Humedad Final (%) y la Ganancia de Sólidos Solubles (g).

**Tabla 6.** Coeficientes de Regresión para la Humedad Final (%) y Ganancia de sólidos.

	Humedad final (%)		Ganancia de sólidos(g)	
	Regression Coeff.	Valor p	Regression Coeff.	Valor p
MEAN/INTERC	117.635905	0.000018	-0.443938	0.000492
(1)CONCENT (L)	-0.44399	0.011861	0.008632	0.002566
CONCENT (Q)	0.013718	0.001913	0.000024	0.215295
(2)TEMP (L)	-0.789085	0.001728	0.01245	0.000659
TEMP (Q)	0.008669	0.00198	-0.000067	0.006217
(3)T_INMER (L)	-0.060754	0.005317	0.001481	0.000571
T_INMER (Q)	0.00014	0.00112	-0.000001	0.001392
1L by 2L	-0.000783	0.599495	-0.000121	0.004151
1L by 3L	-0.002799	0.000362	0.000006	0.045448
2L by 3L	0.000125	0.384187	-0.000016	0.001443

Humedad final: R<sup>2</sup> = 0.9882,  
 Ganancia de sólidos: R<sup>2</sup> = 0.9834

Obteniéndose los siguientes modelos:

$$\text{Humedad Final} = 117.636 - 0.444C + 0.014C^2 - 0.789 T^{\circ} + 0.009T^{\circ 2} - 0.061ti + 0.00014ti^2 + 0.0028C*ti$$

$$\text{Ganancia de Sólidos} = -0.444 + 0.009C + 0.012T^{\circ} - 0.00007T^{\circ 2} + 0.0015ti - 0.000001ti^2 - 0.00012C*T^{\circ} + 0.000006C*ti - 0.00002T^{\circ} * ti$$

Dónde:

C = Concentración de la Solución Osmótica

T<sup>o</sup> = Temperatura

ti = Tiempo de inmersión

Para la Humedad final la concentración de la solución osmótica (L), la Temperatura (L) y el tiempo de inmersión (L) presentan un valor p< 0.05, las interacciones concentración x temperatura y temperatura x tiempo de inmersión; presentaron un valor p>0.05. Se verificó además que el modelo para la Humedad final es significativo (p<0,05), el valor de R<sup>2</sup> indicó que el modelo explica el 98.8 % de la variación de la pérdida de agua

En lo que respecta a la Ganancia de Sólidos, los efectos lineales y cuadráticos (excepto la Concentración) todos presentan un efecto significativo con p<0.05. El modelo de regresión obtenido para esta variable, presentó un R<sup>2</sup> que determina en 98.3% la variación de los datos experimentales

**Análisis de Varianza**

En el Análisis de Varianza (Tabla 7), se consideran solamente los términos estadísticamente significativos. Los coeficientes de determinación para la Humedad final 98.82 % y 98.34% para la Ganancia de sólidos. La prueba F fue altamente significativa para ambos casos, siendo los modelos adecuados para describir los resultados a través de las superficies de respuesta.

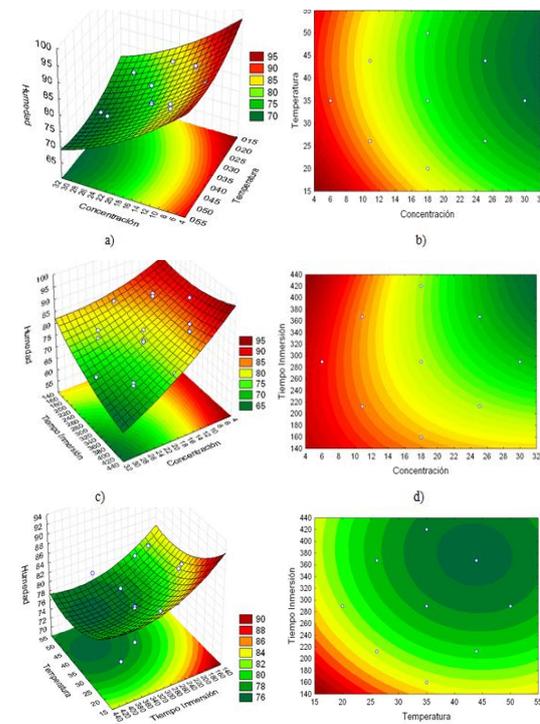
**Tabla 7.** Análisis de Varianza para la Humedad Final y la Ganancia de Sólidos Solubles.

Fuente de variación	Suma de Cuadrados		Grados de Libertad		Cuadrado medio		F <sub>Calc</sub>	
	HF	GSS	HF	GSS	HF	GSS	HF	GSS
Regresión	551.801	0.003594	9	9	551.879	0.0394	9661.833	5320.127
Residuo	0.409189	0.02871	8	8	1.315	3.57E-05		
Total	552.21	0.032304	17	17				

Humedad final:  $R^2 = 98.82\%$ ,  $F_{tab} = 3.14 < F_{calc} = 9661.8$

Ganancia de Sólidos:  $R^2 = 98.34\%$ ,  $F_{tab} = 3.14 < F_{calc} = 5320.13$

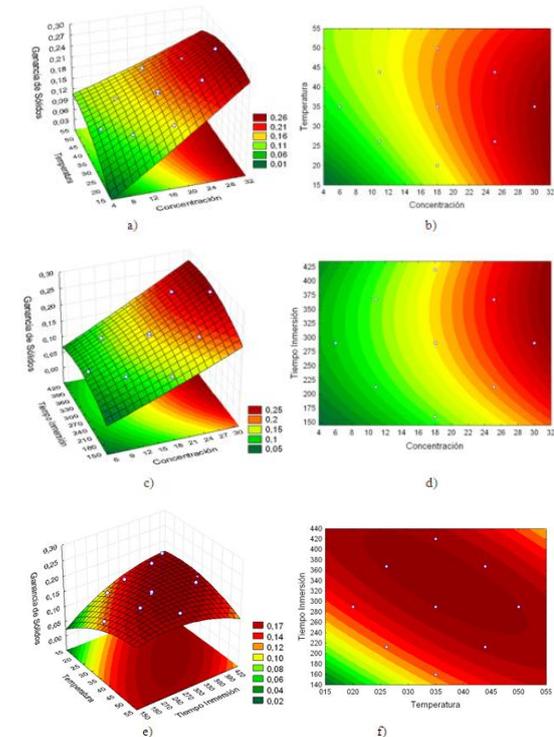
Las superficies de respuesta y contorno (Figura 3a) fueron generadas a partir de las variables temperatura y concentración, pudiéndose observar que la pérdida de agua aumenta conforme aumenta la concentración de la solución de salmuera. Ferrari (2005), trabajando en DO de tomates observa la misma influencia de la concentración del cloruro de sodio (NaCl) en la pérdida de agua.



**Figura 3.** Superficies para la humedad final.

La figura 3b, muestra que elevadas concentraciones de solución osmótica y tiempos de inmersión van a favorecer de manera relevante en la pérdida de agua del producto deshidratado. Rastogi y Raghavarao (2004) trabajando con mapará (pez del litoral brasileño) mencionan que cuando la concentración de la salmuera es menor al 12%, el pescado absorbe salmuera y si la concentración de salmuera es mayor que 12%, el pescado pierde agua y sustancias solubles. Las figuras 3d muestran que temperaturas entre 35° y 50° C van a acelerar la

pérdida de agua guante la DO, por lo que la humedad final se va a ver considerablemente disminuida, temperaturas más altas proporcionan un aumento en la velocidad de transferencia de masa. La figura 4a demuestra que a elevadas concentraciones de la solución osmótica, la ganancia de sólidos se va a ver aumentada, llegando hasta 0,26 g, en fajas de temperatura desde 20° a 45° C en la superficie de respuesta. La figura 4c muestra que la ganancia de sólidos está incrementada en una faja de 300min a 400 min.



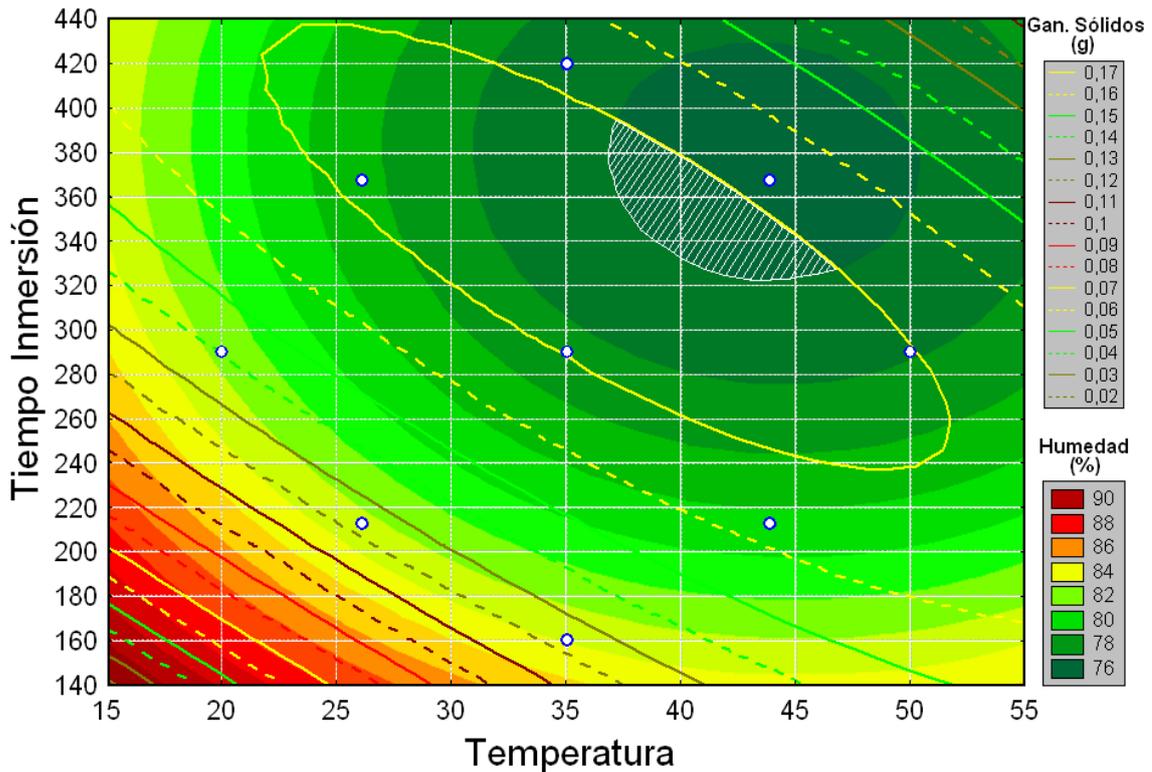
**Figura 4.** Superficies para ganancia de sólidos.

La figura 4e muestra las fajas de valores en 25° C a 50° C de temperatura y 260 min a 420 min en el tiempo de inmersión. Para la ganancia de sólidos la concentración y el tiempo de inmersión son dos variables muy importantes en la ganancia de sólidos. Torreggiani (2001) indica que la masa molar del agente osmótico favorece la ganancia de sólidos.

En la figura 5, se presenta la superposición de las superficies de contorno, en la cual se determina los valores óptimos para poder realizar la corrida experimental. Mediante ésta técnica de superposición de Superficies, se pudo determinar que los valores óptimos para las dos respuestas analizadas (Humedad Final y Ganancia de Sólidos) estos valores se muestran en la tabla 8.

**Cinética de la Osmodeshidratación con valores óptimos**

Determinados estos valores se procedió a realizar los experimentos, y determinar la cinética de la DO, obteniendo los valores de Ganancia de sólidos y Pérdida de Agua.



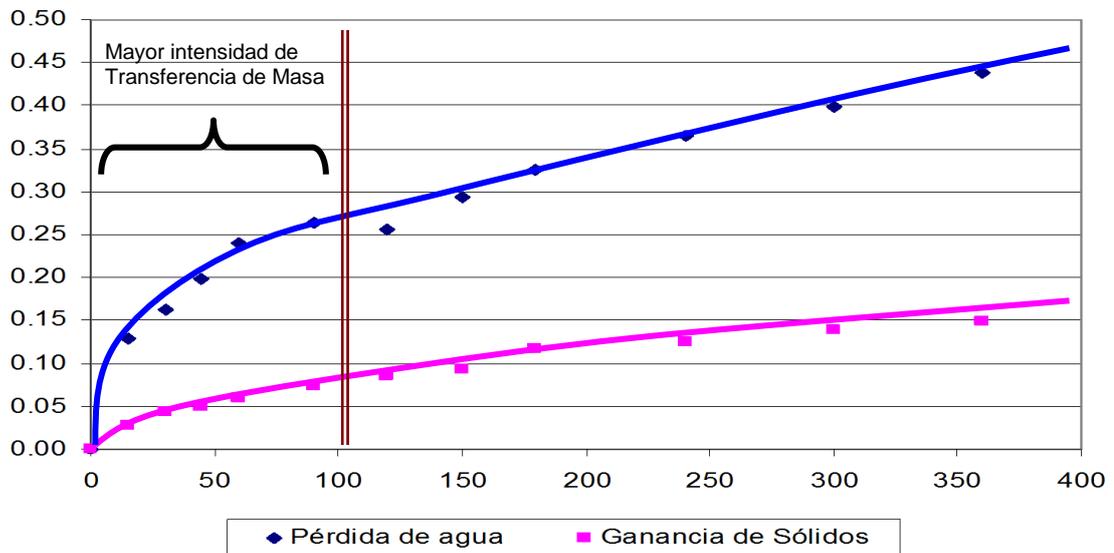
**Figura 5.** Superficies de contorno superpuestas para la humedad y ganancia de sólidos.

**Tabla 8.** Valores óptimos para DO.

Variable	Valores
Temperatura (° C)	36°C a 42°C
Tiempo de inmersión (min.)	350min a 370min
Concentración de la Solución Osmótica (%)	30 % a 32%

La Relación Solución/Producto (30/1) y Velocidad de agitación (150 rpm), fueron fijados de acuerdo a los resultados en el Screening. En la figura 6 se puede observar como la Pérdida de agua y la Ganancia de sólidos se manifiesta a través del tiempo y durante el proceso de la deshidratación osmótica, llegando a tener valores

máximos de 0.44g en pérdida de agua y 0.148g en ganancia de sólidos. La pérdida de agua del producto se ve considerablemente disminuida en aproximadamente las primeras dos horas, lo que demuestra que hay una mayor intensidad de transferencia de masa, como también fue encontrado por otros autores en otros productos alimenticios. Betoret *et al.* (2001) evaluando la cinética de deshidratación osmótica de trozos de mandioca con cloruro de sodio (NaCl) a concentraciones de 10, 20 y 30 % (p/p) y manifestaron que la mayor tasa de transferencia de masa ocurrió de manera más intensa en las dos primeras horas del proceso.



**Figura 6.** Gráfica para la Pérdida de Agua y la Ganancia de sólidos.

Con estos datos se procedió a determinar los valores de Difusividad efectiva, para diferentes tiempos  $t$ , para lo cual se usó el modelo de Azuara, que es un modelo empírico que no tiene en cuenta las dimensiones, la forma, ni la estructura del material; obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la tabla 9.

**Tabla 9.** Valores de Difusividad efectiva para el agua y la ganancia de sólidos solubles.

t (s) *	Difusividad (H2O)	Difusividad (ss)
900	$2.6474 \times 10^{-10}$	$1.23878 \times 10^{-10}$
1800	$1.67266 \times 10^{-09}$	$7.25002 \times 10^{-10}$
2700	$5.0623 \times 10^{-08}$	$1.29879 \times 10^{-08}$
3600	$1.08704 \times 10^{-08}$	$8.17047 \times 10^{-09}$
5400	$1.12764 \times 10^{-09}$	$6.40658 \times 10^{-10}$
7200	$4.98309 \times 10^{-10}$	$2.72238 \times 10^{-10}$
9000	$3.07047 \times 10^{-10}$	$1.65149 \times 10^{-10}$
10800	$2.18727 \times 10^{-10}$	$1.16661 \times 10^{-10}$
14400	$1.36993 \times 10^{-10}$	$7.24253 \times 10^{-11}$
18000	$9.90848 \times 10^{-11}$	$5.21442 \times 10^{-11}$
21600	$7.74136 \times 10^{-11}$	$4.06252 \times 10^{-11}$

\* El tiempo está en segundos para el cálculo respectivo de la difusividad

Luego se determinó la Difusividad efectiva media para el agua y los sólidos solubles:

Para el agua:

$$D_{ef,w} = 5.99055 \times 10^{-09} \quad (38^\circ \text{C}, 360 \text{ min.}, 30\% \text{ Sol. NaCl})$$

Para los sólidos

$$D_{ef,ss} = 2.12429 \times 10^{-09} \quad (38^\circ \text{C}, 360 \text{ min.}, 30\% \text{ Sol. NaCl})$$

Azoubel (2008) determinaron la cinética de pérdida de agua a través del modelo de Azuara, basado en la segunda Ley de Fick y aplicado para una geometría esférica. Los autores concluyeron que el modelo fue capaz de describir todo el proceso osmótico hasta el punto de equilibrio y que los valores de coeficiente de difusividad obtenidos por la ecuación de la segunda Ley de Fick mostraron la influencia de la concentración del soluto en la deshidratación osmótica, ósea mayor pérdida de agua y ganancia de sal con el aumento de la concentración del agente deshidratante.

Fernández (2006), señala que los factores que afectan directamente son la concentración de la solución osmótica, la temperatura y que están íntimamente relacionados. Los resultados mostrados en la tabla 9 confirman lo señalado por el autor, pues a mayor concentración (solución osmótica de NaCl al 30%) mayor

difusividad. Esto se explica porque la mayor concentración sirve de fuerza impulsora para la migración del agua desde la fruti hortícola a la solución osmótica y de solutos desde la solución hipertónica hacia la fruti hortícola.

En la tabla 10 se observa diferentes valores de difusividad para el agua y sólidos solubles en diversos alimentos. Se obtuvieron valores de  $5.99055 \times 10^{-09}$  (*De media*) para el agua y  $2.12429 \times 10^{-09}$  (*De media*) para los sólidos. Estos valores se encuentran dentro de los rangos obtenidos por otros autores al trabajar con frutas como papaya, manzana, piña, mango, a temperaturas dentro de los límites trabajados en esta investigación. En lo que respecta a hortalizas, trabajando con cloruro de sodio, el valor de la difusividad obtenidos por los autores mencionados, en comparación con los valores obtenidos en la presente investigación están aceptables.

#### 4. Conclusiones

El espárrago verde (*Asparagus officinalis*) deshidratado osmóticamente, en la primera parte del diseño experimental, sometido a cinco variables independientes, tales como Concentración de la Solución osmótica, Temperatura, tiempo de inmersión, velocidad de agitación y relación solución producto, presentó una mayor pérdida de humedad cuando los valores de éstas variables estaban en sus puntos (+1) y la Ganancia de sólidos presentó la mayor ganancia cuando los valores de Concentración, temperatura y tiempo de inmersión tenían valor (+1) y la velocidad de agitación y relación solución /producto presentaban valores (-1).

Mediante el análisis de los efectos se pudo determinar que las variables significativas ( $p < 0.05$ ) para la segunda parte del proceso fueron: Concentración, Temperatura y tiempo de inmersión; para ambas variables dependientes (Humedad final y Ganancia de sólidos solubles).

Los valores óptimos del proceso se obtuvieron al superponer las figuras de contorno, obteniéndose valores de  $T^\circ$  ( $36^\circ \text{C}$  a  $42^\circ \text{C}$ ) Concentración (30% a 32%) y tiempo de inmersión (350 min a 370 min) mediante los cuales se procedió a realizar la corrida experimental.

Utilizando los valores óptimos de Temperatura, Concentración y Tiempo de inmersión, se obtuvo una Humedad Final de (68.87 %) y la Ganancia de sólidos fue de (0.148 g o 14.8 %) en el proceso de deshidratación osmótica. Por relaciones cualitativas se puede decir que la pérdida de agua es proporcional a la concentración de la solución, la temperatura, el tiempo de inmersión; y también que la ganancia de sólidos es proporcional a la concentración de la disolución, la temperatura y el tiempo de inmersión.

**Tabla 10.** Valores de difusividad efectiva para agua y sólidos en diferentes alimentos.

$D_{e,w}$ (m <sup>2</sup> /s)	$D_{e,ss}$ (m <sup>2</sup> /s)	Alimento	T (°C)	Concentración	Referencia
15 x10 <sup>-9</sup> a					Conway <i>et al.</i> , 1993 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
60 x10 <sup>-9</sup>		Manzana	30-50	50-70 ° Brix	
0,157 x10 <sup>-9</sup> a	0,172 x10 <sup>-9</sup> a	Manzana	20-50	65 ° Brix	Salvatori <i>et al.</i> , 1999
1,046 x10 <sup>-9</sup>	1,048 x10 <sup>-9</sup>				
0,016 x10 <sup>-9</sup> a	0,013 x10 <sup>-9</sup> a	Manzana	20-50	65 ° Brix	Salvatori <i>et al.</i> , 1999
0,187 x10 <sup>-9</sup>	0,211 x10 <sup>-9</sup>				
0,0332 x10 <sup>-9</sup> a	0,0385 x10 <sup>-9</sup> a	Manzana	20-50	40-60 ° Brix	Kaymak <i>et al.</i> , 2000
0,213 x10 <sup>-9</sup>	0,108 x10 <sup>-9</sup>				
0,314 x10 <sup>-9</sup> a	0,107 x10 <sup>-9</sup> a	Papaya	30-50	50-70 ° Brix	Rodríguez <i>et al.</i> , 2003
0,655 x10 <sup>-9</sup>	0,933 x10 <sup>-9</sup>				
1,3 x10 <sup>-9</sup>	3,47 x10 <sup>-9</sup>	Papaya	25	Saturado	Mendoza <i>et al.</i> , 2002
0,347 x10 <sup>-9</sup> a	0,199 x10 <sup>-9</sup> a	Pera	40-60	40-70 ° Brix	Park <i>et al.</i> , 2002
1,92 x10 <sup>-9</sup>	3,6 x10 <sup>-9</sup>				
1,72 x10 <sup>-9</sup>	0,2 x10 <sup>-9</sup> a	Piña	50-70	50-70 ° Brix	Waliszewski <i>et al.</i> , 2002
	0,46 x10 <sup>-9</sup>				
1,48 x10 <sup>-9</sup> a	0,53 x10 <sup>-9</sup> a	Piña	30-50	40-70 ° Brix	Rastogi <i>et al.</i> , 2004
3,24 x10 <sup>-9</sup>	1,54 x10 <sup>-9</sup>				
0,6 x10 <sup>-9</sup> a		Piña	30-50	50-70 ° Brix	Beristain <i>et al.</i> , 1990 citado por Spiazzi y Mascheroni, 1997
2,5 x10 <sup>-9</sup>					
0,85 x10 <sup>-9</sup> a		Banano	25-42	40-70 ° Brix	Rastogi <i>et al.</i> , 1997 a
2,43 x10 <sup>-9</sup>					
0,018 x10 <sup>-9</sup> a		Mango	30	35-65 ° Brix	Giraldo <i>et al.</i> , 2003
0,077 x10 <sup>-9</sup>					
5,00 x 10 <sup>-10</sup> a		Pepinillo	35	NaCl 25 %	Parkjoko <i>et al.</i> , 2000
11,00 x 10 <sup>-10</sup>					
3,00 x 10 <sup>-09</sup>		Zanahoria	40	NaCl 20%	Schwartz <i>et al.</i> , 1993-1999
2.64x 10 <sup>-10</sup> a	1.23xx 10 <sup>-10</sup> a	Espárrago			
7.74136x10 <sup>-11</sup>	4.06252x10 <sup>-11</sup>	verde	38	NaCl 30%	En este trabajo

Los valores de difusividad efectiva obtenidos al trabajar con T° (38°C), Concentración (30%) y Tiempo de inmersión (360 min.) fueron del orden de 5.99055x 10<sup>-09</sup> para el agua y de 2.12429x 10<sup>-09</sup> para la ganancia de sólidos, estos valores fueron determinados con la aplicación de modelo de Azuara, ya que según Barat (1998) el modelo de Azuara predice en forma precisa los valores de equilibrio y los coeficientes de difusión en todo el proceso. Los valores obtenidos en este trabajo se encuentran dentro de los rangos obtenidos por otros autores al realizar deshidratación osmótica con otros alimentos.

## 5. Referencias bibliográficas

- Artega, H.; Siche, R.; Pagador S. 2010. Efecto de la temperatura y tiempo de transesterificación en el rendimiento y poder calórico de biodiesel a partir de grasa refinada de pollo. *Scientia Agropecuaria* 1(1): 27-35.
- Azuara, E.; Beristain, C.; Gutiérrez, G. 1998. A Method for continuous kinetic evaluation of osmotic dehydration. *Lebensmitteld-Wissenschaft und Technologie* 31: 317-321.
- Azoubel, P.; Da Silva, F. 2008. Optimisation of osmotic dehydration of Tommy Atkins mango fruit. *International Journal of Food Science and Technology* 43: 1276-1280.
- Ayala, J.; Pardo, R. 1995. Optimización por Diseños Experimentales con Aplicaciones en Ingeniería. CONCYTEC. Lima - Perú.
- Barat, J. 1998. Desarrollo de un modelo de la deshidratación osmótica como Operación básica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia
- Barbosa, J. 2002. Influência da la temperatura de la concentração osmótica de abóbora utilizando metodología de desposta. 82 f. Disertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) –Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidades Estadual de Campinas, Campinas,
- Betoret, N.; Gras, M.; Cháfer, M.; Martínéz-Monzó, J.; Andrés, A.; Vidal, D. 2001. Vacuum Impregnation and Osmotic Dehydration in Matrix Engineering. Application in Functional Fresh Food Development. *Journal of Food Engineering* 49(2-3): 175-183.
- Ferrari, C. 2005. Estudo da transferencia de masa e qualidade do Melao deshidratado osmoticamente em solusoes de sacarosa e maltose, dissertação ( Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidad Estadual de Campinas. Campinas.

- Floros, J.; Chinnan M. 1988. Seven factor response surface optimization of a doublestage lye(NaOH) peeling process of pimienta peppers. *Journal of Food Science*. 53: 631-638.
- Herrera R.; Mata Q.; Moya K.; Liceras A.; Madriz U. 2011. Osmosis y Ultrafiltración. Disponible en: <http://membranascelulares.blogspot.com/2011/04/osmosis.html>.
- Jost, W. 2001. Diffusion in solids, liquids and gases. Academic press, New York, p. 37. Tesis. Nelson Anibal Pinzón Casallas. Universidad Nacional De Colombia, Facultad De Ingeniería, Departamento De Ingeniería Química Bogotá D. C.
- Kuehl, O. 2001. Diseño de Experimentos. 2a. Edición. Thomson Learning.
- Lerici, C.; Pinnavaia, G.; Dalla, R.; Bartolucci, L. 1985. Osmotic dehydration of fruits: influence of osmotic agents on drying behavior and product quality. *Journal of Food Science*. 50: 1217-1220.
- Lenart, A. 1996, Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying Technology*. 14(2): 391-413.
- Miguel, M.; Menegalli, F.; Kieckbusch, T. 2001. Influencia del Sólido sobre la Deshidratación Osmótica de Mango. Facultad de Ingeniería de Alimentos. Universidad Estatal de Campinas. Campinas. Brasil.
- Mendoza, R.; Schmalko, M. 2002. Diffusion coefficients of water and sucrose in osmotic dehydration of papaya. *Int. Journal of Food Properties* 5(3): 537-546.
- Ministerio de Agricultura. MINAG. 2013. Comercio Mundial. Disponible en: <http://www.minag.gob.pe/portal/sector-agrario/agricola/cultivos-de-importancia-nacional/esp%C3%A1rragos/comercio-mundial21>.
- Myers, R.; Montgomery, D. 1995. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments. New York: John Wiley & Sons INC.
- Querido, A. 2000. Optimización y Comparación de los Procesos de Deshidratación Osmótica a vacío y a presión ambiente del Caja (*Anacardium occidentale* L).113f . Tesis. Facultad de Ingeniería de Alimentos. Universidad Estatal de Campinas. Brasil.
- Panadés, G.; Acosta, V.; Núñez, M. 2003. Deshidratación osmótica de guayaba a diferentes condiciones de vacío pulsante. *Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos* 345: 67-70.
- Rastogi, N.; Raghavarao, K. 2004. Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensmittel Wissenschaft und-Technologie* 37: 43-47.
- Raoult A.; Lenart, A.; Guilbert, S. 1992. Recent advances in dewatering through immersion in concentrated solutions. In: MUJUNDAR A. S. (Ed.) *Drying of Solids*. New York: International Science Publishers. p. 211-251.
- Sablani, S.; Rahman, M. 2003. Effect of syrup concentration, temperature and sample geometry on equilibrium distribution coefficients during osmotic dehydration of mango. *Food Research International*. 36: 65-71.
- Salvatori, D. 1999. Osmotic dehydration progression in apple tissue I: spatial distribution of solutes and moisture content. *Journal of Food Engineering* 42: 125-132.
- Saptura, D. 2001. Osmotic dehydration of pineapple. *Drying Technology* 19(2), 415-425.
- Singh, B.; Panesar, B. 2010. Optimization of osmotic dehydration process of carrot cubes in mixtures of sucrose and sodium chloride solutions. *J. of Food Eng.:* 123: 590-600.
- Torreggiani, D.; Bertolo, G. 2001. "Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects", *Journal Food Engineering* 49(2-3): 247-253.
- Universidad Nacional Agraria La Molina. UNALM. 2013. Ficha Técnica del Espárrago. Disponible en: <http://www.lamolina.edu.pe/negocios/Bases/FICHAesp.html>.
- Waliszewski, K.; Pardo, V.; Ramírez, M. 2002. Effect of Chitin on color during osmotic dehydration of Banana Slices. *Drying Technology* 20( 3): 719-726.