



## Efecto de la presión y concentración de soluciones de miel de abeja en la transferencia de masa y aceptabilidad sensorial de cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) variedad "Huando" impregnadas al vacío

Effect of pressure and concentration of solutions of honey in mass transfer and sensory acceptability of orange peel (*Citrus sinensis*) variety "Huando" impregnated vacuum

Leonardo Díaz-Sánchez <sup>a,\*</sup>, Jeniffer Puelles Román<sup>a</sup>, Patricia Retto Hernández<sup>a</sup>, Luder Valverde Herrera<sup>a</sup>, Katherine Rodríguez Varas<sup>a</sup>, Cindy Valderrama Amasifuen<sup>a</sup>

*a. Departamento de Ciencias Agroindustriales (Universidad Nacional de Trujillo) Av. Juan Pablo II s/n Trujillo Perú*  
(\*[leo23594@gmail.com](mailto:leo23594@gmail.com))

Recibido 24 Octubre 2014; Aceptado 10 Diciembre 2014

### RESUMEN

En el presente estudio se elaboró un snack a base de cáscaras de naranja y miel de abeja con el fin de aprovechar las propiedades benéficas de ambos, brindando un valor agregado a un subproducto de las industrias de jugos. Las cortezas de naranja, previamente desamargadas, fueron sometidas a impregnación de soluciones de miel de abeja a presiones de vacío. Se evaluó el efecto de la presión de vacío (200 a 700 mbar) y la concentración de las soluciones de miel de abeja (40 a 60 °Brix) sobre los parámetros de transferencia de masa, específicamente el coeficiente de difusividad efectiva y, sobre la aceptabilidad sensorial mediante un diseño compuesto central rotatable. Las muestras impregnadas se sometieron a una prueba de aceptabilidad sensorial con 30 panelistas no entrenados siguiendo una prueba hedónica en escala no estructurada, y se obtuvo que el tratamiento de 450 mbar de presión de vacío con 60 °Brix de concentración fue el más aceptado. Se determinó el coeficiente de difusividad efectiva siguiendo las ecuaciones del modelo de Crank para lámina semi-infinita en un volumen de solución osmótica muy grande para tiempos cortos, además se determinaron los parámetros cinéticos empíricos  $k$  y  $k_0$  en el Modelo de Magee, y también los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  que indican la cinética de pérdida de peso en el modelo del Mecanismo hidrodinámico.

**Palabras clave:** Impregnación, presión de vacío, concentración, difusividad efectiva, aceptabilidad.

### ABSTRACT

In the present study was made a based snack orange peel and honey to exploit the beneficial properties of both, providing a value added to a product industries juices. Orange rinds, debittered previously, were subjected to impregnation solutions of honey to vacuum pressures. The effect of the vacuum pressure (200 to 700 mbar) and the concentration of the solutions of honey (40 to 60 ° Brix) on mass transfer parameters, specifically the effective diffusion coefficient was evaluated and, on the sensory acceptability using a central composite rotatable design. The impregnated samples were subjected to sensory acceptability test with 30 untrained panelists following hedonic scale test unstructured, and it was found that the treatment pressure of 450 mbar vacuum to 60 °Brix concentration was the most accepted. Effective diffusion coefficient was determined following the model equations Crank for semi-infinite slab in a volume of short-time large osmotic solution further empirical kinetic parameters  $k$  and  $k_0$  are determined in the model Magee, and the coefficients  $k_1$  and  $k_2$  indicate the weight loss kinetics of the mechanism of the hydrodynamic model.

**Key words:** Impregnation, vacuum pressure, concentration, effective diffusivity, acceptability.

## 1. Introducción

Los cítricos son uno de los cultivos más fuertemente producidos en el mundo, con una producción estimada de 64 millones de toneladas métricas en el año 2010 (Spreen, 2001). En el Perú la producción de cítricos también ha sido significativa, debido al buen rendimiento de estos productos por lo que ha logrado posicionarse por encima de los países del hemisferio sur, detrás de Brasil. En el año 2008, se obtuvo una rentabilidad de 18.91 TM/has, mientras que en la naranja fue de 14.42 TM/has. La región con mayor rentabilidad es Ica, la cual en el último año, alcanzó un rendimiento en producción de naranja de 29.03 TM/has (Ministerio de Agricultura, 2010). En los últimos años, se ha experimentado un marcado aumento en el consumo de frutos cítricos elaborados, lo que genera grandes cantidades de subproductos derivados de la cáscara. Por lo tanto se deben de promover investigaciones que permitan el aprovechamiento de estos subproductos.

Los residuos industriales siguen convirtiéndose en un gran problema no solo ambiental sino económico, ya que las empresas tienen que asumir altos costos de disposición de estos (Restrepo *et al.*, 2012). Por ejemplo en la industria de jugos, constituidos por cáscaras (albedo y flavedo), semillas, membranas y vesículas de jugo representan aproximadamente el 50% del peso de la fruta entera original (Rojas *et al.*, 2008).

Las cáscaras de naranjas poseen distintas propiedades nutricionales y estructurales. Estas son ricas en pectina (70% de fibra total), la cual es de gran ayuda ya que, generalmente en la dieta actual existe un déficit en este tipo de componentes. Por otro lado, las cáscaras contienen flavonoides que actúan como factores vitamínicos y aportan al corregir problemas de permeabilidad capilar, y carotenoides (Pro vitamina A) que ayudan en la prevención de algunos

tipos de cáncer (Cháfer *et al.*, 2005). Además la gran porosidad de la estructura de la cáscara, la hacen ideal para ser sometida a procesos basados en técnicas de deshidratación osmótica (DO) en impregnación al vacío (IV) (Fito *et al.*, 1995).

La miel es un producto biológico que corresponde a una solución concentrada de azúcares con predominancia de fructosa y glucosa (70%), sacarosa (5%); y contiene como máximo 18% de humedad. El resto de los componentes de la miel se reparte en mínimas cantidades de proteínas, enzimas, sales minerales, vitaminas, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, inhibinas y polen (Gonzales *et al.*, 2000). El uso de la miel se extiende más allá de un simple agente endulzante, debido a que sus componentes le confieren propiedades preservantes, algunos de ellos como tocoferoles, ácido ascórbico, flavonoides y otros compuestos fenólicos, enzimas tales como glucosa oxidasa, catalasa y peroxidasa. La mayoría de estas sustancias deben su propiedad conservante a su actividad antioxidante (Chen *et al.*, 2000)

La impregnación al vacío de un producto poroso, consiste en el intercambio del gas interno y/o líquido fluido en los poros abiertos por una fase líquida externa, debido a la acción de mecanismos hidrodinámicos (HDM) promovidos por cambios de presión (Fito *et al.*, 2001). La operación es realizada en dos etapas después de la inmersión del producto en el estanque conteniendo la fase líquida. En el primer paso, se impone en un sistema cerrado una presión vacuométrica, por un corto tiempo, promoviendo la expansión y salida del gas interno del producto. La salida de gas toma líquido nativo contenido en el poro del producto con él. En el segundo paso, se recupera la presión atmosférica por un tiempo y la compresión lleva a una gran reducción del volumen del gas restante en los poros y el consecuente flujo del

líquido externo en la estructura porosa. La compresión puede también reducir el tamaño del poro dependiendo de la resistencia mecánica de la matriz del sólido (Fito *et al.*, 2001).

El objetivo de este estudio fue evaluar e investigar el efecto combinado de la presión de vacío y la concentración de soluciones de miel en la aceptabilidad y la transferencia de masa utilizando el mecanismo de impregnación al vacío en la elaboración de un snack a base de cáscaras de naranja y miel de abeja con el fin de aprovechar las propiedades benéficas de ambos y, a su vez, se desarrolle alimentos con valor agregado utilizando un subproducto de las industrias de jugos.

### 1.1 Modelos matemáticos de transferencia de masa

En los que se refiere a los mecanismos de transferencia de masa, pueden presentarse (Ochoa-Martinez y Ayala, 2005):

- Mecanismos dependientes del gradiente de concentración que incluyen los mecanismos osmóticos y Fickianos y que se afectan principalmente por la permeabilidad de la membrana a los diferentes componentes.
- Mecanismos dependientes del gradiente de presión, que son los mecanismos hidrodinámicos (HDM) que son incluidos por la aplicación de vacío o por las tensiones liberadas en el proceso de relajación y que están condicionados por la estructura del alimento (porosidad).
- Mecanismos de vaporización-condensación cuando se trabaja a presiones cercanas a la presión de vapor.

En este estudio se realizaron los mecanismos dependientes del gradiente de concentración y de presiones, utilizando los modelos de Crank, Magee e Hidrodinámico (HDM) respectivamente.

Generalmente, cuando se quiere utilizar un modelo fenomenológico para procesos a presión atmosférica (OD) se emplea el modelo de Crank, que consiste en una solución de la ley de Fick en estado estacionario y que representa el mecanismo difusional (Crank, 1975). En cuanto a los modelos empíricos y semiempíricos, se usan Azuara (Azuara *et al.*, 1998), Magee (Moreira y Sereno, 2003; Giraldo *et al.*, 2003; Parjoko *et al.*, 1996) entre otros. Para modelar procesos al vacío (VOD) o con pulsos de vacío (PVOD) se usan principalmente el modelo del Mecanismo Hidrodinámico (HDM) (Mujica-Paz *et al.*, 2003<sup>a</sup>; Mujica-Paz *et al.*, 2003<sup>b</sup>; Cháfer *et al.*, 2003; Gras *et al.*, 2003).

#### 1.1.1 Modelo de Crank (1975)

Consiste en un grupo de soluciones de la ley de difusión de Fick para diferentes geometrías, condiciones límite y condiciones iniciales desarrolladas por Crank. Es el modelo fenomenológico más conocido para representar el mecanismo difusional y estimar el coeficiente de difusividad efectiva de agua y de soluto migrado (Giraldo *et al.*, 2003). La difusividad efectiva explica al mismo tiempo la variación de las propiedades físicas del tejido y la influencia de las características de la disolución y de las variables de proceso, por lo tanto, observando simplemente la magnitud de  $D_e$  no se entiende explícitamente el impacto de los diferentes parámetros sobre el proceso de OD (Ochoa-Martinez y Ayala, 2005).

#### 1.1.2 Modelo de Magee (1978)

Este modelo fue propuesto por Hawkes y Flink (1938) pero varios autores lo atribuyen a Magee quien hizo algunas modificaciones (Parjoko *et al.*, 1996).

#### 1.1.3 Modelo Hidrodinámico (HMD) (1996)

Este modelo se emplea en el proceso de deshidratación osmótica con aplicación de presiones de vacío (Martínez-Monzó

*et al.*, 2000; Giraldo *et al.*, 2003; Cháfer *et al.*, 2003; Mujica-Paz *et al.*, 2003a; Mujica-Paz *et al.*, 2003b).

La cinética de proceso de OD se modela en forma diferente a la del proceso de PVOD. Con OD, básicamente se utiliza la Ley de Fick, ya que el fenómeno está gobernado principalmente por el mecanismo pseudodifusional (PD) mientras que con PVOD debe tenerse en cuenta, además, el mecanismo hidrodinámico (HDM) (Ochoa-Martínez y Ayala, 2005).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Materia prima

La matriz utilizada en la impregnación al vacío correspondieron a cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) variedad "Huando", las cuales fueron separadas directamente de las frutas frescas obtenidas de un mercado local. Las soluciones de impregnación se prepararon con miel de abeja "de flores silvestres" obtenida de los bosques secos y semisecos del departamento de Lambayeque, con un contenido de sólidos solubles de 78 %, los cuales corresponden a un 38% de fructosa, 31% de glucosa, 1% de sacarosa y 8% de maltosa.

### 2.2 Pre-tratamiento

Luego del lavado y pelado de las cáscaras de naranja, se procedió a cortar manualmente, haciendo uso de moldes rectangulares con dimensiones de 180x290 mm y espesor promedio de 6.30 mm. Posteriormente, las cáscaras fueron desamargadas mediante 4 lavados sucesivos basándose en la metodología de Restrepo *et al* (2012) con una solución de bicarbonato de sodio al 10% a temperaturas entre 65 y 70 °C, durante 5 minutos cada lavado, que permitió la solubilización de bioflavonoides como naringina y hesperidina, compuestos que le proporcionan el sabor amargo a la estructura. Finalmente se sometieron las cortezas a un último lavado con agua de mesa a la misma temperatura para

eliminar el bicarbonato que pudiera haber quedado impregnado.

### 2.3 Impregnación al vacío de las muestras.

Las cáscaras de naranja previamente seleccionadas y codificadas fueron pesadas en una balanza semianalítica marca Exact Scale modelo ESP-600G, seguido fueron colocadas en el equipo de impregnación al vacío compuesto por un matraz Kitasato y una bomba de vacío marca Gast modelo DOA-P504-BN. Todos los tratamientos se realizaron a temperatura ambiente (25 °C), mediante 4 pulsos de vacío cada 10 minutos, con tiempos de relajación a presión atmosférica de 15 minutos cada uno, retirándose cada 5 minutos 3 muestras codificadas a las cuales se les registró el peso y se les almacenó en bolsas de polietileno de alta densidad. La ganancia de sólidos se determinó en una estufa mediante el método AOAC (2000).

A partir de la metodología utilizada, se pueden determinar la ganancia de miel en las muestras que nos permiten calcular la impregnación en las cortezas y el coeficiente de difusividad efectiva en un proceso de transferencia de masa en estado no estacionario. En cada tratamiento se calcularon los parámetros de impregnación de las cáscaras basadas en las siguientes ecuaciones:

$$H_{bs} = \frac{W_h - W_s}{W_s} \dots \text{Ecuación (1)}$$

$$SG = W_{ss}^t - W_{ss}^0 \dots \text{Ecuación (2)}$$

Donde  $H_{bs}$  es la humedad en base seca y,  $W_h$  y  $W_s$  es el peso húmedo luego de la impregnación y el peso seco obtenido luego del secado en estufa respectivamente. SG es el sólido ganado y  $W_{ss}^t$  es el sólido seco a un tiempo  $t$ , mientras que  $W_{ss}^0$  es la cantidad de materia seca al tiempo cero.

Para poder determinar el coeficiente de difusividad másica en los tratamientos se hizo uso de las siguientes ecuaciones:

$$\left(\frac{M_0^j - M_t^j}{M_0^j - M_\infty^j}\right) = 2(F_0)^{0.5} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \operatorname{ferc} \left( \frac{n}{F_0} \right) \right] \dots$$

Ecuación (3)

Asumiendo que el número de Fourier es mayor a 0.2 se realiza una reducción al primero sumando en la sumatoria de la ecuación (3), obteniendo la siguiente fórmula:

$$\left(\frac{M_0^j - M_t^j}{M_0^j - M_\infty^j}\right) = 2 \left(\frac{F_0}{\pi}\right)^{0.5} \dots \text{Ecuación (4)}$$

Dónde:

$$F_0 = \frac{D_e t}{e^2} \dots \text{Ecuación (5)}$$

$M_0^j$ ,  $M_t^j$ ,  $M_\infty^j$  y  $M_t^{\text{Total}}$  es la masa del componente "j" a tiempo cero, a un tiempo "t", en algún punto de la solución de impregnación respectivamente y la masa total al tiempo t de la muestra.  $F_0$  es el número de Fourier,  $\operatorname{ferc}$  es la función error complementaria, "e" es el espesor de la corteza de naranja y  $D_e$  es el coeficiente de difusividad efectiva el cual se quiere determinar.

El modelo pseudodifusional de Magee se establece mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$\frac{M_0^j - M_t^j}{M_t^{\text{Total}}} = k_0 + kt^{0.5} \dots \text{Ecuación (6)}$$

Las constantes  $k_0$  y  $k$  indican la ganancia o pérdida de masa en tiempos cortos y la cinética de difusión en el mecanismo osmótico difusional del modelo mencionado.

De la misma forma el modelo del mecanismo hidrodinámico se presenta de la siguiente manera:

$$\frac{M_t^T}{M_0^T} = 1 + k_1 + k_2 t^{0.5} \dots \text{Ecuación (7)}$$

Donde  $M_0^T$ ,  $M_t^T$ , es la masa total inicial y la masa total a tiempo t según la ecuación de cinética de pérdida de peso.

## 2.4 Método experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño compuesto central rotatable para estudiar el efecto del nivel de presión de vacío y de concentración en los parámetros de impregnación. Esta metodología permite el modelado de un polinomio de segundo grado que describe la respuesta. Los datos se analizaron mediante una regresión múltiple a través del método de mínimos cuadrados para ajustarse a la siguiente ecuación:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 \dots \text{Ecuación (8)}$$

Se realizó el análisis estadístico ANOVA para evaluar la significancia del modelo obtenido.

En la tabla 1 se muestran los niveles a evaluar en el experimento de impregnación al vacío.

**Tabla 1.** Variables de Impregnación al vacío y niveles del diseño experimental.

Variables	Códig	Niveles				
		0	-1	0	1	1.4
Presión (mbar)	P	200	273	450	627	700
Concentración (°Brix)	C	40	43	50	57	60

Se analizó estadísticamente la aceptabilidad sensorial mediante la predicción de un modelo matemático, el cual se trabajó con el diseño compuesto central rotatable ajustando los resultados a un polinomio de segundo grado en función de las variables independientes.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Impregnación al vacío

En la tabla 2 se muestra el promedio de ganancia de sólidos y la desviación estándar en cada tiempo de relajación de cada tratamiento estudiado. Todas las cáscaras presentaron ganancia en el tiempo, lo que se evidenció en un aumento del volumen de cada muestra.

**Tabla 2.** Efecto de la concentración y la presión de vacío en la ganancia de sólidos durante cada tiempo de relajación.

Presión (mbar)	Cc (°Brix)	Sólido ganado (g)			
		Tiempo de Relajación			
		1°	2°	3°	4°
273	43	0.28 ± 0.07	0.36 ± 0.06	0.41 ± 0.04	0.47 ± 0.02
273	57	0.28 ± 0.11	0.40 ± 0.06	0.47 ± 0.09	0.45 ± 0.09
627	43	0.27 ± 0.09	0.33 ± 0.09	0.36 ± 0.04	0.53 ± 0.02
627	57	0.36 ± 0.09	0.40 ± 0.04	0.45 ± 0.08	0.57 ± 0.10
200	50	0.36 ± 0.09	0.51 ± 0.03	0.47 ± 0.02	0.45 ± 0.07
700	50	0.36 ± 0.08	0.46 ± 0.03	0.52 ± 0.06	0.65 ± 0.06
450	40	0.36 ± 0.02	0.39 ± 0.04	0.51 ± 0.02	0.61 ± 0.09
450	60	0.42 ± 0.06	0.57 ± 0.05	0.71 ± 0.03	0.82 ± 0.10
450	50	0.35 ± 0.03	0.39 ± 0.06	0.47 ± 0.09	0.65 ± 0.09
450	50	0.31 ± 0.01	0.27 ± 0.06	0.51 ± 0.04	0.58 ± 0.06
450	50	0.36 ± 0.07	0.48 ± 0.03	0.52 ± 0.03	0.51 ± 0.06

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de pérdida de agua expresados en base seca para las cáscaras de naranja impregnadas en las soluciones hipertónicas de miel. El mayor porcentaje de agua perdida se registró en el tratamiento con 450 mbar de presión de vacío y 50 °Brix de concentración, pudiéndose observar un

comportamiento similar en el tratamiento a 450 mbar con 60 °Brix, mostrando una condición de saturación en el último intervalo de tiempo, como consecuencia de la elevada concentración de la solución lo que origina que el sistema alcance el equilibrio de presiones.

**Tabla 3.** Efecto de la presión de vacío y la concentración en la pérdida de agua expresada en base seca.

Presión (mbar)	Cc (°Brix)	Humedad en base seca (g H <sub>2</sub> O/g mat. seca)												
		Tiempo de Relajación (minutos)												
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
273	43	2.44	3.31	3.04	2.51	2.35	2.29	2.30	2.26	1.84	1.78	2.04	2.06	2.03
273	57	2.44	2.88	2.39	2.27	2.00	2.05	1.87	2.09	1.53	1.69	1.49	1.51	1.47
627	43	2.44	2.95	2.31	2.64	2.42	2.15	2.26	2.09	2.06	1.80	1.87	1.87	1.66
627	57	2.44	2.35	2.34	2.02	1.84	1.86	1.83	1.69	1.73	2.03	1.49	1.54	1.49
200	50	2.44	2.85	2.73	2.50	2.21	2.22	2.05	2.01	1.91	1.67	2.12	1.81	1.94
700	50	2.44	2.28	2.20	2.05	1.99	1.77	1.91	1.72	1.66	1.61	1.63	1.45	1.60
450	40	2.44	2.67	2.82	2.40	2.49	2.26	2.45	2.24	2.26	2.02	1.86	2.17	1.85
450	60	2.44	2.84	2.21	2.34	1.87	1.94	1.78	1.82	1.74	1.68	1.61	1.55	1.43
450	50	2.44	2.28	1.99	2.04	1.96	2.18	1.27	1.81	1.84	1.65	1.60	1.47	1.61
450	50	2.44	2.33	2.30	2.07	2.10	2.12	2.95	1.75	1.78	1.66	1.66	1.67	1.43
450	50	2.44	2.26	2.18	2.13	1.98	1.74	1.75	1.78	1.68	1.74	1.67	1.76	1.64

En la tabla 4 se muestran los resultados de Difusividad efectiva obtenidas mediante el modelo de Crank, así como

también las constantes  $k$ ,  $k_0$ ,  $k_1$  y  $k_2$  para el modelo de Magee e Hidrodinámico respectivamente.

**Tabla 4.** Influencia de la presión de vacío y la concentración en las constantes de difusividad para los modelos de Crank, Magee e Hidrodinámico.

Presión (mbar)	Cc (°Brix)	Modelos				
		Crank		Magee		Hidrodinámico
		$D_e (10^{-12})(m^2/s)$	$K(s^{-0.5})$	$k_0$	$k_1$	$k_2(s^{-0.5})$
273	43	2.2384	0.0195	0.0526	0.2417	-0.0074
273	57	1.2791	0.0224	0.0075	0.1640	-0.0091
627	43	1.5958	0.0164	0.0671	0.1698	-0.0069
627	57	2.1603	0.0229	0.0028	0.0453	-0.0069
200	50	2.9227	0.0388	0.0001	0.1555	-0.0066
700	50	2.6247	0.0224	0.0435	0.0360	-0.0069
450	40	3.2110	0.0212	0.0591	0.1412	-0.0051
450	60	2.2449	0.0182	0.0180	0.1275	-0.0085
450	50	2.0389	0.0172	0.0425	0.0120	-0.0064
450	50	1.4942	0.0172	0.0586	0.0646	-0.0069
450	50	2.2313	0.0282	0.0549	0.0092	-0.0059

Los tratamientos de DOV de las cáscaras de naranja se llevaron a cabo para llenar un diseño compuesto central rotatable (Tabla 1), de manera que los resultados puedan ser mostrados como superficie de respuesta. Por lo tanto, se aplicó un análisis de regresión para correlacionar los valores obtenidos de difusividad efectiva con las variables independientes.

El polinomio de segundo orden resultante se muestra seguido de la Tabla 5, así como la contribución de las variables independientes para el ajuste estadístico. Se observa que el modelo de

regresión obtenido no fue significativo con un valor de  $p > 0.05$ , y el polinomio resultante obtuvo un  $R^2$  de 0.3680. El valor de significación de todos los coeficientes fue mayor a 0.05. Sobre la base de este modelo se generó una superficie de respuesta para la Difusividad efectiva, la cual no se muestra debido a que no es posible concluir en base a dicha figura. Este gráfico representaba la evolución de la variable de respuesta en función de la presión de vacío y concentración de miel.

**Tabla 5.** Coeficientes obtenidos para el modelo cuadrático y valor p de significancia.

	Regression Coeff.	Std.Err.	t(5)	p	-95% Cnf. Limt	+95% Cnf. Limt
Mean/Interc.	2.06E-11	1.57E-11	1.31	0.246	-1.97E-11	6.08E-11
(1)Presión (L)	-2.11E-14	1.56E-14	-1.35	0.235	-6.13E-14	1.91E-14
Presión (Q)	6.24E-18	8.92E-18	0.699	0.516	-1.67E-17	2.92E-17
(2)Concentración(L)	-5.24E-13	5.73E-13	-0.914	0.402	-2.00E-12	9.50E-13
Concentración(Q)	3.55E-15	5.60E-15	0.634	0.554	-1.08E-14	1.79E-14
1L by 2L	3.07E-16	2.67E-16	1.15	0.302	-3.79E-16	9.94E-16

La ecuación cuadrática obtenida que modela la superficie de respuesta para la difusividad efectiva es el siguiente:

$$D_e = 2.06 \times 10^{-11} - 2.11 \times 10^{-14}P + 6.24 \times 10^{-18}P^2 - 5.24 \times 10^{-13}C + 3.55 \times 10^{-15}C^2 + 3.07 \times 10^{-16}PC$$

Para validar el modelo se realizó un ANOVA (Tabla 6) con el fin de calcular el valor p y el índice de correlación. Como se observa el valor p es mayor a 0.05 lo que evidencia que el modelo obtenido resulta no significativo en el análisis realizado. Así mismo el  $R^2$  calculado es de 0.3680, no habiendo un

ajuste adecuado debido a la excesiva dispersión entre los datos experimentalmente y los obtenidos por el modelo.

**Tabla 6.** Análisis de varianza para el modelo cuadrático obtenido.

	SS	df	MS	F	p
MODELO	1.28E-24	5	2.55E-25	0.582	0.7163
RESIDUOS	2.19E-24	5	4.38E-25		
TOTAL	3.47E-24	10			
R <sup>2</sup>	0.3680				

El ANOVA de la tabla 6 ratifica la no significancia del modelo obtenido para la difusividad efectiva.

En la tabla 4 se observa que los coeficientes difusivos tienen dos comportamientos, son mayores cuando las presiones de vacío y las concentraciones son elevadas debido a que estas presiones actúan como fuerza impulsora para la transferencia de masa, liberando el fluido nativo de las cáscaras lo que produce una mayor expansión de los poros de la matriz permitiendo la entrada de soluciones de alta viscosidad (Bonilla y Gonzáles, 2012); y cuando las presiones y concentraciones son bajas, esto se debe a que la concentración del medio de impregnación es de baja viscosidad lo que origina que los solutos se impregnen de forma masiva en la matriz resultando en un aumento del coeficiente de difusividad efectiva de masa. El efecto de la concentración de la solución osmótica en la ganancia de sólidos de la matriz estudiada es similar a lo observado por Mujica-Paz *et al.*, (2003b), en el tratamiento de impregnación al vacío de tres frutos diferentes (manzana, melón y mango) con soluciones de sacarosa, alcanzaron valores de ganancia de sólidos a concentraciones menores de 55 °Brix (menos viscosas) en condiciones de vacío y a temperatura de 35 °C.

Los valores de difusividad encontrados (Tabla 4) se encuentran en el orden de

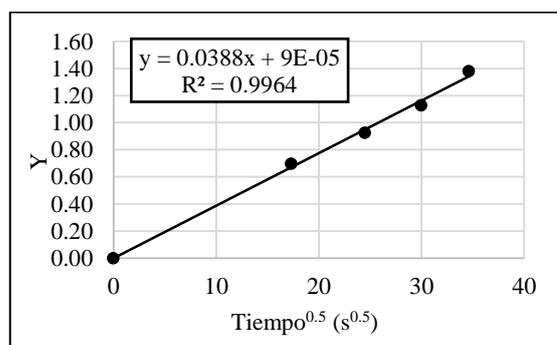
$10^{-12}$  lo que se considera un resultado aceptable de acuerdo a lo obtenido por Ochoa y Ayala (2005), los que presentan difusividades de ganancia de sólidos expresado como soluto en un orden de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s. Por otro lado Escriche *et al.* (2000) evaluaron dos mecanismos de transferencia: deshidratación osmótica a presión atmosférica e impregnación al vacío, obteniendo mejores resultados de difusividad efectiva en el proceso de impregnación a vacío en el orden de  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s siendo la temperatura la variable más importante, de acuerdo a lo dicho por Bonilla y Gonzáles (2012), quienes indican que la temperatura es la más importante de las variables que influyen en el mecanismo de impregnación al vacío, ya que la difusión es un fenómeno dependiente de esta. A temperaturas altas de proceso, la velocidad de pérdida de agua y ganancia de sólidos son mayores.

La mayor difusividad obtenida en las cortezas de naranja se debe a que la configuración porosa se encuentra en la zona del albedo a diferencia de la estructura de la manzana y el kiwi (Ochoa-Martinez y Ayala, 2005; Escriche *et al.*, 2000) los cuales presentan una mayor porosidad en toda su superficie. Del mismo modo la forma de la matriz de impregnación tiene un efecto significativo en el mecanismo de transferencia de masa; pues de acuerdo a los resultados obtenidos por los autores citados se obtuvieron coeficientes difusivos mayores con las matrices cúbicas que con lamina semi-infinita.

En la tabla 4 se muestran los resultados de  $k$  y  $k_0$  que corresponden al modelo de Magee;  $k$  se asocia con las velocidades de transferencia de agua y de solutos que ocurre a través del mecanismo osmótico-difusional y  $k_0$  cuantifica la ganancia o pérdida de masa que ocurre después de tiempos de proceso muy corto debido a la acción del mecanismo hidrodinámico (HDM)

promovido por presiones impuestas o capilares (Giraldo *et al.*, 2003).

La figura 1 es el resultado de la metodología utilizada para la determinación de los coeficientes  $k$  y  $k_0$  en el Modelo de Magee, donde dichos coeficientes son el intercepto y la pendiente respectivamente. La figura mostrada representa el tratamiento 5.



**Figura 1.** Regresión lineal para evaluar los coeficientes  $k$  y  $k_0$  en el modelo de Magee.

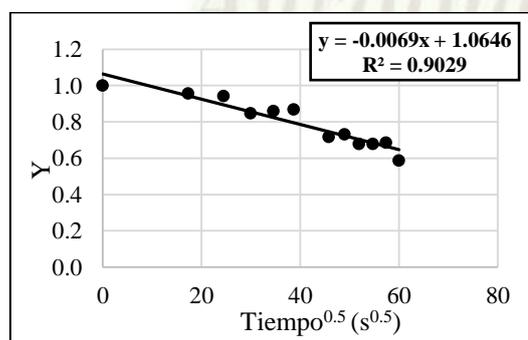
Sereno *et al* (2001) definen los parámetros  $k$  y  $k_0$  como coeficientes globales de transferencia de masa ya que tienen en cuenta las resistencias internas y externas a la transferencia, lo que no hace el modelo de Crank.

Se obtuvieron valores entre 0.0164 – 0.0388 y 0.0001 – 0.0671 para  $k$  y  $k_0$  respectivamente, lo que indica que el mecanismo de transferencia predominante es el hidrodinámico por encima del pseudodifusivo, esto debido a que el gradiente de presiones actúa como fuerza impulsora aumentando las velocidades de transferencia.

En la tabla 4 se muestran también los resultados de las constantes  $k_1$  y  $k_2$  del modelo del Mecanismo Hidrodinámico (HDM), obtenidos mediante un ajuste lineal de los resultados a partir de la ecuación (7) con un coeficiente de correlación  $R^2$  entre 0.52 y 0.90.  $k_1$  y  $k_2$  representan la contribución total de intercambio de masa debido al mecanismo Hidrodinámico (HDM) y la cinética conjunta de los mecanismos pseudodifusivos (Ochoa-Martínez y Ayala, 2005).

Se puede observar que los valores de  $k_1$  son mayores a los de  $k_2$ , lo que evidencia que la mayor contribución de transferencia de masa se debe a las condiciones hidrodinámicas, y en menor grado al mecanismo pseudodifusivo fickiano.

De la misma manera que para el modelo de Magee, la figura 2 muestra el resultado del tratamiento 10 para el análisis del Mecanismo Hidrodinámico, obteniendo un coeficiente  $R^2$  de 0.9029, significando una adecuada proporcionalidad entre la ganancia de sólido respecto al tiempo.



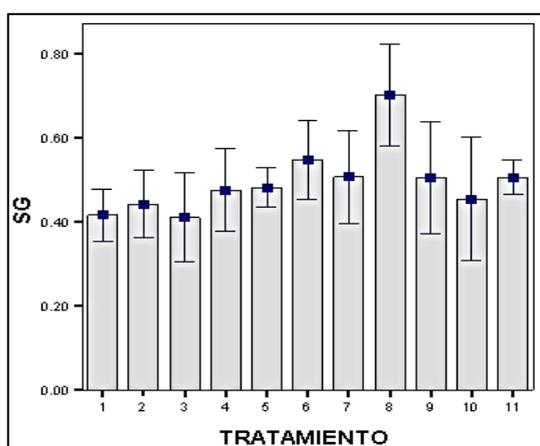
**Figura 2.** Regresión lineal para evaluar los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  en el modelo hidrodinámico.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Escriche *et al* (2000) en un proceso de deshidratación osmótica con pulso de vacío de 10 minutos con soluciones de sacarosa, para los valores de  $k_1$  y  $k_2$  presentan a 25°C los siguientes valores: 0.0034 y -0.0018 respectivamente. Comparando estos resultados con los obtenidos experimentalmente se puede observar que en el caso de las cortezas de naranja tuvo una mayor predominancia el efecto del mecanismo hidrodinámico; lo que es debido a las características que poseen las diferentes matrices de impregnación estudiadas en lo que se refiere al contenido de agua, porosidad, forma, espesor, firmeza, entre otras.

### 3.2 Ganancia de sólidos

Se analizaron las diferencias entre tratamientos en la cantidad de sólido ganado, mediante una prueba de

Tamhane asumiendo varianzas diferentes. Se encontró diferencias entre los tratamientos 1, 2, 3, 4 y 5 con el tratamiento 8, lo cual es resultado de los efectos de la presión y concentración a los que fueron sometidas las matrices. Se obtuvo mayor ganancia en el tratamiento 8, debido a la mayor concentración de este tratamiento, mientras que la menor ganancia se dio para el tratamiento 3, debido a una baja concentración de solución de impregnación.



**Figura 3.** Diferencias significativas en la ganancia de sólidos entre tratamientos.

### 3.3 Análisis Sensorial

Se evaluó la aceptabilidad sensorial de cada tratamiento con 30 panelistas no entrenados utilizando una prueba hedónica con escala no estructurada, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Resultados del análisis sensorial de cada tratamiento.

Presión (mbar)	Concentración (°Brix)	Aceptabilidad
273	43	3.7 ± 1.7
273	57	3.2 ± 1.8
627	43	3.6 ± 1.8
627	57	3.4 ± 2.6
200	50	4.2 ± 2.3
700	50	4.2 ± 2.5
450	40	4.0 ± 2.3
450	60	5.3 ± 1.8
450	50	5.1 ± 2.1

Para el análisis estadístico se utilizó la metodología propuesta por Watts *et al* (1995), la cual se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 8.** Análisis de varianza para la prueba hedónica no estructurada.

Fuente de variación	G L	SC	CM	Relación F	
				Calculada	Tabulada
Total	26	1283.08			
Tratamiento	8	125.29	15.66	4.76	1.94
Panelistas	29	394.39	13.60	4.13	1.46
Error	23	763.40	3.29		

Según Watts *et al* (1995) si el valor F calculado es superior al valor F tabulado, para el mismo número de grados de libertad, habrá evidencia de que hay diferencias significativas. De acuerdo a lo mencionado anteriormente y a los resultados obtenidos se observa que existen diferencias significativas entre tratamientos y panelistas. En el primer caso se debe a que las variables presión de vacío y concentración influyeron significativamente en la aceptabilidad de cada muestra. El tratamiento más aceptable fue el de 450 mbar de presión con 60 °Brix de concentración el cual fue el que presentó un mayor contenido de sólidos ganados. La razón principal que explica las diferencias significativas entre panelistas es que se trabajó con un panel no entrenado. Watts *et al* (1995) indica también que cuando se trabaja con paneles no entrenados es recomendable realizar una mayor cantidad de pruebas con el fin de aumentar la variabilidad y reducir el error experimental.

En la tabla 9 se muestra el ANOVA del modelo obtenido para el modelo de aceptabilidad sensorial.

**Tabla 9.** Análisis de Varianza para el modelo de aceptabilidad sensorial

	SS	df	MS	F	p
<b>Modelo</b>	3.548	5.0	0.710	1.425	0.353
<b>Residuos</b>	2.489	5.0	0.498		
<b>Total</b>	6.037	10.0			
<b>R<sup>2</sup></b>	0.588				
<b>R<sup>2</sup> ajustado</b>	0.175				

La ecuación del modelo obtenido es la siguiente:

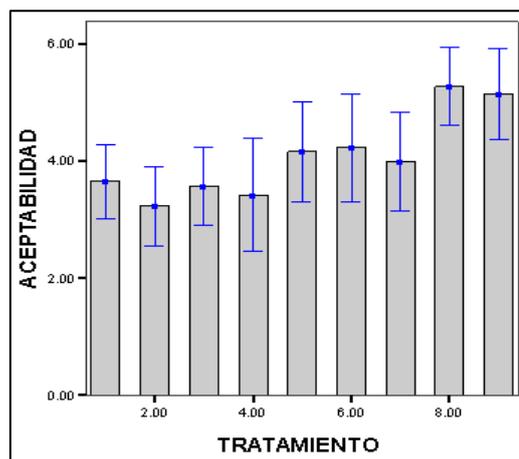
$$\text{Aceptabilidad} = 5.13 + 0.025P - 0.71P^2 + 0.16C - 0.49C^2 + 0.007PC$$

El cual no es significativo, pues como se puede observar en la Tabla anterior el valor de p es mayor a 0.05. Al contrastar los resultados obtenido por el modelo con los de panel sensorial, se obtiene un coeficiente de correlación de 0.588 y el coeficiente de correlación R<sup>2</sup> ajustado de 0.175, demostrando que las variables mencionadas no se ajustan al diseño compuesto central rotatable.

Las diferencias significativas que existen entre los panelistas, se debió a que como estos eran no entrenados, la evaluación que realizaron se vio influenciada de manera diferente en cada uno de ellos, no solo por el sabor, sino también por la textura, el olor y la apariencia del producto. Sin embargo si las evaluaciones se hubiesen sido realizadas con un panel entrenado, estos hubiesen evaluado independientemente de las demás características.

Debido a la no significancia del modelo obtenido, se procedió a evaluar entre que tratamientos habían diferencias significativas utilizando la prueba de Tukey, asumiendo varianzas iguales, tal como muestra la figura 6.

En la siguiente figura se observa que el tanto el tratamiento 2, 3 y 4, tienen diferencias con el tratamiento 8 y por otro lado el tratamiento 9 muestra diferencias significativas con los tratamientos 2 y 4.

**Figura 1.** Diferencias significativas en la aceptabilidad entre tratamientos.

Al comparar las diferencias de los tratamientos con respecto a la aceptabilidad y a la ganancia de sólidos, se observa que la ganancia de sólidos que hubo en las cáscaras de naranja influyó en el análisis realizado por los panelistas quienes al probar una muestra con mayor cantidad de miel, es decir mayor dulzor, dieron una mayor calificación a la misma, y por otro lado, al probar una muestra con menor cantidad de miel, es decir menor dulzor, dieron una calificación más baja al snack. Esto se aprecia en que el tratamiento 8, tanto en la aceptabilidad como en la ganancia de sólidos, tiene diferencias significativas con los tratamientos 2, 3 y 4. Asimismo se ve que en ambos casos, el tratamiento 8 no tiene diferencias significativas con los tratamientos 6, 7 y 9, los cuales al igual que el tratamiento 8 presentan mayor ganancia de sólidos y son las más aceptadas.

#### 4. Conclusiones

Al observar los valores de difusividad obtenidos para cada tratamiento se notó que a presiones y concentraciones tanto altas como bajas, se obtuvieron los mayores resultados en la ganancia de sólidos. Al evaluar las constantes de los modelos de Magee se observó que  $k_0 > k_1$ ; y en el modelo Hidrodinámico se observó que  $k_1 > k_2$ , por lo que la transferencia de miel a la matriz era influenciada mayormente por la presión

impuesta en el sistema, predominando el mecanismo hidrodinámico sobre el pseudodifusivo, sin embargo, se requieren estudios estructurales y de microscopias para tener una explicación más clara de lo que sucede dentro de la fruta.

## 5. Referencias

- AOAC International. (2000). *Official Methods of Analysis*. 17 ed. Gaithersburg.
- Azuara, E., Beristain, C. I., y Gutierrez, G. F. (1998). A Method for continuous kinetic evaluation of Osmotic Dehydration. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technology*, I(31), 317-321.
- Bonilla Botía, S. L., y Gonzáles Mariño, G. E. (2012). Diseño de un equipo de deshidratación osmótica con pulsos de vacío (DOPV) de tamaño industrial y de generación de la propuesta económica para la construcción del equipo. Universidad de la Sabana, Departamento de Ingeniería de Producción Agroindustrial, La Sabana (Colombia).
- Cháfer, M., Gonzáles-Martínez, C., Chiralt, A., y Fito, P. (2003). Microstructure and vacuum impregnation response of citrus peels. *Food Research International* (36), 35-41.
- Cháfer, M., Ortolá, M., Chiralt, A., y Fito, P. (2005). Aprovechamiento alimentario de la corteza de naranja por técnicas de impregnación a vacío. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Tecnología de Alimentos, Valencia. Obtenido de <http://fci.uib.es/Servicios/libros/conferencias/seae/Aprovechamiento-alimentario-de-la-corteza-de.cid221911>
- Chen, L., Mehta, A., Berenbaum, M., Zangerl, A., y Engeseth, N. (2000). Honeys from different floral sources as inhibitors of enzymatic browning in fruit and vegetable homogenates. *Journal of Agricultural and food chemistry*, X(48).
- Crank, J. (1975). *The mathematics of diffusion* (Segunda ed.). Bristol: Oxford University Press.
- Escriche, I., García-Pinchi, R., Andrés, A., y Fito, P. (2000). Osmotic dehydration of kiwifruit (*Actinidia Chinensis*): fluxes and mass transfer kinetics. Universidad Politécnica de Valencia, Department of Food Technology, Valencia.
- FAO. (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Recuperado el 12 de Diciembre de 2014, de <http://www.fao.org/economic/est/est-commodities/citricos/es/>
- Fito, P., Chiralt, A., Barat, J., Andrés, A., Martínez-Monzó, J., y Martínez-Navarrete, N. (2001). Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, (49), 297-302.
- Fito, P., Chiralt, A., Andrés, A., y Mata, M. (1995). Deshidratación osmótica de alimentos: Aplicación de tratamientos a vacío. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Tecnología de Alimentos, Valencia.
- Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., y Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of Food Engineering* (58), 33-43.
- Gonzales Paramas, A. M., Gomez Bares, J. A., García Vilanova, R. J., Rivas Palá, T., Ardanuy Albajar, R., y Sánchez Sánchez, J. (2000). Geographical discrimination of honeys by using mineral composition and common chemical quality parameters. *Journal of the Science of food and the Agriculture*, III(80), 157-165.
- Gras, M. L., Vidal, D., Betoret, N., Chiralt, A., y Fito, P. (2003). Calcium fortification of vegetables by vacuum impregnation interactions with cellular matrix. *Journal of Food Engineering*(56), 279-284.
- Hawkes, J., y Flink, J. (1938). Osmotic concentration of fruit slices prior to freeze dehydration. *International Journal of Food science and technology*, (5), 71-75.
- Martínez-Monzó, J., Barat, J. M., Gonzáles-Martínez, C., Chiralt, A., y Fito, P. (2000). Changes in thermal properties of apple due to vacuum impregnation. *Journal of Food Engineering*(43), 213-218.
- Ministerio de Agricultura. (2010). *Cítricos. Perú, un campo fértil para sus inversiones*. Lima, Perú. Obtenido de <http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/herramientas/organizaciones/dgca/citricos.pdf>
- Moreira, R., y Sereno, A. (2003). Evaluation of mass transfer coefficients and volumetric shrinkage during osmotic dehydration of apple using sucrose solutions in static and non-static conditions. *Journal of Food Engineering*(57), 25-31.
- Mujica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E., y Welti-Chanes, J. (2003)a. Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*(56), 307-314.

- Mujica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., López-Malo, A., Palou, E., y Welti-Chanes, J. (2003)b. Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*(57), 305-314.
- Mujica-Paz, H., Valdez-Fragoso, A., Lopez-Malo, A., Palou, E., y Welti-Chanez, J. (2003)b. Impregnation and osmotic dehydration of some fruits:effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Engineering*(57), 305-314.
- Ochoa-Martinez, C. I., y Ayala Aponte, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *Ciencia y Tecnología alimentaria*, V(4), 330.342.
- Parjoko, K. A., Rahman, M. S., Buckle, K. A., y Perera, C. O. (1996). Osmotic Dehydration kinetics of pineapple wedges using palm sugar. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*(29), 452-459.
- Restrepo Duque, A. M., Arredondo Velázquez, A., Morales, C., Tamayo Mesa, M., Benavides Paz, Y. L., Bedoya Mejía, V., y Vélez Argumedo, C. (2012). Aplicación de la técnica de impregnación a vacío en el desarrollo de cáscaras de naranja minimamente procesadas fortificadas con potasio, sodio y vitaminas B1, B6 Y B9. *Journal of Engineering and Technology*, I(1), 8-16.
- Rojas Ll., J. P., Perea V. A., y Stashenko, E. (2008). Obtención de aceites esenciales y pectinas a partir de subproductos de jugos cítricos. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica.*, XVI(1), 110-115.
- Sereno, A. M., Moreira, R., y Martínez, E. (2001). Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. *Journal of Food Engineering*(47), 43-49.
- Spreen, T. H. (2001). FAO Simposio sobre Cítricos. Proyecciones de la producción y consumo mundial de los cítricos para el 2010. China. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-x6732s/x6732s03.pdf>
- Watts, B. M., Ylimaki, G. L., Jeffery, L. E., y Elías, L. G. (1995). Métodos sensoriales básicos para la evaluación de alimentos. Ottawa: Centro internacional de investigación para el desarrollo.

