

UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales**

**Sebastian Gutierrez Pacheco**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2016

## II Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales

---

# **Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales**

**Sebastian Gutierrez Pacheco**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería – Ingeniería Agrícola**

Director:  
Alfonso Parra Coronado  
Ingeniero Agrícola, Ph. D.

Codirector:  
Joahnn H. Palacios Ríos  
Ingeniero Agrícola, M. Sc.

Línea de investigación:  
Poscosecha de productos agrícolas

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2016

#### **IV** Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales

---

*Dedicado a mi familia, a los que diariamente  
se esmeran por cosechar nuestros alimentos y  
a la hermosa tierra dueña de mi historia*

**VI** Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales

---

# Agradecimientos

Al redactar este documento para resumir mi experiencia en mi formación como Magister, dedico esta sección al apoyo de varias personas que hicieron parte de esta locura.

Le agradezco al Ingeniero Joahnn Palacios por su apoyo, su tiempo y sus consejos que fueron de suma importancia para el desarrollo de esta investigación. Al Ingeniero Alfonso Parra Coronado por su apoyo incondicional a pesar de la distancia. Al instituto IRDA y la Universidad Laval por acogerme dentro de sus instalaciones como practicante de investigación y facilitar mi investigación en sus laboratorios. De igual manera, un agradecimiento especial al comité del programa “Futurs Leaders dans les Amériques” por otorgarme la beca que me permitió disfrutar de mi experiencia en Quebec, y a la fundación Juan Pablo Gutierrez Cáceres que me apoyó con la beca para formarme como Magister.

Igualmente gracias al Ingeniero Victor Hugo Grisales por sus palabras de inspiración durante el proceso de concepción del sistema. Gracias Leo y Natha por “bregar” con diligencias mías. A la Universidad Nacional y el Programa de Maestría en Ingeniería Agrícola por formarme como persona y como ingeniero al servicio del mundo. Desde luego gracias a todo el equipo que conocí en el Canadá: Beatriz Delgado, Cédric Morin, Dalila Larios, Ángela Triviño, Alexandre Lévesque, Dan Zegan, Stéphane Godbout, Robert Lagacé, quienes me ofrecieron apoyo importante para el desarrollo de esta investigación.

Por último, este logro hubiese sido inalcanzable sin el apoyo incondicional de mi familia y amigos, quienes siempre tenían una palabra de aliento para mí. A todos, una vez más, gracias! Je me souviendrai.

# Resumen

Para el acondicionamiento y aprovechamiento de residuos agroindustriales, el secado es una operación necesaria para reducir su contenido de humedad y así, facilitar su manejo y almacenamiento. El objetivo de este estudio fue diseñar, implementar y evaluar un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión (DCP) para residuos de actividades agroindustriales. Para los ensayos se deshidrataron papas (*Solanum tuberosum* v. Russet Burbank) luego de perder su calidad comercial por la presencia de brotes. Se adoptaron tres etapas para dicho fin: la etapa de diseño y modelización, la construcción y la evaluación del sistema DCP. Para el diseño, se propuso que la frecuencia de caídas de presión y la diferencia de presión permiten controlar el proceso de secado por DCP. Se adaptó el modelo de Thompson para secadores de lecho estático y los parámetros termofísicos del material trabajado. El modelo predijo en al menos un 91% la variedad de los datos experimentales. En la etapa de evaluación se concluyó que la DCP permite la remoción de agua del material principalmente en el momento en que se produce la caída de presión. Al aumentar la frecuencia de caídas de presión, se mejoró la cinética de secado. Los resultados mostraron que la calidad del producto deshidratado varía en función de los parámetros de operación. Este trabajo de investigación puede ser usado como base para futuros trabajos en la utilización de esta técnica de secado, bien sea para la construcción de un nuevo dispositivo o para la modelización del proceso.

**Palabras clave:** Diseño de deshidratador, cinética de secado, aire comprimido, residuo agroindustrial, cambios de color, modelamiento de secado.



# Abstract

For the conditioning and use of agro-industrial biomass, drying is a necessary operation to reduce its moisture content and thus, facilitate handling and storage. The objective of this study was to design, implement and evaluate a dehydration system by successive pressure drops (DCP) for residues from agro-industrial activities. For tests, potato was dehydrated (*Solanum tuberosum* v. Russet Burbank) after losing their commercial quality by outbreaks. Three steps were adopted: design and modeling, implementation and evaluation of DCP. For design, frequency of pressure drops and the pressure difference was proposed to control the drying process by DCP. Thomson's model for static bed dryers and thermophysical parameters of the material were adopted as model basis. The model predicted at least 91% the variety of experimental data. At assess stage, DCP allowed water removal from material mainly when pressure drop occurs. By increasing the frequency of pressure drops, the drying kinetics was improved. The results showed that the quality of the dehydrated product varies depending on the operating parameters. This research could be used as a basis for further works on DCP use, either for the development of a new device or process modeling.

**Keywords:** Dehydrator design, drying kinetics, compressed air, agroindustrial biomass, color changes, drying modeling.

**X** Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales

---

# Contenido

Agradecimientos.....	VII
Resumen.....	VIII
Abstract.....	IX
Lista de símbolos y abreviaturas.....	XIII
Introducción.....	1
1. Marco conceptual.....	5
1.1 Residuos agroindustriales.....	5
1.2. Panorama mundial de los residuos agroindustriales.....	8
1.3. Casos de aprovechamiento de residuos agroindustriales.....	10
1.3.1 Secado de subproductos agroindustriales.....	13
1.4 Deshidratación por cambios cíclicos de presión.....	14
1.5 Conclusión.....	23
1.6 Bibliografía.....	23
2. Temas de investigación y artículos.....	33
2.1 Diseño e implementación de un sistema de DCP.....	33
2.2 Definición de variables a controlar en el sistema DCP.....	51
2.3 Efectos de la deshidratación por DCP sobre la apariencia del producto.....	71
3. Conclusiones generales.....	87



# Lista de símbolos y abreviaturas

## Símbolos en letras latinas

Símbolo	Término	Unidad
$a_w$	Actividad de agua	Adimensional (rango de 0 a 1)
C	Calor específico	$\text{kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$
d	Diámetro	mm
HR	Humedad relativa	Decimal (rango de 0 a 1)
L	Longitud	mm
M.m.s.	Contenido de humedad	decimal, materia seca
M.m.h.	Contenido de humedad	decimal, materia húmeda
m	Masa de producto	kg
P	Presión de trabajo	bar
q	Caudal de aire	$\text{m}^3 \text{min}^{-1}$
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
t	tiempo	s
V	Volumen	L
W	Razón de humedad del aire	$\text{kg agua kg}^{-1} \text{aire seco}$

## Símbolos en letras griegas

Símbolo	Término	Unidad
$\rho$	Densidad	$\text{kg m}^{-3}$
$\theta$	Temperatura Producto	$^{\circ}\text{C}$
$v$	Volumen específico aire	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{aire seco}$
$\omega$	Contenido de humedad del producto	decimal

## Subíndices

<b>Subíndice</b>	<b>Término</b>
a	Fase de alta presión
air	aire
b	Fase de baja presión
f	Medida final
i	Medida instantánea
p	producto
o	Medida Inicial
seco	Producto seco
w	agua

## Abreviaturas

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
APAF	Configuración alta presión, alta frecuencia
APBF	Configuración alta presión, baja frecuencia
BPAF	Baja presión, alta frecuencia
BPBF	Baja presión, baja frecuencia
m.s.	Materia seca
m.h.	Materia húmeda
CLV	Calor latente de vaporización ( $\text{kJ kg}^{-1}$ )
CN	Convección natural
cms	Cantidad de masa seca (kg)
DCP	Deshidratación por cambios cíclicos de presión
FCP	Frecuencia de caída de presión
VS	Velocidad de secado

# Introducción

El aumento de la población mundial ha representado una mayor demanda de energía y de productos de diferente índole, lo que se traduce en una mayor consumo de materias primas. El sistema agroindustrial produce una amplia variedad de subproductos residuales orgánicos que pueden ser acondicionados para obtener productos con valor agregado y, subsecuentemente, ser reutilizados como materia prima. Entre los residuos producidos por este sector se encuentran materiales lignocelulósicos, residuos de cosechas, aceites vegetales, lodos de aguas residuales pre-digeridas, residuos de papel, residuos domésticos, entre otros (Vardanega *et al.*, 2015; Schievano *et al.*, 2009; Yepes *et al.*, 2008; MinAmbiente, 2004). Disponer de técnicas de transformación sostenibles de este tipo de residuos permite evitar problemas ambientales, tales como la eutrofización de las aguas subterráneas y la contaminación atmosférica (Tang *et al.*, 2015) y al mismo tiempo, desarrollar productos de interés para el sector agroindustrial.

Con el fin de aprovechar subproductos agroindustriales, se han explorado procesos de transformación que incluyen una etapa de deshidratación o secado (San Martín y Ramos, 2016; Wuttipalakorn *et al.*, 2009; Esteban *et al.*, 2007). En efecto, la eliminación del agua contenida dentro del material permite conservarlo por más tiempo, disminuir el riesgo a la descomposición, además de facilitar el transporte y almacenamiento. Entre las técnicas de transformación convencionales se reporta la deshidratación por separación centrífuga y por presión neumática (Yves-Martin, *et al.*, 2014) y el uso de aire caliente (Sotiropoulos *et al.*, 2016; Henríquez *et al.*, 2014; Shah *et al.*, 2014; Wuttipalakorn *et al.*, 2009). No obstante, en el primer caso, se generan productos indeseables como fracciones líquidas con alta carga orgánica de difícil aprovechamiento. En el segundo caso, esta técnica de secado de gran duración, puede producir

degradación enzimática y no enzimática que en ocasiones no es deseable (Obied *et al.*, 2009; Larrauri *et al.*, 1997).

Por otra parte, técnicas no convencionales se han reportado para la transformación de productos de características similares. Entre estas técnicas se ha reportado el secado por aspersión y el secado convectivo-infrarrojo. Ceballos-Peñalosa (2008) encontró que los materiales fibrosos pueden causar taponamientos en los componentes del sistema de secado por aspersión. Umesh-Hebbar *et al.* (2004) estudiaron el secado convectivo-infrarrojo en zanahoria y papa, demostrando una utilización de aproximadamente 63 % menos de energía que el secado convectivo puro. Sin embargo, no se ha reportado el caso para residuos agroindustriales.

Otra técnica emergente evaluada en estudios recientes, es la deshidratación por cambios cíclicos de presión (DCP) (en francés, *déshydratation par détentes successives*; en inglés, *Dehydration by Successive Pressure Drops*) (Marciniak, 2015; Albitar *et al.*, 2011; Mounir *et al.*, 2011; Abdulla *et al.*, 2009; Setyoprato *et al.*, 2009; Al Haddad, 2007, Chou y Chua, 2001). Rakotozafy *et al.*, (2000) y Maache-Rezzoug *et al.*, (2002) han reducido el tiempo de secado con la utilización de DCP, en comparación con otras técnicas de secado. En sus investigaciones se sustenta que las reducciones en el tiempo de secado pueden ser entre 480 y 700 minutos en comparación con el secado con vacío y el secado con aire caliente, respectivamente. Chua y Chou (2004) construyeron un dispositivo para deshidratar papa y zanahoria fresca e indicaron que es necesaria más investigación con esta técnica, con el fin de optimizar el proceso de secado y conocer los efectos en el producto.



El uso de esta técnica no se ha reportado para deshidratar biomasa residual. Hay una oportunidad para explorar la implementación de esta técnica en el acondicionamiento de residuos agrícolas para su aprovechamiento. Esta investigación propone el diseño y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión y en su implementación, se contó con papas variedad Russet burbank, desechadas del mercado por presencia de brotes.

El presente documento está ordenado en 4 partes. Una parte preliminar (capítulo 1) donde se menciona el contexto global del aprovechamiento de residuos agrícolas y el papel que cumple la deshidratación como operación dentro del proceso de aprovechamiento del materia. Luego, tres escritos a manera de artículos explican el diseño, implementación y evaluación del sistema (capítulo 2.1, 2.2 y 2.3).

**Hipótesis:** Las condiciones preestablecidas en el diseño y operación del DCP inciden en la cinética de secado, la apariencia final del producto y la actividad de agua de papas descartadas por presencia de brotes.

### **Objetivo general**

Diseñar, implementar y evaluar un sistema de DCP para residuos provenientes de actividades agroindustriales.

### **Objetivos específicos**

- Proponer un protocolo de diseño e implementación de un sistema DCP.
- Definir las variables a controlar más importantes en el sistema DCP.
- Determinar los efectos de la deshidratación por DCP sobre la apariencia final del producto.

**4** Diseño, implementación y evaluación de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión para residuos agroindustriales

---

# 1. Marco conceptual

## 1.1 Residuos agroindustriales

Cantidades considerables de desechos de frutas y legumbres se producen en mercados y agroindustrias. El procesamiento de productos alimenticios (productos básicos perecederos) tiene como objetivo obtener productos con valor agregado, una mayor vida en anaquel y en muchas ocasiones, productos preparados para comer (“*easy-to-eat*”). Para esta transformación son necesarias algunas operaciones como recolección, transporte, lavado, pelado, corte, prensado, escaldado, entre otras; las cuales generan subproductos que en ocasiones no son utilizados (Ajila *et al.*, 2011).

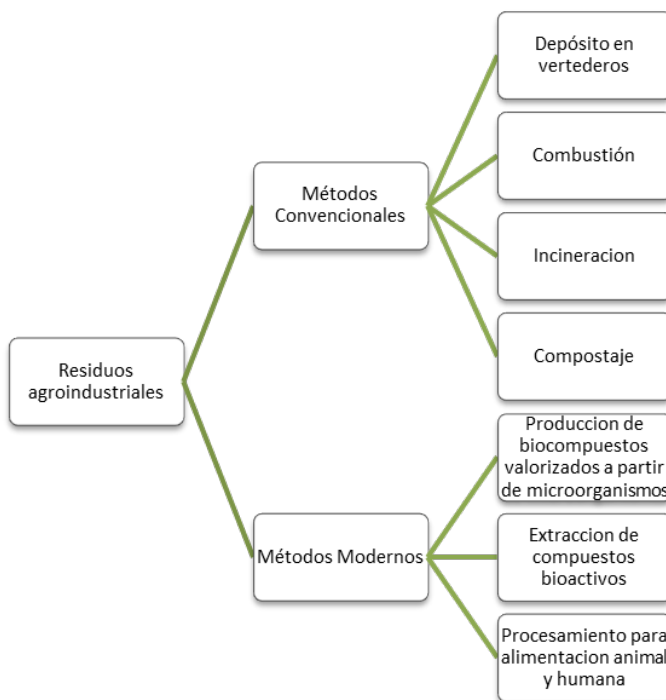
A nivel mundial, desde la producción en campo hasta la comercialización, se desperdicia aproximadamente la tercera parte de los alimentos generados para consumo humano (Galanakis, 2012). Desde un punto de vista logístico, los residuos agroindustriales tienen diferentes características en función de la región y la temporada donde se generan, lo cual hace difícil la identificación, cuantificación y caracterización de los mismos (Mirabella *et al.*, 2014).

Ajila *et al.* (2011) proponen una clasificación válida para la variedad de residuos generados mundialmente así: los residuos de cultivos; subproductos procedentes de la agroindustria de frutas y verduras; subproductos de cereales y legumbres; subproductos de destilerías y fábricas de cerveza y por último, subproductos de la industria de leche, aves de corral, pescado y huevo.

Para esta investigación, se hizo énfasis en los residuos procedentes de la agroindustria de frutas y vegetales teniendo en cuenta que dichos subproductos desechados constituyen una fuente de molestias en los vertederos municipales debido a su alta biodegradabilidad (Misi y Forster, 2002). Cada tonelada de este tipo de residuos representa 4,5 t de CO<sub>2</sub> emitido (Kosseva, 2009). Este tipo de residuos ofrece una oportunidad de uso como materia prima para otro tipo de procesos como la producción de pulpa para papel, uso energético, complemento en la alimentación animal, o corrección y fertilización de suelos (Marciniak, 2015; Ajila *et al.*, 2011).

Los métodos (convencionales y modernos) de gestión y transformación de residuos agroindustriales se resumen en la Figura 1. Aproximadamente, entre el 60 y 80 % de los residuos agroindustriales son dispuestos en áreas abiertas y vertederos (Ngoc y Schnitzer, 2009), lo cual genera contaminación ambiental al sobrepasar la capacidad del vertedero.

**Figura 1.** Diferentes métodos de gestión y transformación de residuos agroindustriales. Tomado y modificado de Ajila *et al.* (2011).



Actualmente los sistemas y las políticas de gestión de residuos han tomado mayor importancia en el sector agropecuario debido a la presión que ejerce el sector sobre los recursos naturales. Kosseva (2009) sugiere tener un enfoque holístico para el manejo de residuos agroindustriales e indica que la industria y los institutos de investigación deben no solo optimizar los procesos actuales para el procesamiento de alimentos con el fin de minimizar las cantidades de residuo resultante, sino desarrollar métodos apropiados para una completa utilización de los subproductos que resultan del procesamiento de alimentos. Una mejor gestión de los residuos agroindustriales puede llegar a ser atractivo para el sector al aumentar la eficiencia de la utilización de recursos, disminuir el impacto sobre el medio ambiente y generar ingresos económicos adicionales.

A pesar de la variedad de residuos de frutas y vegetales, en general se caracterizan por contener sustancias orgánicas (e.g. polisacáridos, azúcares, almidón, vitaminas, minerales, fibras), y por tener vida útil limitada (alta biodegradabilidad) como consecuencia del alto contenido de humedad (Mirabella *et al.*, 2014, Kosseva, 2009, Arvanitoyannis y Varzakas, 2006). Para prolongar la vida útil, se sugiere reducir el porcentaje de humedad, permitiendo conservar la biomasa por más tiempo. Entonces el secado es la operación que puede ser incluida en varios procesos de aprovechamiento de residuos agrícolas. A continuación, en los numerales 1.2 y 1.3 se aborda la situación mundial en torno a este tipo de residuos y algunos casos donde se ha logrado el aprovechamiento de los mismos.

## 1.2. Panorama mundial de los residuos agroindustriales

Actualmente existe una paradoja respecto a la producción y desecho de productos alimenticios: aproximadamente el 15 % de la población de los países en desarrollo muere de hambre (FAO, 2012), mientras que un número creciente de países soluciona problemas referentes a la producción de residuos agroindustriales y el consumo excesivo de alimentos (Mirabella *et al.*, 2014). La Tabla 1 expresa que aunque la cantidad de residuos producida varía entre países, es una problemática global.

**Tabla 1.** Cantidades de desechos de frutas y verduras producidos en algunos países

País	Producción anual de desechos de frutas y verduras (miles de toneladas año <sup>-1</sup> )	Fuente
Japón	90430	Eurostat (2009)
Irlanda	60107	Eurostat (2009)
Eslovaquia	4490	Eurostat (2009)
Holanda	2390	Eurostat (2009)
EEUU	1348	Faostat (2015)
Bélgica	1150	Eurostat (2009)
Austria	880	Eurostat (2009)
Finlandia	860	Eurostat (2009)
Republica Checa	460	Eurostat (2009)
Italia	440	Eurostat (2009)
Nueva Zelanda	150	Eurostat (2009)
India	56	Srilatha <i>et al.</i> (1995)
Reino Unido	20	Kosseva (2009)
Túnez	2	Bouallagui <i>et al.</i> (2003)

La producción de residuos de alimentos se presenta desde la fase de producción, e incluye el procesamiento industrial hasta la comercialización. En otras palabras, los residuos agroindustriales junto con los desechos domésticos de alimentos conforman la cantidad de residuos de alimentos, condición que hace difícil cuantificar la cantidad de residuos agroindustriales y desechos domésticos dentro de cada país. Sin embargo, se estima que el 42 % de los residuos de alimentos se genera en los hogares, 39 % en la industria de procesamiento de alimentos, 14 % en restaurantes y centros de abastecimiento, mientras que 5 % se pierde a lo largo de la cadena de transporte y distribución (Mirabella *et al.*, 2014).

Dentro de este tipo de estimaciones también se ha tenido en cuenta el registro de algunas características de los residuos. Los residuos de frutas y vegetales se caracterizan por tener un alto contenido de humedad (Esteban *et al.*, 2007), en promedio mayor a 20 % m.h. (Tabla 2). En general, bajo esta condición son desechadas cáscaras, pulpa, tallos, entre otras partes no aprovechadas de frutas y vegetales.

**Tabla 2.** Algunos porcentajes importantes de subproductos de la agroindustria de frutas y verduras (Ajila *et al.*, 2011).

<b>Fruta o Vegetal</b>	<b>Naturaleza del residuo</b>	<b>Porcentaje del residuo (con respecto al producto inicial)</b>
Limón	Cáscara y semillas	50
Mango	Cáscara y semillas	45
Arveja	Vaina	40
Banana	Cáscara	35
Piña	Cáscara y corazón	33
Manzana	Cáscara, pulpa y semillas	25
Uvas	Tallo, piel y semillas	20
Tomate	Piel, corazón y semillas	20

**Tabla 2 (Continuación).** Algunos porcentajes importantes de subproductos de la agroindustria de frutas y verduras (Ajila *et al.*, 2011).

<b>Fruta o Vegetal</b>	<b>Naturaleza del residuo</b>	<b>Porcentaje del residuo (con respecto al producto inicial)</b>
Papa	Cáscara	15
Guayaba	Cáscara, corazón y semillas	10
Cebolla	Otras hojas	10

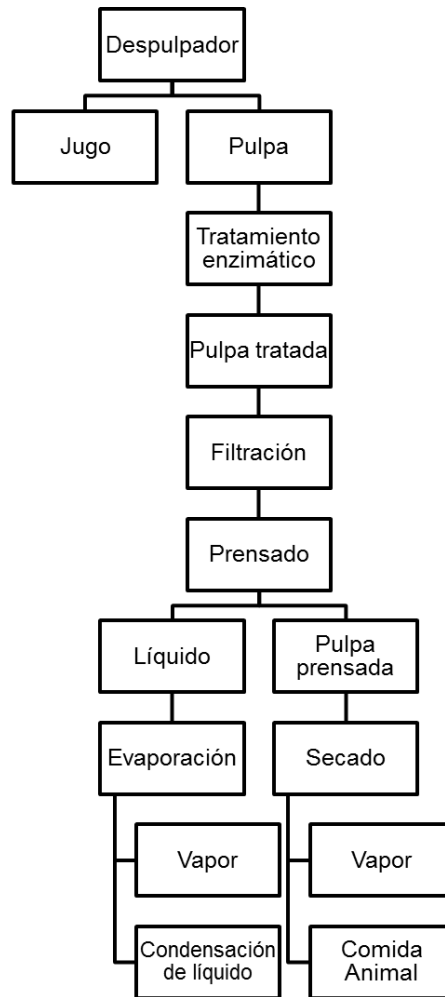
### **1.3. Casos de aprovechamiento de residuos agroindustriales**

Son varios los programas, iniciativas e investigaciones que se han realizado mundialmente para el aprovechamiento de residuos agrícolas. Entre los procesos de aprovechamiento de residuos agrícolas más comunes sobresale el compostaje (Shah *et al.*, 2014) la digestión anaeróbica, producción de biodiesel y combustión (Arvanitoyannis y Varzakas, 2006).

Tripodo *et al.* (2004), reportan el mecanismo para usar pulpa de cítricos como resultado de la elaboración de jugo centrifugado. La Figura 2 muestra el diagrama de flujo para obtener alimento animal a partir de la pulpa. La pulpa se compone principalmente de membranas residuales de endocarpio y epicarpio, es rica en azúcares, fibras y otras sustancias residuales y además, debido a su alto contenido de agua (aproximadamente 86 % m.h.), es difícil para secar en dispositivos de secado industrial común.



**Figura 2.** Esquema de un posible proceso industrial para valorización de pulpa de cítricos. Tomado y adaptado de Tripodo *et al.* (2004) y Arvanitoyannis y Varzakas (2006).



La pulpa de remolacha descartada puede ser utilizada como relleno en la producción de papel, ya sea como pulpa ligeramente deshidratada (contenido de humedad de la pulpa seca  $0,90 \text{ kg agua kg}^{-1} \text{ m.s.}$ ) o pulpa sobreprensada (contenido de humedad de la pulpa sobreprensada  $0,25 \text{ kg agua kg}^{-1} \text{ m.s.}$ ) (Vaccari *et al.*, 2005). Para este fin, la biomasa es deshidratada, luego pasa por un proceso de molienda y criba y posteriormente empacada en sacos para almacenar o transportar. Dentro del proceso de transformación para su

aprovechamiento, es ideal asegurar un secado económico que permita obtener un producto “no-perecedero” en poco tiempo.

La extracción de aceites esenciales a partir de residuos es otro caso de aprovechamiento. Para la cascara de naranja Mira *et al.* (1999) evaluaron diferentes temperaturas y presiones de extracción supercrítica con CO<sub>2</sub>, para cascara de naranja deshidratada (0,0538 kg agua kg<sup>-1</sup> m.s.) y encontraron que para una condición de extracción de 12,5 MPa y 35 °C, el principal componente extraído fue el limoneno (99,5 %). Malik *et al.* (2015) compilaron una serie de casos donde expresan el potencial de la biomasa como fuente de energía e indican que para su uso con fines energéticos es necesario reducir su contenido de humedad y aumentar su densidad.

En los casos anteriores se evidencia que es necesario el desarrollo de técnicas de secado apropiadas para este tipo de productos. Recientemente algunas investigaciones se han centrado en los diferentes métodos de deshidratación disponibles para acondicionar los desechos agroindustriales para su aprovechamiento. Es así que el desarrollo de este tipo de técnicas puede soportar diferentes iniciativas que se desarrollan a nivel mundial. Por ejemplo en Europa, la política de productos (European Commission, 2003), la iniciativa “*resource efficiency flagship*” eficacia (European Commission, 2011) y la comunicación bioeconomía (European Commission, 2012) promueven la reducción de residuos alimenticios en todas las etapas de producción.

Para el caso de Latinoamérica, el proyecto “Cooperativa Agroenergética para la Agricultura Familiar”, apoyado por la hidroeléctrica ITAIPU y la FAO, consiste en biodigestores a pequeña escala en granjas del Estado de Paraná (Brasil). En cada biodigestor se tratan residuos de cultivos agrícolas (maíz, remolacha y papa), además de estiércol proveniente de ganado bovino y porcino. En este proyecto, anualmente se tratan alrededor de 16000 t de residuos, las cuales producen 319000 m<sup>3</sup> de biogás (FAO, 2015).

En Quebec (Canadá), el plan de innovación en energías del Ministerio de Energía y Recursos Naturales (en francés *Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles*, MERN, 2013) promueve el desarrollo de técnicas productoras de energía proveniente de biomasa residual agrícola. Entre las técnicas apoyadas se encuentra la gasificación y la pirolisis.

### **1.3.1 Secado de subproductos agroindustriales**

El secado es una labor comúnmente utilizada para la transformación y aprovechamiento de subproductos agroindustriales, bien sea como la operación principal o como complemento de otra etapa del proceso. El principal objetivo del secado es disminuir el valor de actividad de agua ( $a_w$ ), por lo general a un valor menor de 0,5, con el fin de almacenar a condiciones ambiente el material transformado. La disminución de la actividad de agua reduce la actividad microbiana del material, así como las tasas de algunas reacciones químicas e inhibe el deterioro enzimático (Bonazzi y Dumoulin, 2011).

Las características del secador dependerán del tipo, cantidad y propiedades del producto, así como de la cantidad de agua a eliminar. Si bien el secado se puede realizar a condiciones ambiente lo que resulta más económico, las técnicas a condiciones controladas permiten una mayor tasa de secado. Por lo general, estas últimas utilizan aire a altas temperaturas (Mounir *et al.*, 2012).

## 1.4 Deshidratación por cambios cíclicos de presión

A continuación se describe brevemente el estado del arte de la técnica DCP y las ventajas que ofrece entre las que están la disponibilidad independientemente de las condiciones ambientales, secado homogéneo y rápido (Maache-Rezzoug *et al.*, 2001). Así mismo, durante esta técnica de secado el pardeamiento es reducido lo que incluso reduce reacciones de fragmentación que pueden producir sustancias tóxicas en el material (Bonazzi y Dumoulin, 2011).

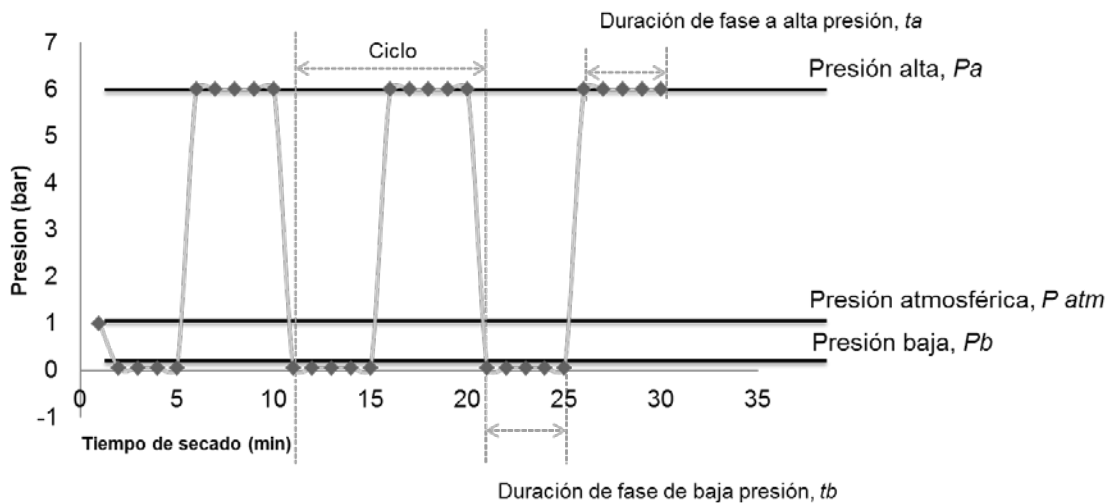
La deshidratación por cambios cíclicos de presión, DCP (en francés, *Déshydratation par Détentes Successives*, DDS; en inglés, *Dehydration by Successive Pressure Drops*, DSPD) es una técnica emergente evaluada en estudios recientes, principalmente por el laboratorio « Maîtrise des Technologies Agro-Industrielles » de la Universidad de La Rochelle (Francia) y utilizada para el secado de productos sensibles al calor (Maache-Rezzoug *et al.*, 2001; Rakotozafy *et al.*, 2000; Allaf *et al.*, 1993).

En esta técnica, el producto es sometido a una serie de ciclos donde se alterna la presión (compresión-vacío). Una condición importante en la operación consiste en producir el vacío o la descompresión en una corta fracción de tiempo ( $< 0,2$  s). Como consecuencia de la caída de presión instantánea se produce el fenómeno de autoevaporación de una cierta cantidad de agua contenida en el material húmedo. La autoevaporación se ha definido como el proceso en el cual la energía necesaria para la remoción de una cantidad de agua es (casi) suministrada por el material húmedo, lo que implica la transferencia de calor del material sólido al agua que es retirada (Al Haddad, 2007).

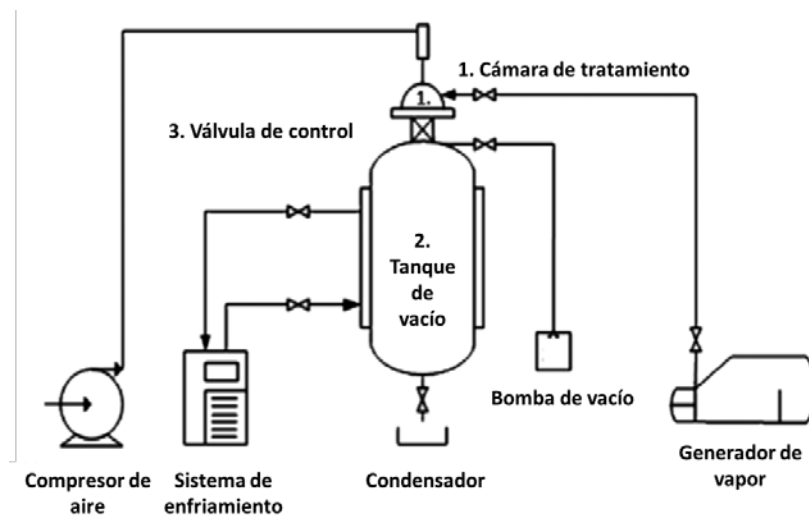
La operación del sistema comienza con una fase de presurización de la cámara en donde se dispone el producto (cámara de tratamiento). En esta fase, la presión ( $P_a$ ) normalmente es menor de 10 bar y la duración ( $t_a$ ) es menor de 2 min. Luego se provoca una caída de presión instantánea hasta un valor de presión de vacío

( $P_b$ ) entre 0,05 y 0,9 bar. Normalmente, la duración de esta fase ( $t_b$ ) no excede 1 min (Figura 3). La cinética de secado (curva de secado) es función de los valores de presión y de tiempo de secado (Rakotozafy *et al.*, 2000). La mayoría de los ensayos realizados para evaluar la DCP utilizan un dispositivo con una configuración idéntica o similar al de la Figura 4.

**Figura 3.** Representación operacional de la DCP. Adaptado de Rakotozafy *et al.*, 2000.



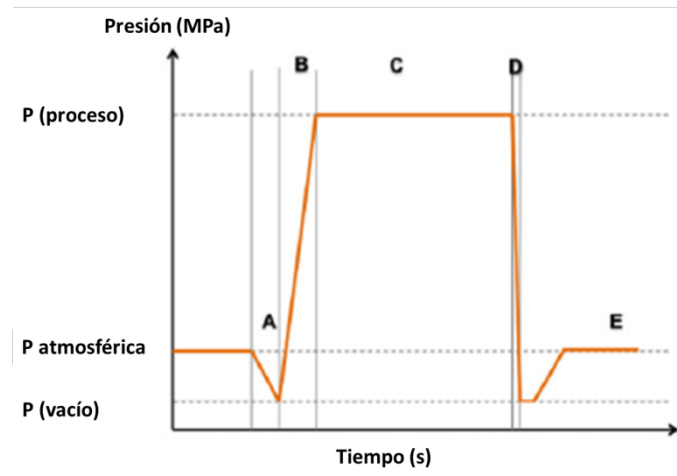
**Figura 4.** Esquema del dispositivo de DCP: 1. Cámara de tratamiento equipada con una camisa de calentamiento, 2. Cámara de vacío equipada con camisa de enfriamiento, 3. Válvula de regulación de la caída de presión. Adaptado de Mounir *et al.* (2012).



No hay reportes sobre el efecto del estado inicial del material húmedo, ni de la gama de presión variable y frecuencia variable de ciclo, ni tampoco se ha intentado integrar la cinética de secado para esta técnica con modelos matemáticos de deterioro.

La técnica DCP es una variante de la técnica de « Depresión instantánea controlada » (Figura 5, en francés conocida como *Détente Instantanée Contrôlée*, DIC). Esta técnica permite realizar ciclos en los cuales se ingresa vapor a la cámara de tratamiento. Luego, la mezcla de vapor húmedo de la cámara es evacuada instantáneamente, reduciendo el contenido de humedad del material. Estas técnicas han sido utilizadas para el secado de vegetales sensibles al calor (Mounir *et al.*, 2011; Iguedjtal *et al.*, 2008; Louka *et al.*, 2004; Louka y Allaf, 2004), el tratamiento de snacks (Yagci y Evci, 2015), la extracción de aceites esenciales (Amor y Allaf, 2009; Kristiawan *et al.*, 2008a; Kristiawan *et al.*, 2008b), la descontaminación de materiales biológicos (Haddad y Allaf, 2007; Haddad *et al.*, 2007) y el tratamiento de diversas fuentes de almidón (Bahrani *et al.*, 2012; Maache-Rezzoug *et al.*, 2008). Las dos técnicas utilizan la disminución de la temperatura de vaporización del agua con el vacío generado, lo cual está asociado al fenómeno de autoevaporación, descrito anteriormente. Estas dos operaciones se encuentran dentro de las técnicas de “secado con hinchamiento” (en inglés “*swell drying*”) debido a los cambios que generan en la estructura del material.

**Figura 5.** Variación de ciclos de presión con DIC: A. Establecimiento de vacío, B. Inyección de vapor, C. Fase de presión alta del vapor, D. Caída de presión instantánea y controlada hacia el vacío, E. Establecimiento de presión atmosférica. Adaptado de Alonzo-Macías *et al.* (2014).



En la Tabla 3 se presenta un resumen de los productos y los parámetros de operación utilizados en investigaciones que han empleado la DCP y DIC. Entre los principales resultados obtenidos, Haddad *et al.*, (2004) demostraron que con la técnica DCP el tiempo de secado es más corto debido a las siguientes razones: 1) los valores reportados del coeficiente de difusión se mantienen a niveles elevados, en comparación con otras técnicas de deshidratación; 2) A diferencia del secado con vacío, durante el DCP la compresión adiabática del aire induce un ligero aumento de la temperatura del producto, lo cual influye en la transferencia de calor entre el aire de secado y el material; y 3) como consecuencia de la descompresión instantánea consecutiva, la presión de vapor en la proximidad de la superficie del producto disminuye, lo que permite la disminución del contenido de humedad del material.

**Tabla 3.** Resumen de los parámetros utilizados en investigaciones realizadas sobre la DCP y la DIC

Autor	Cantidad Utilizada	Producto	Equipo	$P_a$ (bar)	$t_a$ (s)	$P_b$ (bar)	$t_b$ (s)	$M_o$	$M_f$
Alonzo-Macías <i>et al.</i> (2014)	NR	Fresas cortadas (4 a 5 mm, corte transversal)	DIC La Rochelle adaptado a DCP	1,7 a 5,3	13 a 27	0,05	NR	0,18	0,03
Kamal <i>et al.</i> (2012)	3 g	Café verde	DIC. Camara de tratamiento de 30 cm <sup>3</sup> .	1,0 a 6,0	35 a 84	NR	NR	NR	0
Tellez-Perez <i>et al.</i> (2012)	NR	Pimiento verde marroquí ( <i>Capsicum annum</i> )	DIC La Rochelle	1,0 a 6,0	5 a 35	NR	NR	0,20	NR
Albitar <i>et al.</i> (2011)	NR	Cebolla blanca de siria	DIC La Rochelle	2,0 a 5,0	5,0 a 15,0	0,05	NR	4,0	0
Setyoprato <i>mo et al.</i> (2009)	NR	Yuca	DIC La Rochelle	2,6 a 5,34	12,3 a 47,7	0,05	NR	0,20 a 0,25	0
Chou <i>et al.</i> (2006)	NR	Tejido dérmico de cerdo	PSAD	1,0 a 2,25	60	0,20 a 0,80	90 a 360	1,9	0,7

$P_a$ : Presión alta,  $P_b$ : Presión baja,  $t_a$ : duración de la fase de presión alta,  $t_b$ : duración de la fase de presión baja,  $M_o$ : Contenido de humedad inicial en base seca,  $M_f$ : Contenido de humedad final en base seca, NR: No se reporta.



**Tabla 3 (Continuación).** Resumen de investigaciones realizadas sobre DCP y DIC

Autor	Cantidad Utilizada	Producto	Equipo	$P_a$ (bar)	$t_a$ (s)	$P_b$ (bar)	$t_b$ (s)	$M_o$	$M_f$
Haddad <i>et al.</i> (2004)	NR	Pescado: Salmon ( <i>Salmo salar</i> ) como pescado graso, y atún blanco ( <i>Thunnus germon</i> ) como pescado semi-graso.	DIC La Rochelle (DCP y DIC)	2,6 a 5,4	NR	NR	4 a 46	4,0	0
Chua y Chou (2004)	NR	Papa y zanahoria	DCP	0,59 a 1	0 a 5	0,18 a 0,59	2,0 a 10,0	0,78 a 0,87	0
Maache-Rezzoug <i>et al.</i> (2002)	45 g	Gel (comercial) de colágeno de origen bovino	DIC La Rochelle adaptado a DCP	4,5 a 7,5	18 a 102	0,05 a 0,90	5,0 a 15,0	0,992 (m.h.)	0,8
Maache-Rezzoug <i>et al.</i> (2001).	150 g	Sclérogucane (polímero de glucosa)	DIC La Rochelle adaptado a DCP	4,5 a 7,5	5 a 10	0,05	20	2,5	0
Rakotozafy <i>et al.</i> (2000)	10 g	Levadura de pan ( <i>Succhuromyces ccrevisioc</i> )	DIC La Rochelle adaptado a DCP	2,6 a 5,4	10	0,1	8 a 32	1,65-1,87	0

$P_a$ : Presión alta,  $P_b$ : Presión baja,  $t_a$ : duración de la fase de presión alta,  $t_b$ : duración de la fase de presión baja,  $M_o$ : Contenido de humedad inicial en base seca,  $M_f$ : Contenido de humedad final en base seca, NR: No se reporta.

Chou *et al.* (2006) afirman que el valor de  $P_a$  no tiene influencia en la cinética de secado. Aunque ciertos estudios han llegado a la misma conclusión, tanto para DCP (Maache-Rezzoug *et al.*, 2002; Maache-Rezzoug *et al.*, 2001) como para DIC (Tellez-Perez *et al.*, 2012), también se ha reportado lo contrario (Chua y Chou, 2004). En esencia, la diferencia de estos resultados está asociada a la diferencia en los rangos de presión manejados en los ensayos. En los casos en los que  $P_a$  ha tenido efecto sobre la cinética de secado, los valores de  $P_a$  han sido superiores a 2 bar.

En lo que corresponde a la influencia de  $t_a$ , en el caso del secado de gel de colágeno, Maache-Rezzoug *et al.* (2002) han encontrado una relación lineal entre  $t_a$  y la velocidad de secado ( $p < 0,05$ ). Cuando la duración pasa de ser corta (18 s) a ser una duración larga (102 s), la velocidad de secado disminuye de 0,475 a 0,125 kg agua  $\text{kg}^{-1}$  m.s.  $\text{min}^{-1}$ . El punto óptimo se encontró con  $t_a = 18$  s y  $P_a = 6$  bar (129 depresiones  $\text{h}^{-1}$ ). Para los mismos valores de presión de trabajo, la reducción de la duración total del ciclo genera un paso de volumen de aire por unidad de tiempo más grande, aumentando la velocidad de secado.

Algunas investigaciones demostraron que los parámetros de la fase de vacío ( $P_b$  y  $t_b$ ) son más influyentes en la velocidad del secado que los parámetros implicados en la fase de alta presión ( $P_a$  y  $t_a$ ). Chou *et al.* (2006) utilizaron DCP para secar tejido dérmico de cerdo y encontraron que un aumento en  $P_b$  de 0,2 a 0,5 bar representa una reducción en la velocidad del secado de aproximadamente 60 %. Para el caso de deshidratación del gel de colágeno, para una duración de ciclo constante (55 s), cuando  $P_b$  pasa de 0,05 a 9 bar, la velocidad de secado disminuye de 0,261 a 0,122 kg agua  $\text{kg}^{-1}$  m.s.  $\text{min}^{-1}$ , lo que aumenta el tiempo de secado de 464 a 992 min para obtener un producto con contenido de humedad final de 3 kg agua  $\text{kg}^{-1}$  m.s. (Maache-Rezzoug *et al.*, 2002).

Algunos autores han concluido que el efecto de la amplitud del cambio de presión ( $\Delta P = P_a - P_b$ ) es positivo en la cinética del secado. Por ejemplo, Maache-

Rezzoug *et al.* (2002) han desarrollado un modelo de velocidad de secado de colágeno de la forma representada en la Ecuación 1.

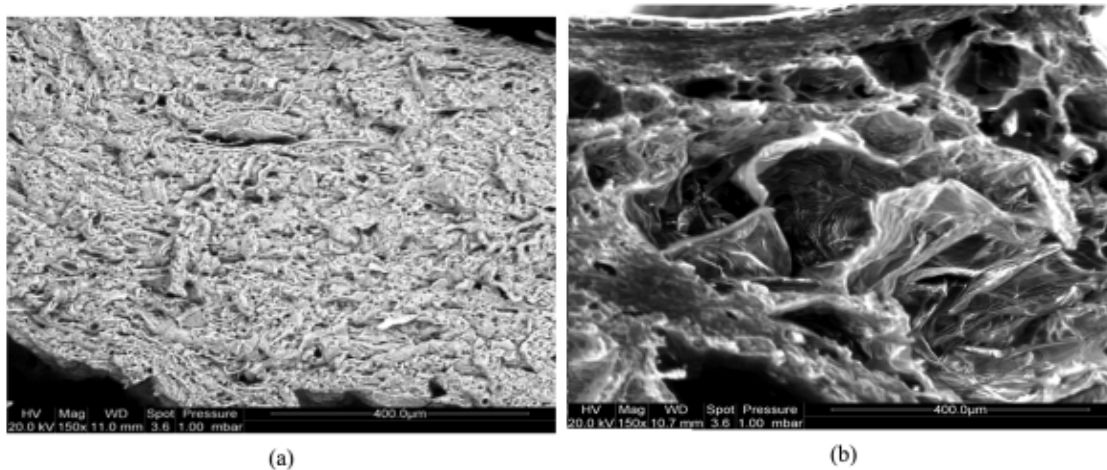
$$\frac{dM}{dt} = Ke^{a^b \Delta P} \quad (1)$$

Donde,  $\frac{dM}{dt}$  es la velocidad de secado ( $\text{kg agua kg}^{-1} \text{ m.s. min}^{-1}$ ),  $\Delta P$  es la amplitud del cambio de presión (en kPa) y  $K$ ,  $a$ ,  $b$  son coeficientes determinados experimentalmente.

No obstante, con la misma amplitud  $\Delta P$ , al ajustar una presión de vacío mayor (en términos absolutos, menor valor de  $P_b$ ), la cinética de secado aumenta. (Chou *et al.*, 2006; Chua y Chou, 2004).

Los cambios en la cinética de secado están asociados con lo que ocurre en la matriz interna del material, particularmente con el cambio de porosidad del material. Por ejemplo, Téllez-Pérez *et al.* (2012) trabajaron pimientos marroquís (Figura 6) e indicaron que las muestras secadas con aire caliente presentaron una estructura plegada (Figura 6a), lo que representa lesiones celulares, formación de pequeños poros y la adhesión de células adyacentes. En contraste, las muestras secadas con la operación de “secado con hinchamiento” ( $P_a = 3,5$  bar,  $t_a = 5$  s,  $P_b = 0,03$  bar) presentaron una estructura porosa diferente (Figura 6b), lo que expresa hinchazón celular, un número de poros más grandes y un mayor número de lagunas intercelulares. Esta condición permite la eliminación más rápida del agua en fase de vapor durante la caída de presión instantánea.

**Figura 6.** Resultados de microscopía electrónica de pimientos marroquíes secos (sección del mesocarpio): a. Aire Caliente, b. Secado DIC. Extraído de Téllez-Pérez *et al.* (2012).



De igual manera, este estudio muestra que gracias a la estructura porosa que se logró con el “secado con hinchamiento”, la cinética de secado de los pimientos se intensifica (aumento de la difusividad efectiva). El cambio en su estructura aumenta la superficie específica y la capacidad de re-hidratación. Por último, con esta técnica se garantiza la disminución de  $a_w$  necesaria para conservar el producto por más tiempo (Téllez-Pérez *et al.*, 2012).

## 1.5 Conclusión

Los avances en el modelamiento y simulación de deshidratadores de este tipo son muy escasos al tratarse de una técnica emergente. Hay una oportunidad para aplicar el principio de funcionamiento de esta técnica para acondicionamiento de residuos agroindustriales. A pesar de que son pocos los ensayos que han asociado la operación del sistema con los posibles cambios en apariencia del producto, hay diferentes sugerencias de prototipos para una gran variedad de productos.

## 1.6 Bibliografía

Abdulla, G., Mellouk, H., Belghit, A., Allaf, K. (2009). Séchage de produits granulaires par déshydratation par détentes successives (DDS). IXème colloque inter-universitaire franco-québécois sur la thermique des systèmes, 1:1 – 4.

Ajila, C.M., Satinder K., B., Verma, M., Prasada Rao, U.J.S. (2011). Sustainable Solutions for Agro Processing Waste Management: An Overview. In: Environmental Protection Strategies for Sustainable Development, Malik, A. y Grohmann, E. (Eds). Springer Netherlands. p. 65–109.

Al Haddad, M. (2007). Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation. Tesis de investigación de Doctor en Ingeniería de procesos Industriales. Universidad de La Rochelle.

Allaf, K., Louka, N., Bouvier, J.M., Parent, F, and Forget, M. (1993) Procédé de traitement de produits biologiques en vue de la modification de la texture, installations pour la mise en œuvre d'un tel procédé et produits ainsi réalisés, Brevet no. 9309720 du 6 agosto 1993, Extension internationale noPCTIFR94/00975.

Albitar, N., Mounir, S., Besombes, C., Allaf, K. (2011). Improving the drying of onion using the instant controlled pressure drop technology. *Drying Technology*, 29(9): 993 – 1008.

Alonzo-Macías, M., Montejano-Gaitán, G., Allaf, K. (2014) Impact of drying processes on strawberry (*Fragaria var. Camarosa*) texture: identification of crispy and crunchy features by instrumental measurement. *Journal of Texture Studies*, 45(3): 246 – 259.

Amor, B.B. y Allaf, K. (2009). Impact of texturing using instant pressure drop treatment prior to solvent extraction of anthocynains from Malaysian Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). *Food Chemistry*, 115(3): 820 – 825.

Arvanitoyannis, I.S. y Varzakas, T.H. (2006). Fruit/ Fruit Juice Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste. In: *Waste Management for the Food Industries*, Arvanitoyannis, I.S. (Eds.). Academic Press, primera Edicion. ISBN 9780080554938, 569 – 628.

Bahrani, S.A., Loisel, C., Rezzoug, S.A., Doublier, J.L., Macche-Rezzoug, Z. (2012). Role of vacuum steps added before and after steaming of maize starch. Impact on pasting, morphological and rheological properties. *Carbohydrate Polymers*, 89(3): 810 – 820.

Bonazzi, C. y Dumoulin, E. (2011). Quality changes in food materials as influenced by drying processes. En: *Modern drying technology Volume 3: Product quality and formularion*, Tsotsas, E. y Mujumdar, A.S. (eds.). Primera edicion, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Bouallagui, H., Cheikh, R.B., Marouani, L. and Hamdi, M. (2003). Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology* 86(1): 85 – 89.

Ceballos-Peñalosa, A. (2008). Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta. Manizales, Colombia: Tesis de Maestría-Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Chua, K.J. y Chou, S.K. (2004). On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration. *Journal of Food Engineering*, 62(2): 151 – 158.

Chou, S.K. y Chua, K.J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology*, 12: 359 – 369.

Chou, S.K, Chua, K.J., Teoh, S.H., Ho. J.C. (2006). Drying of porcine dermal tissue via pressure swing. *Drying technology*, 24: 973 – 982.

Esteban, M.B., García, A.J., Ramos, P., Márquez, M.C. (2007). Evaluation of fruit-vegetable and fish waste as alternative feedstuffs in pig diets. *Waste management*, 27: 193 – 200.

European Commission, EC. (2003). Integrated Product Policy. Building on Environmental Life-cycle Thinking. COM, 302p.

European Commission, EC. (2011). Preparatory Study on Food Waste across EU 27, Technical Report – 2010 – 054. Roadmap to Resource Efficient Europe. 571p.

European Commission, EC. (2012). Innovating for Sustainable Growth: a Bioeconomy for Europe. COM (212) 60p.

Eurostat (2009). Eurostat environment and energy statistics. Link de consulta: [http://ec.europa.eu/environment/eusssd/pdf/bio\\_foodwaste\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/environment/eusssd/pdf/bio_foodwaste_report.pdf). [Ultimo acceso: 19 de mayo 2016]

FAO. (2012). The State of Food Insecurity in the World 2012. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Link de consulta: <http://www.fao.org/docrep/016/i3027e/i3027e.pdf>. [Ultimo acceso: 20 de mayo 2016]

FAO. (2015). Perdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe. Link de consulta: <http://www.fao.org/3/a-i4655s.pdf>. [Ultimo acceso: 20 de mayo 2016]

Faostat. (2015). Food Balance. Link de consulta: <http://faostat3.fao.org/browse/FB/BC/E..> [Ultimo acceso: 15 de septiembre 2016]

Galanakis, C.M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology*, 26(2): 68 – 87.

Haddad, J. y Allaf, K. (2007). A study of the impact of instantaneous controlled pressure drop on the trypsin inhibitors of soybean. *Journal of Food Engineering*, 79: 353 – 357.

Haddad, J., Greiner, R. & Allaf, K. (2007). Efect of instantaneous controlled pressure drop on the phytate content of lupin. *LWT – Food Science and Technology*, 40: 448 – 453.

Haddad, J., Juhel, F., Louka, N., Allaf, K. (2004). A Study of Dehydration of Fish Using Successive Pressure Drops (DDS) and Controlled Instantaneous Pressure Drop (DIC). *Drying technology*, 22(3): 457 – 478.



Henríquez, C., Córdova, A., Almonacid, S., Saavedra, J., (2014). Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. *Journal of food engineering*, 143: 146 – 153.

Iguedjtal, T., Louka, N. y Allaf, K. (2008). Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering*, 85: 180 – 190.

Kamal, I., Gelicus, A., Allaf, K. (2012). Impact of Instant Controlled Pressure Drop (DIC) Treatment on Drying Kinetics and Caffeine Extraction from Green Coffee Beans. *Journal of Food Research*, 1(1): 24 – 47.

Kosseva, M.R. (2009). Management and Processing of Food Wastes. *Advances in Food and Nutrition Research*, 58: 57 – 136.

Kristiawan, M., Sobolik, V., Al-Haddad, M., Allaf, K. (2008a). Effect of pressure-drop rate on the isolation of cananga oil using instantaneous controlled pressure-drop process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47: 66 – 75.

Kristiawan, M., Sobolik, V., Allaf, K. (2008b). Isolation of Indonesian cananga oil using multi-cycle pressure drop process. *Journal of Chromatography A*, 1192(2): 306 – 318.

Larrauri, J., Ruperez, P., Saura-Calixto, F. (1997). Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(4): 1390 – 1393.

Louka, N. y Allaf, K. (2004). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the

vacuum”: application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering*, 65: 233 – 243.

Louka, N., Juhel, F., Allaf, K. (2004). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression: General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 245 – 253.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2001). Kinetics of drying and hydration of the scleroglucan polymer. A comparative study of two conventional drying methods with a new drying process: dehydration by successive pressure drops. *Drying Technology*, 19(8): 1961 – 1974.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2002). Development of a new drying process: ‘dehydration by cyclical pressure drops’ (D.D.S). Application to the collagen gel, *Drying Technology*, 20(1): 109 – 130.

Maache-Rezzoug, Z., Zarguili, I., Loisel, C., Queveau, D., Buleon, A. (2008). Structural modifications and thermal transitions of standard maize starch after DIC hydrothermal treatment. *Carbohydrate Polymers*, 74: 802 – 812.

Marciniak, A. (2015). Mise en place d’un procédé de valorisation des résidus agricoles. Tesis de Investigación de Maestría en Transformación y Valorización Industrial de los Agro-recursos 2014-2015. IRDA et Université des Sciences et Technologies de Lille 1.

Malik, B., Pirzadah, T. B., Islam, S. T., Tahir, I., Kumar, M., Rehman, U. R. (2015). Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development. En: *Agricultural biomass based potential materials*, Hakeem et al., (eds.). Springer international publishing Switzerland. DOI: 10.1007/978-3-319-13847-3\_19.

Ministère d'Énergie et Ressources Naturelles, MERN. (2013). Biomasse. [Consulta en línea: <https://mern.gouv.qc.ca/energie/innovation/innovation-biomasse.jsp>] Último acceso: 13 junio 2016.

MinAmbiente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). (2004). Observatorios Ambientales Urbanos. Manizales. Disponible en: <http://web.minambiente.gov.co/oau/nivel3.php?indicador=GTRS&observ=6>. Visitado en agosto de 2015.

Mira, B., Blasco, M., Berna, A., Subirats, S. (1999). Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of essential oil from orange peel. Effect of operation conditions on the extract composition. *The Journal of Supercritical Fluids* 14(2), 95 – 104.

Mirabella, N., Castellani, V., Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65: 28 – 41.

Misi, S.N. y Foster, C.F. (2002) Semi-continuous anaerobic co-digestion of agro-waste. *Environmental Technology* 23, 445 – 451.

Mounir, S., Besombes, C., Albitar, N., Allaf, K. (2011). Study of instant controlled pressure drop DIC treatment in manufacturing snack and expanded granule powder of apple and onion. *Drying Technology*, 29(3): 331 – 341.

Mounir, S., Allaf, T., Mujumdar, A.S., Allaf, K. (2012). Swell drying: Coupling Instant Controlled Pressure Drop DIC to standard convection drying processes to intensify transfer phenomena and improve quality-An Overview. *Drying Technology*, 30: 1508 – 1531. Doi: 10.1080/07373937.2012.639145

Ngoc U.N. y Schnitzer, H. (2009) Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Management* 29(6): 1982 – 1995.

Obied, H., Bedgood, D., Prenzler, P., Robards, K. (2009). Effect of processing conditions, prestorage treatment, and storage conditions on the phenol content and antioxidant activity of olive mill waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.*, 56(11): 925 – 3932.

Rakotozafy, H., Louka, N., Thérísod, M., Thérísod, H., Allaf, K. (2000). Drying of baker's yeast by a new method: dehydration by successive pressure drops (DDS). Effect on cell survival and enzymatic activities. *Drying Technology*, 18(10): 2253 – 2271.

San Martin, D. y Ramos, J.Z. (2016). Valorization of food waste to produce new raw materials for animal feed. *Food Chemistry*, 198: 68 – 94.

Setyoprato, P., Fatmawati, A., Allaf, K. (2009). Texturing by instant controlled pressure drop DIC in the production of cassava flour: Impact on dehydration kinetics, product physical properties and microbial decontamination. *World Congress on Engineering and Computer Science*, I: 1 – 6.

Schievano, A., D'Imporzano, G., Adani, F. (2009). Substituting energy crops with organic wastes and agro-industrial residues for biogas production. *Journal of Environmental Management*, 90(8): 2537 – 2541.

Shah, Z., Jani, Y. M., Khan, F. (2014) Evaluation of Organic Wastes for Composting. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(3): 309 – 320.

Srilatha, H.R., Krishna, N., Sudhakar Bada, K. and Madhukara, K. (1995). Fungal pretreatment of orange processing waste by solid state fermentation for improved production of methane. *Process Biochemistry* 30(4): 327 – 331.

Sotiropoulos, A., Malamis, D., Michailidis, P., Krokida M., Loizidou, M. (2016). Research on the drying kinetics of household food waste for the development and optimization of domestic waste drying technique. *Environmental technology*, 37(8): 929 – 939.

Tang, B., Hong Xu, Zongqi Xu, Cen Xu, Zheng Xu, Peng Leia, Yibin Qiu, Jinfeng Liang, Xiaohai Feng. (2015). Conversion of agroindustrial residues for high poly ( $\gamma$ -glutamic acid) production by *Bacillus subtilis* NX-2 via solid-state fermentation. *Bioresource Technology*, 181: 351 – 354.

Tellez-Perez, C., Sabah, M.M., Montejano-Gaitan, J.G., Sobolik, V., Martinez, C.A., Allaf, K. (2012). Impact of instant controlled pressure drop treatment on dehydration and rehydration kinetics of green moroccan pepper (*Capsicum annum*). 20<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2012, 25 – 29 August 2012, Prague, Czech Republic.

Tripodo, M.M., Lanuza, F., Micali, G., Coppolino, R., Nucita, F. (2004). Citrus waste recovery: a new environmentally friendly procedure to obtain animal feed. *Bioresource Technology* 91, 111 – 115.

Umesh-Hebbbar, H., Vishwanathan, K.H, Ramesh, M.N. (2004). Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65(4): 557 – 563.

Vaccari, G., Tamburinia, E., Sgualdino, G., Urbaniec, K., Klemes, J. (2005). Overview of the environmental problems in beet sugar processing: possible solutions. *Journal of Cleaner Production*, 13(5), 499 – 507.

Vardanega, R., Prado, J.M., M. Angela, A.M. (2015). Adding value to agri-food residues by means of supercritical technology. *The journal of Supercritical Fluids*, 96: 217–227.

Wuttipalakorn, P., Srichumpuang, W., Chiewchan, N. (2009). Effects of pretreatment and drying on composition and bitterness of high-dietary-fiber powder from lime residues. *Drying technology*, 27: 133 – 142.

Yagci, S. y Evcı, T. (2015). Effect of instant controlled pressure drop process on some physicochemical and nutritional properties of snack produced from chickpea and wheat. *International Journal of Food Science and Technology*, 50: 1901–1910.

Yepes, S.M., Montoya, L.J. Orozco, F. (2008). Valorización de residuos agroindustriales-frutas-en Medellín y el Sur del Valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín*, 61(1): 4422 – 4431.

Yves-Martin, D., Landry, C., Laforest, J.P., Vouligny, C. (2014). Valorisation de résidus végétaux agricoles vers le secteur de l'alimentation animale. IRDA.

# 2. Temas de investigación y artículos

## 2.1 Diseño e implementación de un sistema de DCP

**Diseño de un sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión.**

**Design of dehydration system by successive pressure drops**

Sebastián Gutierrez-Pacheco<sup>1,2,3</sup>, Alfonso Parra-Coronado<sup>2</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>3</sup>,  
Stéphane Godbout<sup>3</sup>, Dan Zegan<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia)

<sup>3</sup> Institut de Recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Quebec, QC (Canadá)

<sup>1</sup> Autor para correspondencia: [sgutierrezp@unal.edu.co](mailto:sgutierrezp@unal.edu.co)

### 2.1.1 RESUMEN

Se diseñó, construyó y evaluó un secador que utiliza la Deshidratación por Cambios Cíclicos de Presión (DCP). El dispositivo consistió en una cámara de tratamiento, un compresor y dispositivos que regulan los cambios de presión. Para la evaluación, se estudió la reducción de humedad de papas variedad Russet Burbank, descartadas del mercado por presencia de brotes. Se adoptó un diseño experimental completamente aleatorizado (DCA) con un total de tres tratamientos: alta presión-baja frecuencia (AP-BF), alta presión-alta frecuencia (AP-AF) y baja presión-alta frecuencia (BP-AF). AP-AF registró la mayor velocidad de secado. Al reducir la duración de ciclo de 30 a 5 segundos, la

remoción de agua fue aproximadamente tres veces mayor, lo cual concuerda con el modelo conceptual propuesto para el diseño del prototipo. La concepción considera que una alta frecuencia y una mayor diferencia de presión, representa un mayor caudal de aire a través de la cámara de tratamiento, lo cual garantiza una mayor velocidad de secado. Aunque el diseño se centró para el secado a escala experimental de papas descartadas del mercado por presencia de brotes, el prototipo puede ser adaptado y escalado para la deshidratación de otros residuos.

**Palabras clave:** Diseño de deshidratador, cinética de secado, papa, aire comprimido.

### **2.1.2 INTRODUCCIÓN**

Son varios los programas, iniciativas e investigaciones que se han realizado mundialmente para el aprovechamiento de residuos agrícolas (He *et al.*, 2016; Poulsen y Adelard, 2016; Väisänen *et al.*, 2016; FAO, 2015; Mirabella *et al.*, 2014; Arvanitoyannis y Varzakas, 2006; Vaccari *et al.*, 2005). Entre los procesos modernos de valorización de residuos agroindustriales se encuentra la producción y extracción de compuestos bioactivos y el procesamiento para alimentación animal y humana (Ajila *et al.*, 2011).

Los residuos de frutas y vegetales se caracterizan por tener un alto contenido de humedad, en promedio 88 g de agua g<sup>-1</sup> m.h. (Esteban *et al.*, 2007), lo cual los hace un material altamente biodegradable y difícil de aprovechar. Por lo tanto, generalmente en los procesos de aprovechamiento de residuos es necesario adoptar una técnica de secado. La disminución de humedad permite reducir la actividad de agua, la actividad microbiana del material, las tasas de algunas reacciones químicas y el deterioro enzimático (Bonazzi y Dumoulin, 2011) lo cual facilita el manejo y la conservación de dicha biomasa residual.

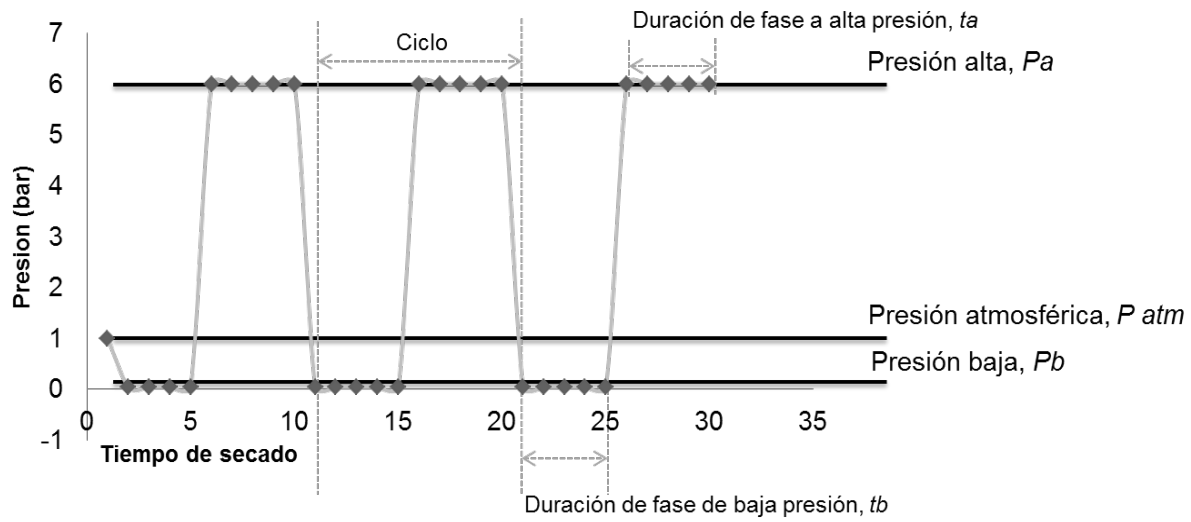


Algunos de los casos exitosos donde la biomasa ha sido deshidratada para su aprovechamiento son: Vaccari *et al.* (2005) deshidrataron pulpa de remolacha descartada, con el fin de utilizarla como relleno en la producción de papel. La deshidratación se llevó a cabo por prensado y el material obtenido fue sometido a un proceso de molienda y criba para posteriormente ser almacenado en sacos. Mira *et al.* (1999) realizaron la extracción de aceites esenciales de cascara de naranja, concluyendo que esta debe ser deshidratada previamente a la extracción (0,0538 kg agua kg<sup>-1</sup> m.s.). Sin embargo, no se han explorado técnicas de secado no convencionales para este tipo de materiales.

La Deshidratación por Cambios Cíclicos de Presión (DCP), ha sido una técnica no convencional que se ha explorado en el secado de vegetales con un alto contenido de humedad y sensibles al calor (Mounir *et al.*, 2011; Iguedjtal *et al.*, 2008; Louka *et al.*, 2004; Louka y Allaf, 2004). El principio de funcionamiento de la DCP es generar cambios sucesivos de presión dentro de una cámara de tratamiento con el objeto de: a) cambiar la porosidad del material, lo cual mejora la cinética de secado; b) crear una corriente de aire instantánea que va a retirar el agua de la superficie del material y c) en los casos en que se trabaja con presión de vacío, reducir la temperatura de evaporización del agua contenida en el material.

La Universidad de La Rochelle (Francia) ha sido líder a nivel mundial en las investigaciones de DCP. Los trabajos experimentales han empleado dos niveles de presión (Figura 1): Presión alta (o presurización con valores inferiores a 10 bar), y presión baja (o en algunas ocasiones vacío, ya que puede tomar valores menores o iguales a la presión atmosférica). Generalmente, la cinética de secado es expresada en función de la depresión establecida y de la duración de cada fase (Kamal *et al.*, 2012; Haddad *et al.*, 2004; Maache-Rezzoug *et al.*, 2002).

**Figura 1.** Variaciones de presión en la DCP.  $P_a < 10$  bar;  $P_b \leq 1$  bar. Adaptado de Rakotozafy *et al.*, 2000.



Hasta el momento, el diseño y la implementación de la DCP para residuos agroindustriales no ha sido reportado. El trabajo presentado en este artículo tuvo como objetivos proponer una guía de diseño de un sistema de DCP, construir el sistema de acuerdo a los requerimientos y restricciones establecidas y realizar una prueba de funcionalidad para evaluar diferentes configuraciones del sistema. El diseño tuvo en cuenta los recursos y equipos disponibles y las propiedades de papa variedad Russet Burbank descartada por presencia de brotes. Así mismo, este trabajo propone un modelo conceptual para el diseño del DCP.

### 2.1.3 MATERIALES Y METODOS

Para el diseño del prototipo se adaptó la metodología propuesta por Dym y Little (2002). La Figura 2 muestra con mayor detalle las diferentes etapas que se tuvieron en cuenta para el diseño del sistema DCP.

**Figura 2.** Modelo prescriptivo para el diseño DCP.



#### Requerimientos del sistema

El producto a procesar en este prototipo fue papa descartada del mercado por presencia de brotes, con las características descritas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características del material a procesar, considerado para el diseño del sistema DCP

Característica	Descripción
Producto	Papa
Variedad	Russet Burbank
Contenido de humedad inicial (m.h.)	82 %
Contenido de humedad final esperado (m.h.)	10 %
Densidad aparente inicial (rebanada)	833 kg m <sup>-3*</sup>
Calor específico	3,603 kJ kg <sup>-1</sup> C <sup>-1**</sup>

\* Key Technology (2015).

\*\* Ratti, C. (2009).

El prototipo debe permitir deshidratar residuos similares (con alto contenido de humedad) y madurez avanzada. Así mismo, los parámetros de diseño fueron: duración máxima de secado de 8 horas; relación volumen de producto inicial/volumen de la cámara de tratamiento inferior a 0,6 y humedad relativa del aire fue menor a 80 %. Lo anterior para permitir que el producto pueda moverse como consecuencia de la entrada y salida de aire comprimido en la cámara de tratamiento, lo cual facilita un secado uniforme, y evitar la saturación del aire de secado dentro del sistema.

### Prueba de funcionalidad

En la Tabla 2 se resume los tratamientos que fueron adoptados para la prueba de funcionalidad. El diseño experimental fue completamente aleatorizado con cuatro tratamientos por duplicado ( $\alpha = 0,05$ ). Los tratamientos fueron comparados con el secado por convección natural (CN) ( $T = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 20 \%$ ).

**Tabla 2.** Condiciones evaluadas en la prueba de funcionalidad preliminar para DCP ( $n = 2$ ).

Tratamiento*	Presión alta, $P_a$ (bar)	Presión baja, $P_b$ (bar)	Tiempo de presión alta, $t_a$ (s)	Tiempo de presión baja, $t_b$ (s)
AP-BF	4	0,60	9	15
AP-AF	4	0,60	1	1
BP-AF	1	0,60	1	1
CN	1	-	-	-

\*AP-BF: Alta presión-baja frecuencia; AP-AF. Alta presión-alta frecuencia; BP-AF: Baja presión-alta frecuencia; CN: Convección natural. Las condiciones para el secado por convección natural fueron mantenidas en  $T = 23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $\text{HR} = 20 \pm 5 \%$

Por ser una prueba preliminar, el tiempo de secado para cada configuración de operación establecida fue de 90 minutos. Para cada ensayo, se utilizaron muestras de papa de aproximadamente 30 g. Los tubérculos fueron cortados en prismas rectangulares de 20 x 10 x 5 mm. El peso de las muestras se registró

cada 30 minutos con el fin de determinar la cinética de secado. Para ello, se utilizó una balanza electrónica (Mettler PM2000 de precisión 0,1 g – Columbus, OH, USA). Al final de cada tratamiento un horno secador (Carbolite LHT 6/120 – Hope Valley, Reino Unido) fue utilizado para determinar el peso seco de las muestras. Para todos los casos, se utilizó la Ecuación 1 que describe el cálculo del contenido de humedad (materia húmeda) de las muestras.

$$M_i = \frac{P_i - P_{seco}}{P_i} \quad (1)$$

Donde  $M_i$  es la humedad para el instante  $i$  ( $g_{\text{agua}} g^{-1} m.h.$ ),  $P_i$  es el peso (g) de la muestra húmeda en el instante  $i$  y  $P_{seco}$  es el peso (g) de la muestra seca al horno luego de 24 h a 60 °C.

### Guía de cálculo y modelo conceptual propuesto

La caída súbita de presión en el DCP representa la liberación instantánea de una masa de aire (aumento en la energía cinética), y como resultado de esta convección instantánea se reduce la humedad del material. Por lo tanto, a manera conceptual DCP se representó como un secador de bandejas, con el mismo caudal de aire generado por la caída súbita de presión. Por lo tanto, se asume que la remoción de agua se da solo en el instante en el cual se da la caída de presión (cambio de presión de  $P_a$  a  $P_b$ ).

El caudal de aire se estimó mediante la Ecuación 2 (Christensen, 2000):

$$q = \left( \frac{\Delta P * d^5 * P_a}{75.7 * L} \right)^{\frac{1}{1.85}} \quad (2)$$

Donde,  $q$  es el caudal de aire ( $m^3 \text{ min}^{-1}$ ),  $\Delta P$  representa la caída de presión ( $kg \text{ cm}^{-2}$ ),  $d$  es el diámetro de la tubería/válvula de salida (mm),  $P_a$  es la presión alta ( $kg \text{ cm}^{-2}$ ) y  $L$  es la longitud de la tubería/válvula de salida (mm)

El balance de masa y energía se determinó según las ecuaciones 3 y 4 (Chakraverty y Singh, 2016).

$$\rho_a * q * W_o + \frac{\Delta M}{\Delta t_{\text{virtual}}} * m = \rho_b * q * W_f \quad (3)$$

$$\frac{\rho_p \theta_o (C_p + C_w * M_o) - \rho_p \theta_f (C_p + C_w * M_f)}{\Delta t_{virtual}} = \rho_a * q * [C_{air} * (T_b - T_a) + C_w * (WT|_b - WT|_a)] \quad (4)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $W$  es la razón de humedad del aire ( $\text{kg de agua kg}^{-1}$  de aire seco),  $M$  es el contenido de humedad (materia seca) del producto ( $\text{kg de agua kg}^{-1}$  m.s.),  $m$  es la cantidad de material (g),  $\theta$  es la temperatura del producto ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_p$ ,  $C_w$ ,  $C_{air}$  es el calor específico del producto, del agua y del aire, respectivamente ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$ ), y  $T$  es la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ). Los subíndices  $a$  y  $b$  corresponden a las fases de presión alta y baja, respectivamente.

El tiempo virtual ( $t_{virtual}$ ) hace referencia al tiempo acumulado durante el cual se llevó la caída de presión. Para la relación entre el tiempo real de secado y el tiempo virtual se propuso la Ecuación 5:

$$t_{real} = \frac{t_{virtual}}{FCP} * 60 \quad (5)$$

Donde FCP es la frecuencia de caídas de presión ( $\text{min}^{-1}$ ).

### Selección de compresor de aire

Para este ítem se adoptó la metodología propuesta por CAGI (2002). La presión máxima a la que se trabajó fue 8 bares. Para este prototipo, se contó con una bomba de combustión como cámara de tratamiento ( $V = 0,34 \text{ L}$ ). El consumo de aire del sistema se calculó en función de la frecuencia de caídas de presión (FCP) y el volumen de la cámara ( $V$ , en L) según la Ecuación 6:

$$\text{Consumo de aire del sistema} = FCP_{max} * \frac{V}{28,317} = 0,144 \text{ cfm} \quad (6)$$

Sin embargo, la selección del compresor tuvo en cuenta la ampliación del sistema. A futuro se espera contar con una cámara de tratamiento con capacidad de 6 kg. Por lo tanto, el consumo de aire del sistema será:

$$12 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}} * \frac{6 \text{ kg producto} * \frac{1}{833 \frac{\text{kg producto}}{\text{m}^3 \text{ producto}}} * \frac{1}{0,6 \frac{\text{m}^3 \text{ producto}}{\text{m}^3 \text{ aire}}} * \frac{1000 \text{ L aire}}{1 \text{ m}^3 \text{ aire}}}{28,317} = 5,08 \text{ cfm}$$

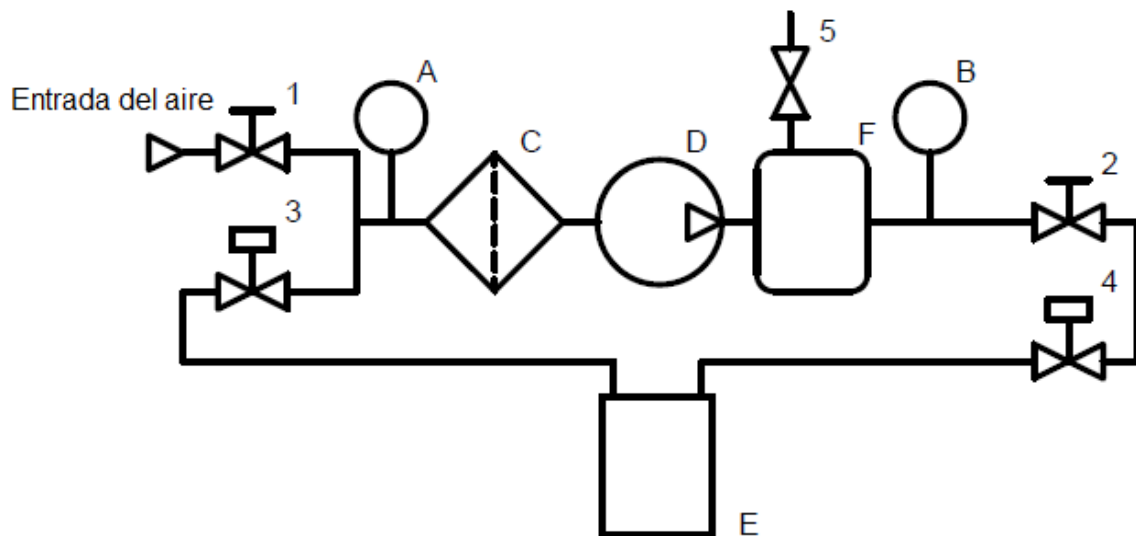
El compresor que cumple con estos requisitos (5,08 cfm @ 8 bar), es un compresor de pistón, de una etapa, de operación continua y potencia 2 hp.

## 2.1.4 RESULTADOS Y DISCUSION

### Construcción y Descripción del prototipo final

La Figura 3 representa la configuración del montaje DCP desarrollado. En la Tabla 3 se describen los elementos del sistema.

**Figura 3.** Diagrama de proceso DCP.



**Tabla 3.** Descripción de componentes del sistema DCP preliminar.

Identificación	Nombre	Descripción
A	Vacuómetro	Vacuómetro análogo tipo 1005 marca ASHCROFT. Permite realizar lecturas de presión inferior a la presión atmosférica. Lectura en pulgadas de mercurio (in Hg)
B	Manómetro	Manómetro análogo tipo 1005 marca ASHCROFT. Permite realizar lecturas de presión superior a la presión atmosférica. Lectura en kPa.
C	Filtro de aire	Filtro desecador de aire horizontal. El filtro opera con gel desecante que puede ser reutilizada. Para monitorear el filtro, el gel cambia de color azul a transparente cuando está saturado.
D	Compresor adaptado	Compresor de pistón Mastercraft Maximun, capacidad 5 Gal (US) – Presión máxima 150 psi. El funcionamiento del compresor fue adaptado conectando la succión de aire (donde se genera vacío con ayuda de la válvula de alivio para vacío) a la salida de aire de la cámara de tratamiento
E	Cámara de tratamiento	Cámara cilíndrica de 0,340 L. Construida en acero inoxidable que puede resistir presiones hasta de 30 atm (Parr-1108 R – Moline).
F	Tanque para aire comprimido	Depósito de 5 Gal (18,9 L) para aire comprimido



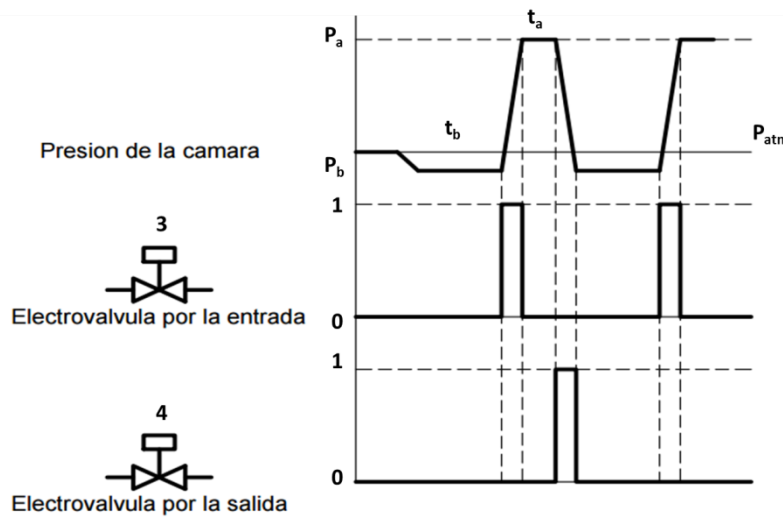
**Tabla 3 (Continuación).** Descripción de componentes del sistema DCP preliminar.

Identificación	Nombre	Descripción
1	-	Válvula para regular nivel de vacío en la succión del compresor
2	-	Válvula reguladora de presión. Regula la presión de entrada de aire a la cámara de tratamiento
3	-	Electroválvula para la salida de aire de la cámara de tratamiento (Omega SV6003)
4	-	Electroválvula para la entrada de aire de la cámara de tratamiento (Omega SV6003)
5	-	Válvula de purga/drenaje. Permite la salida de agua que se condensa en el fondo del tanque para aire comprimido

Para cada ensayo, se inició con la activación del compresor. Seguido, se fijó el nivel de  $P_a$  y  $P_b$  con ayuda de las válvulas 1 y 2 (Figura 3). El primer ciclo comenzó con la apertura de la válvula 3, para generar el nivel de  $P_b$  en la cámara de tratamiento. Luego, la válvula 3 permaneció cerrada durante la fase de presión baja ( $t_b$ ) y después de este tiempo, la válvula 4 se abrió para presurizar la cámara de tratamiento. Por último, las válvulas 3 y 4 se cerraron durante la fase de  $P_a$  o presurización ( $t_a$ ). Posteriormente, se repitió el ciclo hasta completar una duración de la prueba de 90 minutos. Cada 30 minutos, la prueba fue interrumpida para tomar el peso de la muestra.

En el ensayo BP-AF en donde la presión alta (fase de presurización) es igual a la presión atmosférica, la válvula 4 se desconectó del tanque de aire comprimido. En la Figura 4 se resume el esquema de control propuesto para configurar la duración de cada fase ( $t_a$  y  $t_b$ ).

**Figura 4.** Esquema de control propuesto para sistema DCP preliminar. 1: Apertura. 0: Cierre de válvula.



### Prueba de funcionalidad

La reducción de humedad en todos los tratamientos se puede ver en la Tabla 4. El contenido de humedad inicial (en base húmeda) de las muestras fue similar para todas las condiciones de secado ( $p > 0,05$ ), lo cual garantiza que el contenido de humedad inicial no fue un factor que influyó en la cinética del secado.

Aunque la reducción del contenido de humedad fue evidente en todos los tratamientos, la mayor tasa de secado se registró para el tratamiento AP-AF (Tabla 4). Para la misma amplitud de caída de presión ( $\Delta P$ ), la menor frecuencia (AP-BF) resulta en ciclos más largos y una velocidad de secado menor. Al reducir la duración de ciclo de 30 a 5 segundos (duraciones de ciclo para APBF y APAF, respectivamente), la remoción de agua (diferencia entre el contenido de humedad inicial y final, m.h.) fue aproximadamente 3 veces mayor. Esta observación coincide con los resultados de Chou *et al.* (2006) y Maache-Rezzoug *et al.* (2002). Chou *et al.* (2006) indican que una mayor frecuencia de caídas de presión induce mejor "tunnelling", es decir se afecta la estructura interna del biomaterial, lo que favorece el proceso de deshidratación. Sin embargo, también es cierto que una

menor duración de ciclos permite que pase una mayor cantidad de aire a través de la cámara de tratamiento, lo cual favorece el proceso de deshidratación.

**Tabla 4.** Variación del contenido de humedad para las diferentes condiciones de secado (n = 2)

Tiempo (min)	Contenido de humedad, m.h. (g agua g <sup>-1</sup> materia húmeda)			
	CN	AP-BF	AP-AF	BP-AF
0	0,79	0,78	0,78	0,76
30	0,79	0,77	0,77	0,75
60	0,78	0,77	0,75	0,74
90	0,78	0,76	0,73	0,73
$\Delta M = M_f - M_o$	0,01 <sup>a</sup>	0,02 <sup>a</sup>	0,05 <sup>b</sup>	0,03 <sup>a</sup>

Superíndices diferentes representan diferencias estadísticas en los valores medios ( $p < 0,05$ ).

El efecto de la amplitud de la caída de presión se puede examinar al comparar los tratamientos AP-AF y BP-AF ( $\Delta P = 3,4$  y  $0,4$  bar, respectivamente) (Tabla 2). Al configurar un mayor valor de  $\Delta P$  se obtuvo una mejora en la remoción de agua, lo cual coincide con la teoría de secado: La velocidad de eliminación de agua en los procesos de deshidratación es proporcional a la diferencia entre la presión del vapor de agua en la superficie del producto y la presión parcial de vapor de agua presente en el aire de secado (Loncin, 1998). Una mayor diferencia en las presiones de trabajo en el DCP produce una diferencia apreciable en el tiempo de secado para lograr el contenido de humedad final deseado (Chua y Chou, 2004).

No hay una ventaja significativa del DCP cuando está configurado como AP-BF ni como BP-AF respecto al secado por convección natural (CN).

### 2.1.5 CONCLUSIONES

El prototipo construido permitió implementar la técnica DCP para papa descartada por presencia de brotes. A diferencia de prototipos que utilizan la misma técnica, el dispositivo construido en este trabajo no requiere de bomba de vacío para garantizar el valor de presión baja ( $P_b$ ). El filtro del compresor y el tanque de almacenamiento de aire comprimido permitieron que el aire de secado tuviera un valor de HR relativamente bajo (< 30 %).

La capacidad actual del dispositivo es 170 g de papa descartada por presencia de brotes. Sin embargo, con el mismo compresor se puede lograr una capacidad hasta de 6 kg. Aunque el diseño se centró en las características de la papa descartada por presencia de brotes, el prototipo puede ser adaptado para la deshidratación de otros residuos agroindustriales.

Una mayor frecuencia de caídas de presión permite aumentar la velocidad de secado, lo cual concuerda con el modelo conceptual propuesto para el diseño del prototipo. El modelo considera que una alta frecuencia y una diferencia de presiones mayor, representa un mayor caudal de aire a través de la cámara de tratamiento.

La guía de cálculo propuesta puede ser utilizada como base para futuros diseños o incluso simulaciones del prototipo para la optimización del proceso de secado por DCP.

### 2.1.6 BIBLIOGRAFÍA

Ajila, C.M., Satinder K., B., Verma, M., Prasada Rao, U.J.S. (2011). Sustainable Solutions for Agro Processing Waste Management: An Overview. In: Environmental Protection Strategies for Sustainable Development, Malik, A. y Grohmann, E. (Eds). Springer Netherlands. p. 65–109.

Arvanitoyannis, I.S. y Varzakas, T.H. (2006). Fruit/ Fruit Juice Waste Management: Treatment Methods and Potential Uses of Treated Waste. In: Waste Management for the Food Industries, Arvanitoyannis, I.S. (Eds.). Academic Press, primera Edicion. ISBN 9780080554938. p. 569– 628.

Bonazzi, C., Dumoulin, E. (2011). Quality changes in food materials as influenced by drying processes. In: Modern drying technology Volume 3: Product quality and formularion, Tsotsas, E. y Mujumdar, A.S. (eds.). Primera edicion, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

CAGI, Compressed Air and Gas Institute (2002). Air Compressor. Selection and application ¼ HP through 30 HP. 5<sup>ta</sup> edición, Cleveland, OH (USA). 22p.

Chakraverty, A., Singh, R.P. (2016). Postharvest technology and food process engineering. CRC Press, 581p.

Chua, K.J., Chou, S.K. (2003). On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration. Journal of Food Engineering, 62(2): 151–158.

Chou, S.K, Chua, K.J., Teoh, S.H., Ho. J.C. (2006). Drying of porcine dermal tissue via pressure swing. Drying technology, 24: 973–982.

Cristensen, B.A. (2000). Limitations and proper use of the Hazen-Williams Equation. *Journal of hydraulic engineering*, 126(2): 167–168.

Dym, C., Little, P. (2002). *El proceso de diseño en ingeniería*. 1 ed, México D.F.: Limusa Wiley, 328p.

Esteban, M.B., García, A.J., Ramos, P., Márquez, M.C. (2007). Evaluation of fruit-vegetable and fish waste as alternative feedstuffs in pig diets. *Waste management*, 27: 193–200.

FAO. (2015). *Perdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe*. Link de consulta: <http://www.fao.org/3/a-i4655s.pdf>. [Ultimo acceso: 20 de mayo 2016]

Haddad, J., Juhel, F., Louka, N., Allaf, K. (2004). A Study of Dehydration of Fish Using Successive Pressure Drops (DDS) and Controlled Instantaneous Pressure Drop (DIC). *Drying technology*, 22(3): 457–478.

He, K., Zhang, J., Zeng, Y., Zhang, L. (2016). Households' willingness to accept compensation for agricultural waste recycling: taking biogas production from livestock manure waste in Hubei, P. R. China as an example. *Journal of cleaner production*, 131: 410 – 420.

Iguedjal, T., Louka, N. et Allaf, K. (2008). Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering*, 85: 180 – 190.

Kamal, I., Gelicus, A., Allaf, K. (2012). Impact of Instant Controlled Pressure Drop (DIC) Treatment on Drying Kinetics and Caffeine Extraction from Green Coffee Beans. *Journal of Food Research*, 1(1):24–47.

Key Technology (2015). Bulk density averages. Consulta en línea: 4 de agosto 2016. [link de consulta: <http://go.key.net/rs/key/images/Bulk%20Density%20Averages%20100630.pdf>]

Loncin, M. (1998). Activity of water and its importance in preconcentration and drying of food. In S. Bruin (ed), *Preconcentration and Drying of Food Materials*, 15–34. Elsevier: Amsterdam.

Louka, N. y Allaf, K. (2004). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the vacuum”: application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering*, 65: 233 – 243.

Louka, N., Juhel, F., Allaf, K. (2004). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression: General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 245 – 253.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2002). Development of a new drying process: ‘dehydration by cyclical pressure drops’ (D.D.S). Application to the collagen gel, *Drying Technology*, 20(1): 109–130.

Mira, B., Blasco, M., Berna, A., Subirats, S. (1999). Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of essential oil from orange peel. Effect of operation conditions on the extract composition. *The Journal of Supercritical Fluids* 14(2), 95 – 104.

Mirabella, N., Castellani, V., Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. *Journal of Cleaner Production*, 65: 28–41.

Mounir, S., Besombes, C., Albitar, N., Allaf, K. (2011). Study of instant controlled pressure drop DIC treatment in manufacturing snack and expanded granule powder of apple and onion. *Drying Technology*, 29(3): 331–341.

Poulsen, T.G., Adelard, L. (2016). Improving biogas quality and methane yield via co-digestion of agricultural and urban biomass wastes. *Waste management*, 54: 118 – 125.

Rakotozafy, H., Louka, N., Thérissod, M., Thérissod, H., Allaf, K. (2000). Drying of baker's yeast by a new method: dehydration by successive pressure drops (DDS). Effect on cell survival and enzymatic activities. *Drying Technology*, 18(10): 2253 – 2271.

Ratti, C. (2009). *Advances in food dehydration*. CRC Press, Taylor & Francis group. 467p.

Vaccari, G., Tamburinia, E., Sgualdino, G., Urbaniec, K. and Klemes, J. (2005). Overview of the environmental problems in beet sugar processing: possible solutions. *J Cleaner Product*, 13, 499–507.

Väisänen, T., Haapalab, A., Lappalainen, R., Tomppoa, L. (2016). Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. *Waste management*, 54: 62 – 73.



## **2.2 Definición de variables a controlar en el sistema DCP**

**Simulación de la cinética de secado de un deshidratador DCP para  
diferentes condiciones de operación**

**Simulation of drying kinetics of a DCP at different operating conditions**

Sebastian Gutierrez-Pacheco<sup>1,2,3</sup>, Alfonso Parra-Coronado<sup>2</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>3</sup>  
Stéphane Godbout<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia)

<sup>3</sup> Institut de Recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Quebec, QC (Canadá)

<sup>1</sup> Autor para correspondencia: [sgutierrezp@unal.edu.co](mailto:sgutierrezp@unal.edu.co)

### **2.2.1 RESUMEN**

Con el objeto de conocer el efecto de las diferentes condiciones de operación del sistema de deshidratación por cambios cíclicos de presión (DCP) sobre la cinética de secado, se desarrolló un programa de simulación matemática en lenguaje Visual Basic. Como base, se adoptó el modelo de Thompson y se utilizaron los parámetros termofísicos del material trabajado (papas descartadas por presencia de brotes). Como variables fundamentales del deshidratador se concluyó que la presión alta ( $P_a$ ) y la frecuencia de caídas de presión (FCP) inciden directamente en el tiempo de secado y en la actividad de agua del producto seco. La selección de los valores para estas dos variables permite ajustar la cantidad de aire a presión para deshidratar el material. El secado por DCP permite la remoción de agua del material principalmente en el momento en el que se produce la caída de presión. Si esta etapa se produce con más frecuencia, la velocidad de secado aumenta. Mediante este programa, se compararon las posibles condiciones de operación del deshidratador. Los resultados se validaron con los resultados experimentales obtenidos en laboratorio, concluyendo que el modelo de

simulación construido permitió describir al menos el 91 % de la variabilidad de los datos experimentales. Se recomienda utilizar un valor de  $P_b = P_{atm}$ , trabajar con FCP altas y con  $P_a > 4$  bar.

**Palabras clave:** Modelamiento, tratamiento de bioresiduos, cinética de secado, secado de residuos agroindustriales, presión.

## 2.2.2 INTRODUCCIÓN

La proporción de subproductos, residuos o productos hortofrutícolas fuera de norma es una preocupación mundial presente desde la producción en campo hasta la comercialización (Galanakis, 2012). Para el caso del continente americano, según los reportes de la FAO (FAOSAT, 2016), mientras cerca de 1487 millones de t de frutas fueron producidas entre 2001 y 2011, al mismo tiempo se produjeron aproximadamente 143 millones de t de frutas desechadas. Actualmente los sistemas de gestión de residuos han tomado mayor importancia en el sector agropecuario debido a la presión que ejerce el sector sobre los recursos naturales.

Entre los procedimientos modernos para aprovechar esta cantidad de residuos se ha reportado la extracción de biocompuestos y el acondicionamiento y procesamiento del material para la alimentación animal y humana (Ajila *et al.*, 2011). Según Esteban *et al.* (2007), los residuos agroindustriales en promedio tienen un alto contenido de humedad (88 % m.h.), condición que los convierte en materiales altamente biodegradables y difíciles de aprovechar.

Son varios los ensayos que se han centrado en utilizar aire caliente para reducir el contenido de humedad de residuos (Sotiropoulos *et al.*, 2016; Henríquez *et al.*, 2014; Shah *et al.*, 2014; Wuttipalakorn *et al.*, 2009), sin embargo, se ha concluido que por tratarse de un material sensible, el secado puede producir degradación enzimática y no enzimática, así como la descomposición de compuestos

termosensibles (Obied *et al.*, 2009; Larrauri *et al.*, 1997). Entonces, se hace necesario estudiar técnicas de secado apropiadas para facilitar el manejo y conservación de este tipo de biomasa.

La Deshidratación por cambios cíclicos de presión (DCP) es una técnica con potencial para materiales sensibles al calor (Mounir *et al.*, 2011; Iguedjtal *et al.*, 2008; Louka *et al.*, 2004; Louka y Allaf, 2004). El principio de funcionamiento de DCP es generar cambios sucesivos en el valor de presión: Presión alta (o presurización con valores inferiores a 10 bar), y presión baja (o en algunas ocasiones vacío ya que puede tomar valores menores o iguales a la presión atmosférica). Con este comportamiento de presión al interior de una cámara de tratamiento se logra: a) cambiar la porosidad del material, lo cual mejora la cinética de secado; b) crear una corriente de aire instantánea que va a retirar el agua de la superficie del material y c) en los casos en que el vacío es establecido, reducir la temperatura de evaporización del agua contenida en el material.

Para que el sistema DCP funcione de manera eficiente para residuos agroindustriales, se debe conocer el modo adecuado de operarlo. Para efectuar recomendaciones en el dimensionamiento y operación, se puede proceder de dos maneras diferentes:

- Realizar estudios experimentales, siendo un procedimiento costoso y dispendioso (Alonzo–Macías *et al.*, 2014; Chou *et al.*, 2006; Haddad *et al.*, 2004; Maache–Rezzoug *et al.*, 2002; Maache–Rezzoug *et al.*, 2001; Rakotozafy *et al.*, 2000).
- Desarrollar una simulación matemática del secado asistida por computador (Sotiropoulos *et al.*, 2016; Parra-Coronado *et al.*, 2008; Haddad, 2007; Parra-Coronado, 1993; Roa *et al.*, 1999; Thompson *et al.*, 1968).

La simulación matemática es una herramienta práctica que permite generar conocimientos apropiados para la operación eficiente de secadores. El presente

trabajo tuvo como objetivo simular las condiciones de operación del sistema DCP y definir la configuración que permita la mayor velocidad de secado.

El modelo de Thompson (Thompson *et al.*, 1968) es un modelo utilizado para simular el funcionamiento de secadores de lecho estático. Sin embargo, es un modelo que puede ser adaptado para conocer el estado del aire (temperatura y humedad relativa) y la condición del producto (temperatura y contenido de humedad) durante el tiempo de secado.

## 2.2.3 MATERIALES Y METODOS

### Material vegetal y obtención de datos experimentales

Se utilizaron papas descartadas del mercado por presencia de brotes variedad Russet Burbank como materia prima. Para cada prueba, muestras de 30 g fueron cortadas en prismas rectangulares de 20 x 10 x 5 mm y colocadas en el dispositivo de secado DCP. El peso de las muestras se registró cada 30 minutos con el fin de determinar la variación del contenido de humedad (en materia seca) durante el secado. Las muestras se pesaron utilizando una balanza electrónica (Mettler PM2000 de precisión 0,1 g - Columbus, OH, EE.UU.). Para determinar el contenido de humedad al final de cada tratamiento, cada muestra fue llevada a un horno de convección forzada (Carbolite LHT 6/120 - Hope Valley, Reino Unido) durante 24 horas a 60 °C. El contenido de humedad se calculó por la Ecuación 1:

$$M_i = \frac{P_i - P_{seco}}{P_{seco}} \quad (1)$$

Donde  $M_i$  es el contenido de humedad en el instante  $i$  (g de agua  $g^{-1}$  m.s.),  $P_i$  es el peso de la muestra húmeda para el instante  $i$  (en gramos), y  $P_{seco}$  es el peso de la muestra seca (en gramos).

Para la validación del modelo, se realizaron cuatro pruebas experimentales de secado que se resumen en la Tabla 1. Cada prueba tuvo una duración de 6 horas.

**Tabla 1.** Resumen de los tratamientos experimentales

<b>Tratamiento</b>	<b>Presión manométrica <math>P_a</math> (bar)</b>	<b>Frecuencia de caídas de presión, <math>FCP</math> (Numero de depresiones por minuto)</b>
DCP 1	3,0	6
DCP 2	3,0	12
DCP 3	5,0	12
DCP 4	6,0	12

### Desarrollo del programa de simulación

El modelo de simulación matemática se implementó en lenguaje de programación Microsoft Visual Basic para Aplicaciones 7.0, en un computador Intel Core i5 con capacidad de 4 GB RAM. Para la simulación se adaptó el modelo de Thompson *et al.* (1968) y como parámetros del producto se tomaron los especificados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros del material para la simulación del sistema DCP

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Producto	Papa
Variedad	Russet Burbank
Contenido de humedad esperado (m.h.)	10 %
Calor específico, $C_p$ , $\text{kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$	3,603 *

\* Ratti, C. (2009).

Los valores de densidad aparente del producto ( $\rho_p$ , en  $\text{kg m}^{-3}$ ) y calor latente de vaporización ( $CLV$ , en  $\text{kJ kg}^{-1}$ ), fueron recalculados para cada iteración de acuerdo a la Ecuación 2 (Key Technology, 2015) y 3 (Chen, 2006).

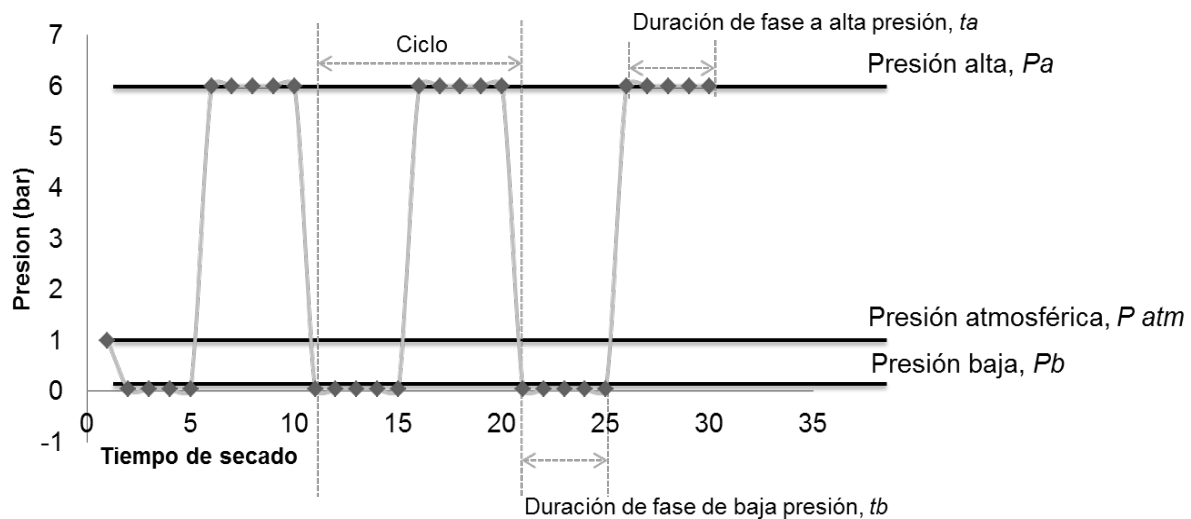
$$\rho_p = 350 + (5,89 * \omega * 100) \quad (2)$$

$$CLV = 1512,9 * (\omega * 100)^{-9,744} + 0,461 * (6887 - 5,31 * (\theta + 273,15)) \quad (3)$$

Donde  $\omega$  es el contenido de humedad del producto (decimal, m.h.), y  $\theta$  es la temperatura del producto para cada iteración.

El modelo estima la evolución del contenido de humedad a lo largo del tiempo de secado bajo DCP en condiciones de presión y duración de ciclos predeterminedas. El modelo utiliza una ecuación de secado en capa delgada propuesta, y representa el DCP como un secador de bandejas, con el mismo caudal de aire generado por la caída súbita de presión. Por lo tanto, se asume que la remoción de agua se da solo en el instante en el cual se da la caída de presión (cambio de presión de  $P_a$  a  $P_b$ , Figura 1).

**Figura 1.** Variaciones de presión en DCP. Adaptado de Rakotozafy *et al.*, 2000.



### Cálculo relación cantidad de producto y cantidad de aire (R)

El factor R es necesario para hacer la equivalencia entre el agua que pierde el producto y es transferida al aire y se determina mediante la Ecuación 4.

$$R = \frac{v_{\text{aire}} * cms}{q * \Delta t} \quad (4)$$

Donde R es la relación cantidad de producto y la cantidad de aire ( $\text{kg}_{\text{producto}} \text{kg}^{-1}_{\text{aire}}$ ),  $v_{\text{aire}}$  es el volumen específico del aire ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}_{\text{aire}}$ ),  $q$  es el caudal de aire ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) generado por la duración de la caída de presión,  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo adoptado (1 h), y  $cms$  es la cantidad de materia seca en la cámara de tratamiento ( $\text{kg}_{\text{producto seco}}$ ).

### Balance antes del secado

Para cada intervalo de tiempo,  $\Delta t$ , el modelo de Thompson *et al.* (1968) determina la temperatura de equilibrio entre el aire de secado y el producto. Cuantitativamente, este balance de calor sensible se representa en la Ecuación 5:

$$T_e = \frac{(1,0048 + 1,88 * W) * T + C_p * \theta}{1,0048 + 1,88 * W + C_p} \quad (5)$$

Donde,  $W$  es la razón de humedad del aire ( $\text{kg}$  de agua  $\text{kg}^{-1}$  de aire seco),  $T$  es la temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $C_p$  es el calor específico del producto ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{C}^{-1}$ ), y  $\theta$  es la temperatura del producto para cada intervalo de tiempo simulado ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### Modelo de secado en capa delgada

Una ecuación de la forma de la Ecuación 6 fue utilizada para describir el cambio de humedad en el producto a través del tiempo.

$$\frac{DM}{dt} = f(M, P, FCP, \dots, t) \quad (6)$$

Esta ecuación incorpora todas las propiedades de transporte en función del mecanismo de secado. Para esta técnica de secado no se conoce una ecuación de capa delgada, por lo que el primer paso fue determinar la ecuación que describe el comportamiento del producto en el secado por DCP. Como modelos

matemáticos de secado de capa delgada se tuvo en cuenta el modelo cinético de Newton, el modelo de Henderson – Pabis, el modelo Logarítmico y el modelo de Wang y Singh, los cuales se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Modelos matemáticos de secado en capa delgada ensayados para describir el secado de papa por DCP.

Nombre del modelo	Ecuación*	Referencia
Newton	$M_i = M_0 * e^{-kt}$	Lewis (1921)
Henderson-Pabis	$M_i = M_0 * a * e^{-kt}$	Henderson y Pabis (1961)
Logarítmico	$M_i = M_0(a * e^{-kt} + c)$	Yagcioglu <i>et al.</i> , (1999)
Wang y Singh	$M_i = M_0(a * t^2 + b * t + 1)$	Wang y Singh (1978)

\* $M_i$  es el contenido de humedad (decimal, m.s.) para el instante  $i$ ,  $M_0$  es el contenido de humedad inicial (decimal, m.s.),  $t$  es el tiempo de secado (horas),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $k$  son constantes empíricas.

Para la estimación de los parámetros para cada modelo, se realizaron tres repeticiones adicionales de cada tratamiento que se ilustra en la Tabla 1.

### Balance después del secado

El modelo de Thompson *et al.* (1968), además del balance antes del secado, realiza un balance después del secado, el cual consiste en determinar la temperatura del aire y del producto a secar ( $T_f$ ) una vez haya transcurrido el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , para ello se considera el calor latente de vaporización del agua contenida en el producto (Tabla 2). El producto habrá perdido humedad ( $\Delta M$ ), la cual habrá sido removida por el aire (incrementando su razón de humedad a  $W_f$ ). La Ecuación 7 permite efectuar este cálculo.

$$T_f = \frac{(1,0048+1,88*W_0)*T_e - \Delta W*(2461,42+CLV-T_e) + (C_p*T_e)}{1,0048+1,88*W_f+C_p} \quad (7)$$

Donde,  $W$  es la razón de humedad del aire (kg de agua  $kg^{-1}$  de aire seco),  $T_e$  es la temperatura de equilibrio (Ecuación 5, °C),  $CLV$  es el calor latente de vaporización (Ecuación 3,  $kJ kg^{-1}$ )  $C_p$  es el calor específico del producto



(kJ kg<sup>-1</sup> C<sup>-1</sup>), y los subíndices *o* y *f* representan los valores inicial y final para cada iteración respectivamente,  $\theta$  es la temperatura del producto para cada intervalo de tiempo simulado (°C).

Se utilizó el estimador error cuadrático medio (ECM) para la comparación entre los datos de la predicción obtenidos con el programa de simulación de secado y los valores experimentales (Ecuación 8).

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{exp,i} - Y_{calc,i})^2}{N}} \quad (8)$$

Donde *N* es el número de datos obtenidos experimentalmente, *Y* es el contenido de humedad para cada instante *i* (m.s.) y los subíndices *exp* y *calc* hace referencia a los valores obtenidos experimentalmente y por medio del programa de simulación, respectivamente.

### **Mediciones de actividad de agua**

Esta variable se registró al inicio y al final de cada prueba, para lo cual se utilizó el equipo AquaLab Series 3 Water Activity meter de precisión 0,003 – Pullman, USA. Para ello se realizaron 5 repeticiones de aproximadamente 3 g.

## **2.2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Modelo para cinética de secado de residuos de papa**

Los modelos de capa delgada adoptados fueron utilizados para los datos experimentales de las diferentes condiciones de secado. Los parámetros estimados para cada uno de los cuatro modelos se presentan en la Tabla 4. Los valores ECM obtenidos a partir del procedimiento de ajuste presentan la bondad de ajuste de los modelos matemáticos ensayados para describir las diferentes configuraciones de DCP.

**Tabla 4.** Análisis del ajuste de los cuatro modelos examinados para describir el secado de papa por DCP.

Tratamientos		Modelos							
ID	Caudal calculado (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )	Newton	Henderson y Pabis	Logarítmico	Wang y Singh				
DCP 1	4,34	<i>k</i> 1,653 <sup>d</sup>	<i>a</i>	1,071 <sup>a</sup>	<i>a</i>	1,73 <sup>a</sup>	<i>a</i>	0,2754 <sup>c</sup>	
			<i>k</i>	1,755 <sup>d</sup>	<i>k</i>	0,7159 <sup>d</sup>	<i>b</i>	-1,135 <sup>a</sup>	
	ECM	0,0676		0,0622		0,0283		0,0269	
DCP 2	8,68	<i>k</i> 2,353 <sup>c</sup>	<i>a</i>	1,046 <sup>ab</sup>	<i>a</i>	1,172 <sup>b</sup>	<i>a</i>	0,7167 <sup>b</sup>	
			<i>k</i>	2,434 <sup>c</sup>	<i>k</i>	1,755 <sup>c</sup>	<i>b</i>	-1,67 <sup>b</sup>	
	ECM	0,0516		0,0479		0,0341		0,0265	
DCP 3	14,23	<i>k</i> 3,108 <sup>a</sup>	<i>a</i>	1,027 <sup>b</sup>	<i>a</i>	1,12 <sup>b</sup>	<i>a</i>	1,039 <sup>a</sup>	
			<i>k</i>	3,167 <sup>a</sup>	<i>k</i>	2,669 <sup>a</sup>	<i>b</i>	-2,043 <sup>c</sup>	
	ECM	0,0327		0,0313		0,0311		0,0229	
DCP 4	17,08	<i>k</i> 2,838 <sup>b</sup>	<i>a</i>	1,041 <sup>ab</sup>	<i>a</i>	1,074 <sup>b</sup>	<i>a</i>	0,9398 <sup>a</sup>	
			<i>k</i>	2,919 <sup>b</sup>	<i>k</i>	2,272 <sup>b</sup>	<i>b</i>	-1,935 <sup>c</sup>	
	ECM	0,0516		0,0495		0,0350		0,0199	

Superíndices diferentes entre parámetros del mismo modelo representa diferencias estadísticas en los valores medios ( $p < 0,05$ ). ECM: estimador error cuadrático medio

Según los resultados, las ecuaciones ensayadas describen el proceso de secado con una precisión satisfactoria. Sin embargo, a partir de los modelos Logarítmico y de Wang y Singh, a pesar de tener un buen ajuste (valor de ECM bajo), se obtuvieron predicciones de valores de humedad negativos, lo cual no es posible.

Por la simplicidad del modelo de Newton, este fue escogido para describir el secado en capa delgada en función del caudal generado como consecuencia de la caída de presión. Para este modelo se encontró que hay diferencias

significativas entre los valores del parámetro  $k$  estimados para cada tratamiento. El parámetro  $k$  de este modelo se puede expresar como función del caudal estimado luego de la caída de presión, el cual es función de la diferencia de presión ( $P_a - P_b$ ) y de la frecuencia de caídas de presión (FCP). Para ello, se obtuvo la Ecuación 9.

$$k = 3,6543 * e^{\left(\frac{3,473}{q}\right)} \quad (9)$$

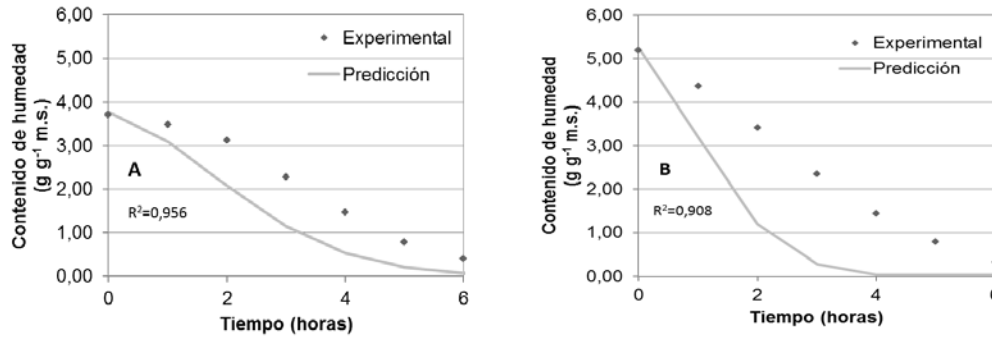
Es por ello que el valor de la caída de presión y la frecuencia de la caída de presión son las variables a controlar en el DCP. Esto coincide con Chou *et al.* (2006), Haddad (2007), Haddad *et al.* (2004), Maache-Rezzoug *et al.*, (2002), Maache-Rezzoug *et al.*, (2001) y Rakotozafy *et al.*, (2000), quienes experimentalmente encontraron que la cinética de secado en DCP puede ser explicada en gran medida por estos dos factores.

### **Efecto de la frecuencia de las caídas de presión**

La FCP tiene un efecto positivo sobre la cinética de secado. De acuerdo con el análisis de parámetros, para el modelo adoptado la constante  $k$  incrementó de 1,653 a 2,353 cuando la FCP aumentó de 6 a 12 caídas de presión por minuto, lo cual significa que un mayor número de depresiones por minuto genera un volumen de aire que pasa por la cámara de secado y esto permite que el secado sea más rápido. Esto corresponde con lo reportado por Chou *et al.* (2006) para secado de tejido dérmico de cerdo, Chua y Chou (2004) para papa y zanahoria, y por Rakotozafy *et al.* (2000) para levadura de panadería.

En la Figura 2 se ilustran los resultados de la simulación para 6 y 12 caídas de presión por minuto (DCP 1 y DCP 2, respectivamente). La predicción de los datos bajo el modelo desarrollado varió entre 91 y 96 %, para los tratamientos donde FCP vario de 6 a 12 caídas de presión por minuto, respectivamente. Los resultados para estos dos tratamientos describen que la cinética de secado mejora cuando FCP aumenta. Sin embargo, aún falta precisión de la predicción del contenido de humedad final y el tiempo de secado.

**Figura 2.** Curvas de secado para DCP configurado para diferente frecuencia de caídas de presión. Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos por el modelo de simulación empleado. A: 6 caídas de presión por minuto. B: 12 caídas de presión por minuto.



El secado por DCP permite la remoción de agua del material principalmente en el momento en el que se produce la caída de presión. En esta etapa, cierta cantidad de agua en forma líquida pasa a forma de vapor para restablecer el equilibrio en términos de la presión parcial de vapor en la atmosfera (Cong *et al.*, 2008). Por ello, si esta etapa se produce con más frecuencia (mayor FCP), la velocidad de secado aumenta.

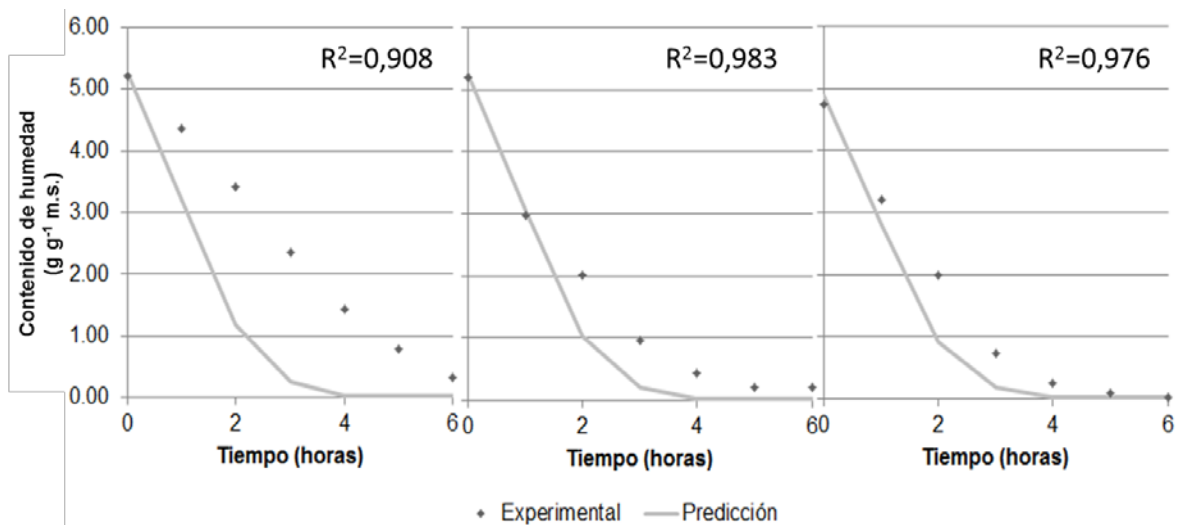
La frecuencia de secado puede aumentar hasta la respuesta límite del sistema. Para este caso, por el tiempo de respuesta de las electroválvulas, la mayor frecuencia que se puede lograr es 15 caídas de presión por minuto (menor duración de ciclo = 4 s).

### Efecto de la presión

El efecto de la presión  $P_a$  se puede analizar con los tratamientos DCP 2, 3 y 4 ( $P_a$ = 3, 5 y 6 bar, respectivamente). En la Figura 3 se ilustran los resultados experimentales y de la simulación para estos tratamientos. La predicción de la cinética de secado para estos tratamientos varió entre 91 y 98 %. La velocidad de secado aumentó cuando  $P_a$  cambió de 3 a 5 bar. Sin embargo, cuando se tuvieron valores de  $P_a$  altos (5 y 6 bar), la cinética de secado fue similar. Esto se refleja en el valor de la constante estimada del modelo de Newton,  $k$  estimada:

2,353 para  $P_a = 3$  bar, 3,108 para  $P_a = 5$  bar y 2,838 para  $P_a = 6$  bar. Esto coincide con Rakotozafy *et al.* (2000) quien estimó una superficie de respuesta para la velocidad de secado de levadura por medio de DCP. Sus resultados muestran que la velocidad de secado se estabiliza para presiones mayores a 4,6 bar.

**Figura 3.** Curvas de secado para DCP configurado para diferente valores de  $P_a$ . Comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los obtenidos por el modelo de simulación empleado. Izquierda:  $P_a = 3$  bar; Centro:  $P_a = 5$  bar; Derecha:  $P_a = 6$  bar.



Una alta diferencia de presión ( $P_a - P_b$ ) permite que el caudal de aire que pasa por la cámara de tratamiento sea mayor, lo que incrementa la remoción de agua del material. Sin embargo, adoptar la presión atmosférica como valor de  $P_b$  resulta económicamente relevante (Cong *et al.*, 2008).

### Efecto en la actividad de agua

Los valores de actividad de agua ( $a_w$ ) observados se registran en la Tabla 5. Hay una influencia del tipo de tratamiento sobre el valor de  $a_w$  final. El menor valor de  $a_w$  se obtuvo para el tratamiento con la mayor presión  $P_a$  (6 bar) y la mayor FCP (12 caídas de presión por minuto). Teniendo en cuenta que hay una relación entre la vida útil libre de moho estimada en días y el valor de  $a_w$  (Ecuación 10) (Man y

Jones, 2000), los productos obtenidos pueden tener una vida útil mayor a 20 días (DCP 1). Haddad et al. (2004) afirman que con DCP se pueden obtener productos con valores de  $a_w$  inferiores respecto a otras técnicas de secado, lo cual facilita el almacenamiento del producto deshidratado (Nieto *et al.*, 2013).

$$Vida\ util\ libre\ de\ moho = 10^{7.91-8.1*a_w} \quad (10)$$

**Tabla 5.** Valores iniciales y finales de  $a_w$  para los diferentes tratamientos DCP

Variable de respuesta	Tratamientos			
	DCP 1	DCP 2	DCP 3	DCP 4
$a_w$ inicial	0,978	0,988	0,969	0,990
$a_w$ final	0,814	0,797	0,647	0,240
M final (m.s.)	0,40	0,33	0,20	0,03

### Resultados por validar y recomendaciones

El modelo desarrollado explica en un 91 % el secado de papas descartadas por presencia de brotes mediante la DCP y contribuye al diseño y operación del sistema (Tabla 6). Para obtener un ajuste aún más preciso se recomienda utilizar otro modelo de secado en capa delgada y tener en cuenta la condensación que puede ocurrir entre las capas de producto. Así mismo, se recomienda simular las diferentes configuraciones de la cámara de tratamiento respecto a la entrada y salida de aire y al tamaño de la misma.

**Tabla 6.** Resumen de los estimadores para la comparación entre los datos de la predicción y los valores observados

Estimador para comparación	Tratamientos			
	DCP 1	DCP 2	DCP 3	DCP 4
ECM	0,739	1,377	0,504	0,495
Coefficiente de correlación	0,956	0,908	0,983	0,976

### 2.2.5 CONCLUSIONES

Con la presente investigación se propuso un modelo para la simulación de las condiciones de operación del sistema DCP. Esto permitió conocer el efecto de las variables de operación sobre la cinética de secado. Así mismo el modelo permitió definir la configuración para obtener la mayor velocidad de secado. Se recomienda: a) Utilizar valores de  $P_b = P_{atm}$ , lo cual evita el uso de equipos para generar vacío; b) Trabajar con FCP altas. El secado por DCP permite la remoción de agua del material principalmente en el momento en el que se produce la caída de presión. Entonces, si esta etapa se produce con más frecuencia, la velocidad de secado aumenta; c) Trabajar con  $P_a > 4$  bar para obtener un secado más rápido.

Al menos el 91 % de la variedad de los datos obtenidos experimentalmente es explicada por el modelo de simulación implementado. Se recomienda utilizar este modelo como base para describir la cinética de secado mediante DCP.

### 2.2.6 BIBLIOGRAFÍA

Ajila, C.M., Satinder K., B., Verma, M., Prasada Rao, U.J.S. (2011). Sustainable Solutions for Agro Processing Waste Management: An Overview. In: Environmental Protection Strategies for Sustainable Development, Malik, A. y Grohmann, E. (Eds). Springer Netherlands. p. 65–109.

Alonzo-Macías, M., Montejano-Gaitán, G., Allaf, K. (2014) Impact of drying processes on strawberry (*fragaria* var. *camarosa*) texture: identification of crispy and crunchy features by instrumental measurement. *Journal of Texture Studies*, 246 – 259.

Chen, C. (2006). Obtaining the isosteric sorption heat directly by sorption isotherm equations. *Journal of Food Engineering* 74: 178 –185.

Chou, S.K, Chua, K.J., Teoh, S.H., Ho. J.C. (2006). Drying of porcine dermal tissue via pressure swing. *Drying technology*, 24: 973–982.

Chua, K.J., Chou, S.K. (2004). On the experimental study of a pressure regulatory system for bioproducts dehydration. *Journal of Food Engineering*, 62(2):151–158.

Cong, D.T., Al Haddad, M., Rezzoug, Z., Lefevre, L., Allaf, K. (2008). Dehydration by successive pressure drops for drying paddy rice treated by instant controlled pressure drop. *Drying technology*, 26: 443 – 451.

Esteban, M.B., García, A.J., Ramos, P., Márquez, M.C. (2007). Evaluation of fruit-vegetable and fish waste as alternative feedstuffs in pig diets. *Waste management*, 27: 193–200.

FAOSTAT (2016). Food balance sheets. Consulta en línea: 12 de agosto 2016 [link de consulta: <http://fenix.fao.org/faostat/beta/#en/home>]

Galanakis, C.M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. *Trends in Food Science & Technology*, 26(2): 68–87.

Haddad, J., Juhel, F., Louka, N., Allaf, K. (2004). A Study of Dehydration of Fish Using Successive Pressure Drops (DDS) and Controlled Instantaneous Pressure Drop (DIC). *Drying technology*, 22(3): 457–478.

Hadad, M. (2007). Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation. Tesis de Doctorado, Universidad de La Rochelle. 219p.



Henderson, S.M., Pabis, S. (1961). Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 6 (3): 169–174.

Henríquez, C., Córdova, A., Almonacid, S., Saavedra, J., (2014). Kinetic modeling of phenolic compound degradation during drum-drying of apple peel by-products. *Journal of food engineering*, 143: 146 – 153.

Iguedjal, T., Louka, N., Allaf, K. (2008). Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering*, 85: 180 – 190.

Key Technology (2015). Bulk density averages. Consulta en línea: 4 de agosto 2016. [link de consulta: <http://go.key.net/rs/key/images/Bulk%20Density%20Averages%20100630.pdf>]

Larrauri, J., Ruperez, P., Saura-Calixto, F. (1997). Effect of drying temperature on the stability of polyphenols and antioxidant activity of red grape pomace peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(4): 1390 – 1393.

Lewis, W.K. (1921). The rate of drying of solid materials. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13 (5): 427–432.

Louka, N., Allaf, K. (2004). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the vacuum”: application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering*, 65: 233 – 243.

Louka, N., Juhel, F., Allaf, K. (2004). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression: General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 245 – 253.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2001). Kinetics of drying and hydration of the scleroglucan polymer. A comparative study of two conventional drying methods with a new drying process: dehydration by successive pressure drops. *Drying Technology*, 19(8): 1961–1974.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2002). Development of a new drying process: 'dehydration by cyclical pressure drops' (D.D.S). Application to the collagen gel, *Drying Technology*, 20(1): 109–130.

Man, C.M.D., Jones, A. (2000). *Shelf Life Evaluation of Foods*. Aspen Publishers Inc., U.S., Estados Unidos

Mounir, S., Besombes, C., Albitar, N., Allaf, K. (2011). Study of instant controlled pressure drop DIC treatment in manufacturing snack and expanded granule powder of apple and onion. *Drying Technology*, 29: 331–341.

Nieto A.B., Vicente, S., Hodara, K., Castro, M.A., Alzamora, S.M. (2013). Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. *Journal of Food Engineering*, 119(1): 104 – 114.

Obied, H., Bedgood, D., Prenzler, P., Robards, K. (2009). Effect of processing conditions, prestorage treatment, and storage conditions on the phenol content and antioxidant activity of olive mill waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(11): 925 – 3932.

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G., Oliveros-Toscón, C.E. (2008). SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café

pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(4): 415 – 427.

Parra-Coronado, A. (1993). Almacenamiento aireado de maíz en los Llanos Orientales. *Revista Ingeniería e Investigación*, 8(29): 5–13.

Rakotozafy, H., Louka, N., Thérísod, M., Thérísod, H., Allaf, K. (2000). Drying of baker's yeast by a new method: dehydration by successive pressure drops (DDS). Effect on cell survival and enzymatic activities. *Drying Technology*, 18(10): 2253–2271.

Ratti, C. (2009). *Advances in food dehydration*. CRC Press, Taylor & Francis group. 467p.

Roa, G.; Oliveros, C. E.; Álvarez, J.; Ramírez, C.; Sanz, J. R.; Dávila, M. T.; Álvarez, J. R.; Zambrano, D. A.; Puerta, G. I.; Rodríguez, N. (1999). Beneficio ecológico del café. Chinchiná: CENICAFE, 300p.

Shah, Z., Jani, Y. M., Khan, F. (2014) Evaluation of Organic Wastes for Composting. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(3): 309 – 320.

Sotiropoulos, A., Malamis, D., Michailidis, P., Krokida M., Loizidou, M. (2016). Research on the drying kinetics of household food waste for the development and optimization of domestic waste drying technique. *Environmental technology*, 37(8): 929 – 939.

Thompson, T. L.; Peart, R. M.; Foster, G. H. (1968). Mathematical simulation of corn drying – A new model. *Transaction of the ASAE*, 11(4): 582–586.

Wang, C.Y., Singh, R.P. (1978). A single layer drying equation for rough rice, ASAE, paper No: 78-3001, ASAE, St. Joseph, MI.

Wuttipalakorn, P., Srichumpuang, W., Chiewchan, N. (2009). Effects of pretreatment and drying on composition and bitterness of high-dietary-fiber powder from lime residues. *Drying technology*, 27: 133–142.

Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., Cagatay, F. (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. In: Bascetincelik, A., (eds). *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanization and Energy*. Faculty of Agriculture, Çukurova University, Adana, Turkey. 565 – 569

## **2.3 Efectos de la deshidratación por DCP sobre la apariencia del producto.**

**Secado de biomasa agrícola vía cambios cíclicos de presión (DCP): Efectos en las características finales del producto \***

**Drying of agricultural biomass via successive pressure drops: Effects on the final characteristics of the product**

Sebastian Gutierrez-Pacheco<sup>1,2,3</sup>, Stéphane Godbout<sup>3</sup>, Joahnn H. Palacios<sup>3</sup>  
Alfonso Parra-Coronado<sup>2</sup>, Dan Zegan<sup>3</sup>, Robert Lagacé<sup>4</sup>, Frédéric Pelletier<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (Colombia)

<sup>3</sup> Institut de Recherche et de développement en agroenvironnement, Québec, QC (Canada)

<sup>4</sup> Département de sols et génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, QC (Canada)

<sup>1</sup> Autor para correspondencia: [sgutierrezp@unal.edu.co](mailto:sgutierrezp@unal.edu.co)

### **2.3.1 RESUMEN**

La deshidratación es una operación influyente en muchos procesos de conversión de materia prima. El pardeamiento es uno de los efectos que se puede presentar en la operación de deshidratación. Por ello, nuevas técnicas de secado sobresalen por mejorar la cinética de secado y preservar algunas propiedades del producto original. La deshidratación por cambios cíclicos de presión (DCP) es una técnica reciente para productos sensibles al calor. Sin embargo, la implementación de DCP para residuos agroindustriales no se ha reportado. El objetivo de este trabajo fue identificar los efectos de las condiciones de operación del sistema DCP sobre las características finales del producto. Un diseño factorial

---

\* Presentado en: Annual General Meeting and Technical Conference, Halifax, 2016, Paper No. CSBE16-150

2<sup>2</sup> ( $\alpha = 0.05$ ), fue adoptado con nivel de presión y frecuencia de caídas de presión como factores. También se estimó la configuración de DCP óptima que genera menos pardeamiento en papas deshidratadas (Alta presión y baja frecuencia de caídas de presión). El mayor pardeamiento se registró para presión baja (3,0 bar) y alta frecuencia de caída de presión (12 ciclos min<sup>-1</sup>). Registrar los cambios de color permitió definir tres tipos de papas deshidratadas.

**Palabras clave:** Cambios de color, papas deshidratadas, residuo agroindustrial

### 2.3.2 INTRODUCCIÓN

El color y la apariencia son parámetros importantes para evaluar la calidad de productos y subproductos agroindustriales. Estos parámetros son afectados en varias operaciones de transformación. Por ejemplo, para el caso del secado, los contenidos fenólicos (antioxidantes) se oxidan y el material pierde su valor nutricional (Mishra *et al.*, 2013; Queiroz *et al.*, 2011; Saleh *et al.*, 2013). Esta oxidación genera oscurecimiento en la superficie del material.

Entre los estudios sobre los efectos de secado en la apariencia y valor nutritivo de papas deshidratadas, Iyota *et al.* (2001) indican que utilizaron vapor de agua sobrecalentado para deshidratar papa en rodajas. Encontraron que la superficie de papa deshidratada por este método era transparente y brillante en comparación con papa deshidratada con aire caliente. La transparencia en la superficie de las papas es consecuencia de la gelatinización de los gránulos de almidón. Este comportamiento también fue reportado por Sehwat *et al.* (2016), quienes afirmaron que la gelatinización permite más accesibilidad del almidón a las enzimas digestivas.

Debido a ese tipo de efectos, por lo general, no se recomiendan secadores convencionales (bandeja, túneles y tambor) para las frutas y los vegetales sensibles al calor. Actualmente, existen técnicas alternativas para materiales

sensibles al calor, como la deshidratación por sucesivos cambios cíclicos de presión (DCP). Los cambios cíclicos de presión se generan al interior de la cámara de tratamiento con el fin de a) cambiar la porosidad del material, lo cual mejora la cinética de secado b) proporcionar más aire por la misma cantidad de material húmedo y c) en los casos en que el vacío es establecido, reducir la temperatura de evaporización del agua contenida en el material.

Ciertos beneficios por el uso de DCP han sido reportados, e.g. la reducción de la pérdida de nutrientes, menos efectos sobre la calidad (color, encogimiento, textura y rehidratación) y secado más rápido (Sehrawat *et al.*, 2016). La DCP ha sido evaluada para el secado de vegetales sensibles al calor (Mounir *et al.*, 2011; Iguedjal *et al.*, 2008; Louka *et al.*, 2004; Louka y Allaf, 2004), la elaboración de snacks (Yagci y Evci, 2015), la extracción de aceites esenciales (Amor y Allaf, 2009; Kristiawan *et al.*, 2008a; Kristiawan *et al.*, 2008b), la reducción de los factores anti-nutricionales en materiales biológicos (Haddad y Allaf, 2007; Haddad *et al.*, 2007) y el tratamiento de diversas fuentes de almidón (Bahrani *et al.*, 2012; Maache-Rezzoug *et al.*, 2008).

Básicamente, la DCP utiliza dos niveles de presión: Presión alta (o presurización con valores inferiores a 10 bar), y presión baja o de vacío, ya que puede tomar valores menores o iguales a la presión atmosférica. El valor de la presión puede producir un efecto positivo en el material. Por ejemplo, con el aumento de la temperatura debido al aumento de la presión, se puede desnaturalizar la Polifenol Oxidasa (PFO), que en presencia de oxígeno oxida polifenoles presentes en la superficie de las papas (Severini *et al.*, 2003). La PFO es una enzima que contiene cobre, que cataliza la hidroxilación de mono-fenoles en posición -orto adyacente a un grupo -OH existente. Como resultado, se produce la formación de o-difenoles y o-quinonas, las cuales al someterse a una polimerización adicional no enzimática, genera pigmentos de color marrón sobre el material.

Los cambios químicos afectan la apariencia final del producto. Una manera de cuantificar los cambios de apariencia es mediante el monitoreo de los cambios de color de la superficie del producto utilizando el espacio cromático Lab (estándar CIELAB). Para esta investigación, se utilizaron dos índices para cuantificar el pardeamiento como resultado de la operación de secado de papas: Cambio de color ( $\Delta E$ ) asociado con el cambio de las tres coordenadas de color ( $L$ ,  $a$ ,  $b$ ) calculado por la Ecuación 1, y la relación de brillo (RB) que describe la reducción de brillo ( $L$ ) el cual se determinó mediante la Ecuación 2.

$$\Delta E = \sqrt{(L_i - L_0)^2 + (a_i - a_0)^2 + (b_i - b_0)^2} \quad (1)$$

Donde  $L_i$ ,  $a_i$  y  $b_i$  son los valores de las tres coordenadas de color según el estándar CIE; y  $L_0$ ,  $a_0$  y  $b_0$  son las medidas de referencia (valores iniciales).  $L$  indica la nitidez del color, desde 0 (oscuro) hasta 100 (claro). Valores positivos y negativos en  $a$  representan color rojo y verde, respectivamente; mientras, valores positivos y negativos en  $b$  representan amarillo y azul, respectivamente.  $\Delta E$  es útil para identificar los tratamientos donde el cambio de color es más evidente. Cuanto mayor es el cambio de color de la superficie del producto, mayor es el valor de  $\Delta E$ .

$$RB = \frac{L_i}{L_0} \quad (2)$$

RB representa la relación entre el valor de nitidez en cualquier instante  $i$  ( $L_i$ ) y el valor inicial de nitidez ( $L_0$ ). Este es un índice adimensional y varía desde 0 (mayor reducción de nitidez) hasta 1 (no hay reducción de nitidez). Este índice fue implementado ya que el material con el que se trabajó (papas) tenía un color originalmente blanco y retener esta propiedad era importante. En otras palabras, el objetivo era obtener valores cercanos a la unidad, lo que se traduce en una mayor retención del color blanco original de las papas.

Brevemente, la DCP es una técnica emergente caracterizada por a) generar un secado rápido, b) ser adecuada para materiales sensibles al calor, y c) la baja



contracción que produce en el material deshidratado. Sin embargo, el efecto en la apariencia del producto debe ser revisado antes de que la industria adopte esta técnica.

El objetivo de este trabajo fue identificar la evolución del color durante el secado de papas por el método de DCP. Para ello, la presión (P) y la frecuencia de las caídas de presión (FCP) se tuvo en cuenta como factores que afectan la cinética de secado y el aspecto final del material seco. Este estudio también estimó la condición de operación para la cual se obtendría un producto con el menor pardeamiento posible.

### **2.3.3 MATERIALES Y METODOS**

#### **Prototipo**

Se utilizó un prototipo experimental de DCP, el cual utilizó como cámara de secado un recipiente de 0,34 L, proveniente de una bomba de oxígeno (Parr-1108R – Moline, IL, USA). El nivel de presión era generado por un compresor de 2 hp (18,9 L Mastercraft Maximum – Toronto, ON, Canadá), y el nivel de vacío se generó por la succión del compresor. La duración de cada fase fue regulada por la apertura y cierre de válvulas solenoides (Omega SV6003 – Laval, QC, Canadá).

#### **Diseño experimental**

Un diseño factorial  $2^2$  ( $\alpha = 0.05$ ), fue adoptado con nivel de presión (P) y frecuencia de caídas de presión (FCP) como factores. Los ciclos se repitieron hasta completar 180 minutos. Las condiciones ambientales se mantuvieron a  $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\text{HR} = 20\%$ , aproximadamente. Los ensayos se compararon con muestras deshidratadas por convección natural (CN). La Tabla 1 muestra las diferentes pruebas experimentales llevadas a cabo por triplicado. El análisis de datos se realizó con la ayuda del medio de programación R (R Development Core Team).

**Tabla 1.** Resumen de los tratamientos experimentales evaluados (n = 3)

ID del tratamiento	Presión <i>P</i> (relativa, bar)	Frecuencia de caídas de presión, <i>FCP</i> (Número de depresiones por minuto)
AP-AF	3,6	12
AP-BF	3,6	6
BP-AF	3,0	12
BP-BF	3,0	6
CN	Convección natural (T = 23 °C y HR = 20 %)	

AP-AF. Alta presión-alta frecuencia; AP-BF: Alta presión-baja frecuencia; BP-AF: Baja presión-alta frecuencia; BP-BF: Baja presión-baja frecuencia; CN: Convección natural.

### Material vegetal y mediciones de humedad

Papas variedad Russet Burbank descartadas del mercado por presencia de brotes se utilizaron como materia prima. Para cada prueba, muestras de 30 g fueron cortadas en prismas rectangulares de 20 x 10 x 5 mm. El peso de las muestras se registró cada 30 minutos con el fin de seguir y determinar la velocidad de secado (VS) (Ecuación. 3). La VS fue constante durante cada prueba. Es por eso que se determinó para cada tratamiento como la pendiente de las curvas de secado obtenidas. Las muestras se pesaron utilizando una balanza electrónica (Mettler PM2000 de precisión 0,1 g - Columbus, OH, EE.UU.). Para determinar el peso seco al final de cada tratamiento, cada muestra fue colocada en un horno de convección forzada (Carbolite LHT 6/120 - Hope Valley, Reino Unido) durante 24 horas a 60 °C. El contenido de humedad (base seca) se calculó por la Ecuación 4.

$$VS = \frac{M_f - M_i}{3} \quad (3)$$

Donde, VS es la velocidad de secado ( $\text{g}_{\text{agua}} \text{g}^{-1} \text{materia\_seca} \text{h}^{-1}$ ),  $M_f$  y  $M_i$  es el contenido de humedad final e inicial, respectivamente ( $\text{g}_{\text{agua}} \text{g}^{-1} \text{materia\_seca}$ ).

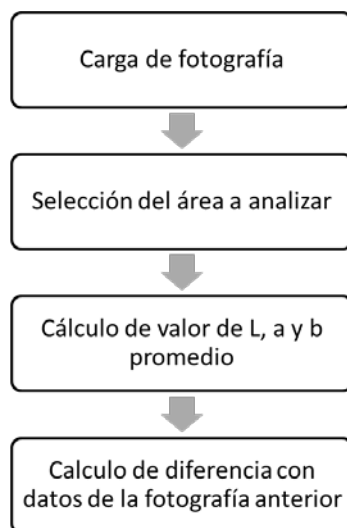
$$M_i = \frac{P_i - P_{seco}}{P_{seco}} \quad (4)$$

Donde  $M_i$  es el contenido de humedad en el instante  $i$ ,  $P_i$  es el peso de la muestra húmeda para el instante  $i$ , y  $P_{seco}$  es el peso de la muestra seca (en gramos).

### Medidas de cambio de color y relación de brillo

Se registró una fotografía de las muestras cada 30 minutos, utilizando una cámara de 3 megapíxeles. Las muestras se colocaron en una superficie blanca para iluminar uniformemente las muestras. El cambio en apariencia fue expresada por el valor de  $\Delta E$  y RB. Esto permitió el registro del cambio en apariencia causado por la oxidación durante el proceso de secado. Las imágenes fueron procesadas por un programa informático diseñado en lenguaje Visual Basic ®, teniendo como base el estándar CIE Lab (Comisión Internacional de l'Eclairage). La Figura 1 ilustra el diagrama general del programa.

**Figura 1.** Diagrama general del programa para interpretación de imágenes.



## 2.3.4 RESULTADOS Y DISCUSION

### Cinética de secado

Los promedios de la velocidad de secado para cada tratamiento se resumen en la Tabla 2. Durante el tiempo de secado (180 min), todas las velocidades de secado fueron constantes. La humedad inicial de las muestras fue similar para todas las

condiciones de secado ( $p > 0,05$ ), lo cual garantiza que la humedad inicial no fue un factor influyente en la cinética de secado. No se obtuvo diferencia significativa entre los tratamientos con la misma FCP. En otras palabras, las diferencias de presión establecidas no fueron lo suficientemente grandes para obtener una diferencia en la velocidad de secado.

**Tabla 2.** Promedios de los valores obtenidos de la cinética de secado para tratamientos DCP.

ID del tratamiento	Mi (g <sub>agua</sub> g <sup>-1</sup> <sub>m.s.</sub> )	VS (g <sub>agua</sub> g <sup>-1</sup> <sub>m.s.</sub> h <sup>-1</sup> )	Mf (g <sub>agua</sub> g <sup>-1</sup> <sub>m.s.</sub> )
AP-AF	3,81	0,508 <sup>a</sup>	2,285 <sup>b</sup>
AP-BF	3,98	0,289 <sup>b</sup>	3,116 <sup>a</sup>
BP-AF	3,64	0,560 <sup>a</sup>	1,964 <sup>b</sup>
BP-BF	4,08	0,302 <sup>b</sup>	3,173 <sup>a</sup>

Superíndices diferentes por columna representa diferencias estadísticas en los valores medios ( $p < 0,05$ )

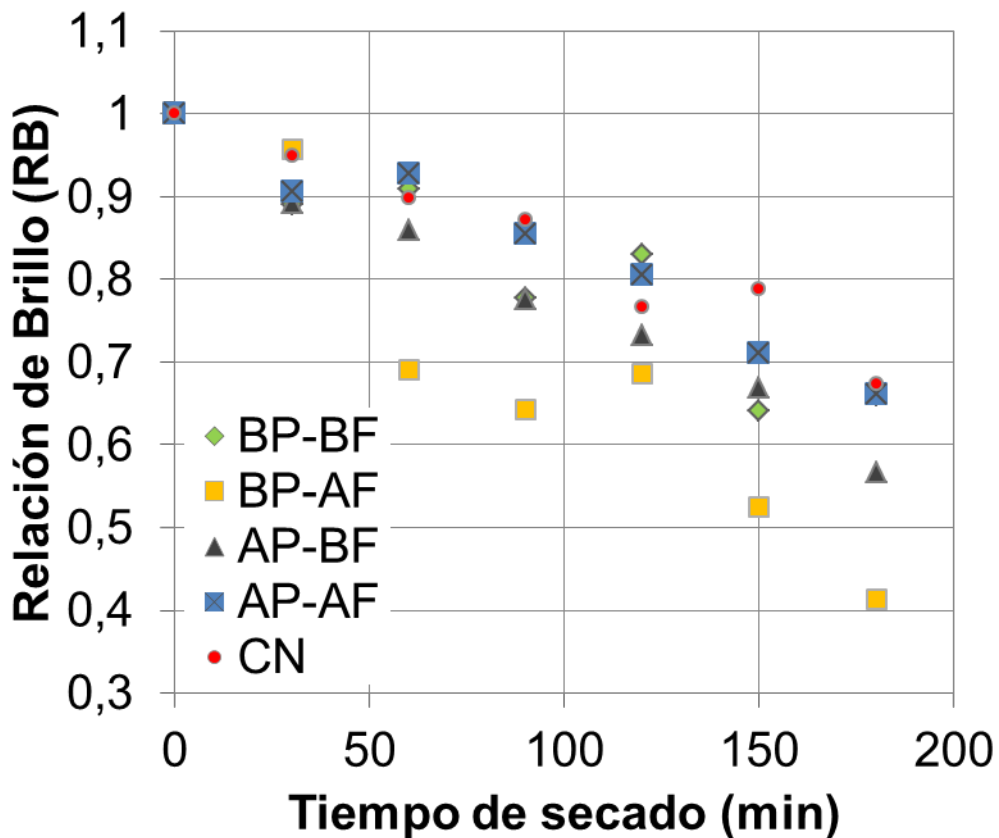
Mayor FCP permitió una mayor cantidad de aire que pasa a través de la cámara de tratamiento, razón por la cual todos los tratamientos de DCP tuvieron una mayor VS en comparación con CN (0.254 g<sub>agua</sub> g<sup>-1</sup><sub>m.s.</sub> h<sup>-1</sup>). Entonces, el tiempo de secado bajo condiciones de CN para obtener la misma reducción de humedad es el doble en comparación con los tratamientos con alta FCP. Esto coincide con lo indicado por Maache-Rezzoug *et al.* (2001), quienes mostraron que un ciclo de duración corta aumenta la cinética de secado.

### Cambio en apariencia

Se observaron cambios consistentes en la nitidez para todas las condiciones de secado (Figura 2). Sin embargo, para los tratamientos AP-AF y BP-BF se registró menos oscurecimiento (valores finales de RB más altos) en comparación a AP-BF y BP-AF (Tabla 3). Para el caso de AP-AF, la reacción de oscurecimiento fue menor debido al valor de alta presión. Respecto al tratamiento BP-BF, la baja

frecuencia y el valor de presión bajo representó menor cantidad de aire y por consiguiente, de oxígeno. Estas dos condiciones (alta presión o baja disponibilidad de oxígeno) desaceleró las reacciones de pardeamiento. Krishnan *et al.* (2010) afirmaron que el color de las papas secas es un indicativo de la retención de fenoles. En su investigación, consiguieron harina de papa no decolorada y afirman que el secado es la fase donde la Polifenol Oxidasa (PFO) puede ser inactivada. No hay diferencia apreciable entre el valor final de RB para NC, AP-AF Y BP-BF.

**Figura 2.** Evolución de la relación de brillo para los tratamientos evaluados. AP: Alta presión (3,6 bar), BP: Baja presión (3,0 bar), AF: Alta frecuencia (12 depresiones por minuto), BF: Baja frecuencia (5 depresiones por minuto).



**Tabla 3.** Promedios de los valores obtenidos de RB y  $\Delta E$  para cada tratamiento.

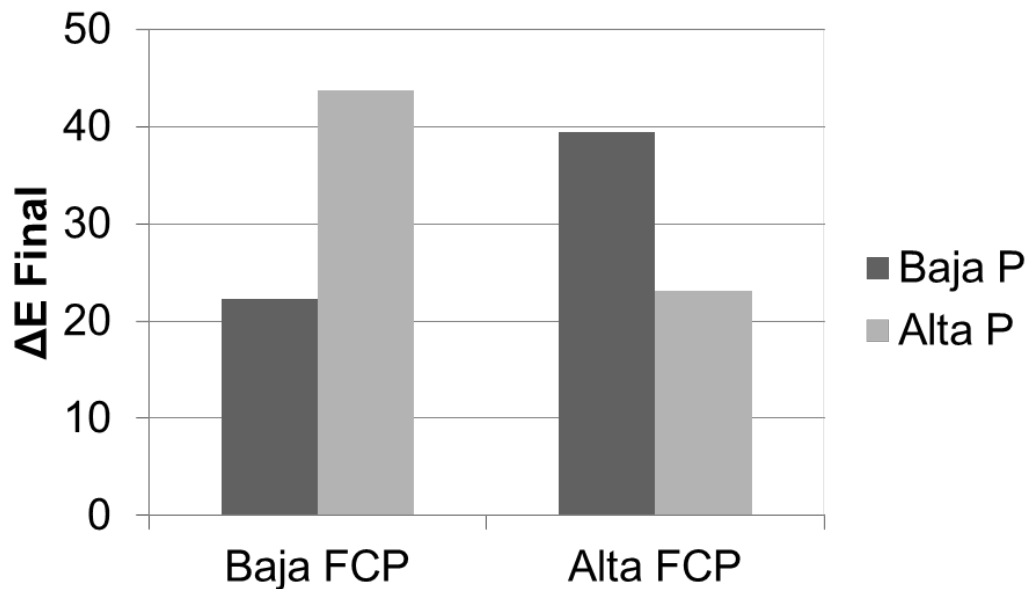
ID del tratamiento	Valor final de RB (adimensional)	$\Delta E$ total (adimensional)
CN	0,674 <sup>a</sup>	21,47 <sup>a</sup>
AP-AF	0,661 <sup>a</sup>	23,07 <sup>a</sup>
AP-BF	0,567 <sup>ab</sup>	43,70 <sup>a</sup>
BP-AF	0,413 <sup>b</sup>	39,42 <sup>a</sup>
BP-BF	0,660 <sup>a</sup>	22,28 <sup>a</sup>

Superíndices diferentes por columna representa diferencias estadísticas en los valores medios ( $p < 0,05$ )

El test de comparación múltiple, permitió identificar tres calidades de papas de acuerdo con el valor de RB: Mejor calidad (subíndice a) calidad intermedia (ab) y menor calidad (b) (Tabla 3).

Se observó un efecto de la interacción entre P y FCP para el valor de  $\Delta E$  total ( $p = 0.0309$ ). Mientras que para una baja FCP el pardeamiento se incrementó proporcionalmente a P, para una alta FCP el efecto fue contrario (Figura 3). Para una alta FCP, una mayor cantidad de aire pasa a través de la cámara de tratamiento. Esto significa un mayor flujo de oxígeno en contacto con el producto y, por lo tanto, una mayor relación oxígeno/sustrato, que ocasiona una mayor oxidación del producto. Pero, al utilizar una presión alta (AF-AP), el producto tiene un incremento de temperatura lo que reduce el pardeamiento.

**Figura 3.** Valores promedio de  $\Delta E$  total para cada tratamiento DCP. P: Presión, FCP: Frecuencia de caídas de presión.



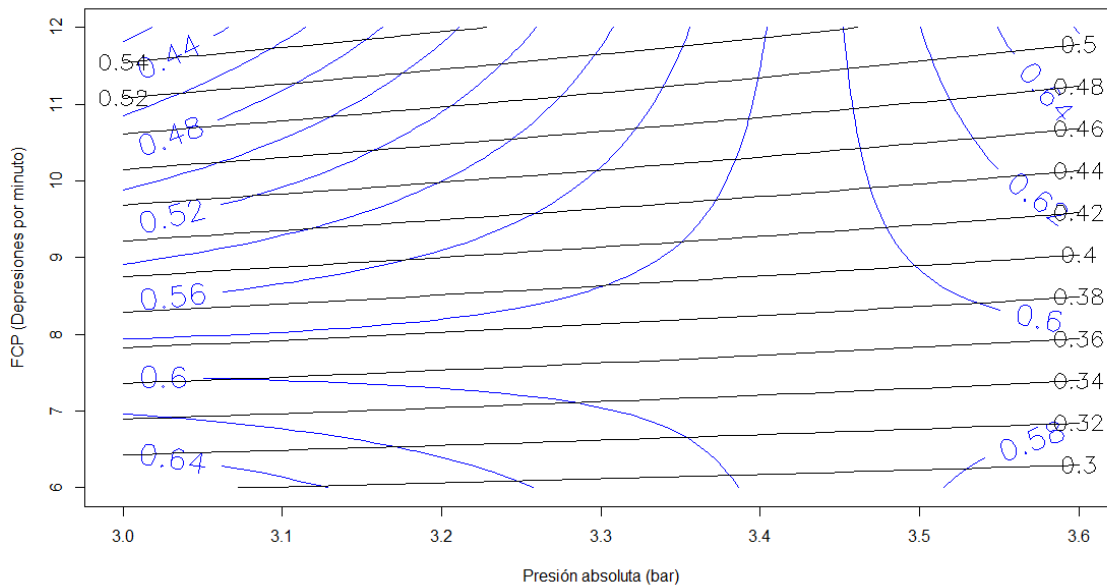
Brevemente, AP-AF no solo permitió un secado más rápido. Al mismo tiempo, para este tratamiento el pardeamiento fue menor. El aire de secado bajo esta condición es condicionado de manera tal que se calienta un poco para aumentar el potencial de secado y este calentamiento desnaturaliza la PFO.

### **Optimización preliminar del DCP en función de la velocidad de secado y el pardeamiento**

Por último, dos superficies de respuesta se determinaron con el fin de optimizar el funcionamiento del DCP como función de la velocidad de secado y el pardeamiento, basado en relación de brillo (RB). A mayor FCP (12 depresiones por minuto), mayor reducción del contenido de humedad. Esta observación concuerda con los resultados de Chou *et al.* (2006) y Maache-Rezzoug *et al.* (2002). Chou *et al.* (2006) afirmaron que una FCP alta induce un mayor efecto "túneling" en la estructura interna de las muestras biológicas. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la reducción del contenido de humedad también es consecuencia de la cantidad de aire que pasa a través del recipiente de tratamiento, la cual es mayor para esta condición.

Combinando este resultado con el modelo RB, se sugiere el uso de DCP en altas FCP y  $P > 3,4$  bar (Figura 4). Con ello, se puede mantener un 60 % de la blancura inicial de las papas. Este resultado debe compararse con los efectos de los compuestos formados en reacciones de pardeamiento. Por ejemplo, en el caso de alimentos para animales, los compuestos formados en las primeras etapas de las reacciones de oscurecimiento son tóxicos para los microbios del rumen (Kyuma *et al.*, 1991).

**Figura 4.** Superposición de curvas de contorno obtenidas para la velocidad de secado (VS) (en negro) y la relación de brillo BR (en azul).





### 2.3.5 CONCLUSIONES

Mediante este trabajo, se registró la evolución del color de muestras de papa durante el secado por DCP. Monitorear el color es una herramienta útil para conocer las diferentes calidades del producto final, lo cual se ve reflejado en la apariencia y color. De acuerdo con la RB, se pueden lograr tres (3) tipos de papas deshidratadas.

El uso de alta FCP contribuye a aumentar la velocidad de secado. Para reducir cambios en color indeseables, se sugiere trabajar con  $P_a - P_b > 3,4$  bar. Si el objetivo es evitar papas deshidratadas oscuras, se sugiere una operación de blanqueamiento previa al secado.

### 2.3.6 BIBLIOGRAFÍA

Amor, B.B. y Allaf, K. (2009). Impact of texturing using instant pressure drop treatment prior to solvent extraction of anthocynains from Malaysian Roselle (*Hibiscus sabdariffa*). Food Chemistry, 115: 820 – 825.

Bahrani, S.A., Loisel, C., Rezzoug, S.A., Doublier, J.L., Macche-Rezzoug, Z. (2012). Role of vacuum steps added before and after steaming of maize starch. Impact on pasting, morphological and rheological properties. Carbohydrate Polymers, 89: 810 – 820.

Chou, S.K., Chua, K.J., Teoh, S.H., Ho, J.C. (2006). Drying of porcine dermal tissue via pressure swing adsorption. Drying Technology, 24, 973 – 982.

Haddad, J. y Allaf, K. (2007). A study of the impact of instantaneous controlled pressure drop on the trypsin inhibitors of soybean. Journal of Food Engineering, 79: 353 – 357.

Haddad, J., Greiner, R., Allaf, K. (2007). Effect of instantaneous controlled pressure drop on the phytate content of lupin. *LWT – Food Science and Technology*, 40: 448 – 453.

Iguedjtal, T., Louka, N., Allaf, K. (2008). Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering*, 85: 180 – 190.

Iyota, H., Nishimura, N., Onuma, T., Nomura, T. (2001). Drying of sliced raw potatoes in superheated steam and hot air. *Drying Technology*, 19: 1411–1424.

Krishnan, J.G., Padmaja, G., Moorthy, S.N., Suja, G., Sajeev, M.S. (2010). Effect of pre-soaking treatments on the nutritional profile and browning index of sweet potato and yam flours. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(2): 387–393.

Kristiawan, M., Sobolik, V., Al-Haddad, M., Allaf, K. (2008a). Effect of pressure-drop rate on the isolation of cananga oil using instantaneous controlled pressure-drop process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47: 66 – 75.

Kristiawan, M., Sobolik, V., Allaf, K. (2008b). Isolation of Indonesian cananga oil using multi-cycle pressure drop process. *Journal of Chromatography A*, 1192(2): 306 – 318.

Kyuma, T.; Ishida, M. and Takigawa, A. (1991). Influence of furfural contents in steamed wood on the feed consumption and digestibility in goats. *Bulletin of National Institute of Animal Industry*, 51, 59–63.

Louka, N. y Allaf, K. (2004). Expansion ratio and color improvement of dried vegetables texturized by a new process “controlled sudden decompression to the

vacuum”: application to potatoes, carrots and onions. *Journal of Food Engineering*, 65: 233 – 243.

Louka, N., Juhel, F., Allaf, K. (2004). Quality studies on various types of partially dried vegetables texturized by Controlled Sudden Decompression: General patterns for the variation of the expansion ratio. *Journal of Food Engineering*, 65(2): 245 – 253.

Maache-Rezzoug, Z., Zarguili, I., Loisel, C., Queveau, D., Buleon, A. (2008). Structural modifications and thermal transitions of standard maize starch after DIC hydrothermal treatment. *Carbohydrate Polymers*, 74; 802 – 812.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2002). Development of new drying process-dehydration by cyclical pressure drops (D.D.S.): Application to the collagen gel. *Drying Technology*, 20 (1), 109–129.

Maache-Rezzoug, Z., Rezzoug, S.A., Allaf, K. (2001). Kinetics of drying and hydration of the scleroglucan polymer. A comparative study of two conventional drying methods with a new drying process: dehydration by successive pressure drops. *Drying Technology*, 19(8): 1961–1974.

Mishra, B.B., Gautam, S., Sharma, A. (2013). Free phenolics and polyphenol oxidase (PPO): The factors affecting post-cut browning in eggplant (*Solanum melongena*). *Food Chemistry*, 139: 105–114.

Mounir, S., Besombes, C., Albitar, N., Allaf, K. (2011). Study of instant controlled pressure drop DIC treatment in manufacturing snack and expanded granule powder of apple and onion. *Drying Technology*, 29: 331–341.

Queiroz, C., da Silva, A.J.R., Lopes, M.L.M., Fialho, E., Valente-Mesquita V.L. (2011). Polyphenol oxidase activity, phenolic acid composition and browning in

cashew apple (*Anacardium occidentale*, L.) after processing. *Food Chemistry*, 125: 128–132

Saleh, M.A., El-Gizawy, A.M., El-Bassiouny, R.E.L., Ali, H.M. (2013). Effects of anti-coloring agents on blackening inhibition and maintaining physical and chemical quality of fresh-cut okra during storage. *Annals of Agricultural Science*, 58: 239–245

Sehrawat, R., Nema, P.K., Pal Kaur, B. (2016). Effect of superheated steam drying on properties of foodstuffs and kinetic modeling. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34: 285–301.

Severini, C., Baiano, A., De Pilli, T., Romaniello, R., Derossi, A. (2003). Prevention of enzymatic browning in sliced potatoes by blanching in boiling saline solutions. *LWT – Food Science and Technology*, 36: 657–665

Yagci, S., Evci, T. (2015). Effect of instant controlled pressure drop process on some physicochemical and nutritional properties of snack produced from chickpea and wheat. *International Journal of Food Science and Technology*, 50: 1901–1910.

# 3. Conclusiones generales

## **Dispositivo**

En la presente investigación se logró diseñar e implementar un sistema de deshidratación para residuos agrícolas que utiliza la técnica de DCP. El prototipo construido está diseñado para estudios en laboratorio. La capacidad del dispositivo es de 6 kg, sin embargo, en el presente estudio se utilizó una cámara de tratamiento de 170 g de capacidad (0,34 L) teniendo en cuenta los recursos disponibles y los requerimientos preestablecidos. Para utilizar el dispositivo a plena capacidad, es necesaria una cámara de tratamiento más grande (12 L). Aunque el diseño se centró en las características de la papa descartada por presencia de brotes, el prototipo puede ser adaptado para la deshidratación de otros residuos agroindustriales.

A diferencia de prototipos que utilizan la misma técnica, el dispositivo actual no requiere de bomba de vacío para garantizar el valor de presión baja ( $P_b$ ). Esto es una ventaja en términos prácticos.

Almacenar el aire comprimido en el tanque del compresor permite que el aire ingrese a la cámara de secado con un valor bajo de humedad relativa (<30 %) El filtro de gel de sílica y la posibilidad de comprimir el aire y retirar el agua condensada por medio de una válvula de drenaje del tanque del compresor ayudan a garantizar esta condición.

## **Efectos de las variables de operación del dispositivo sobre el material**

Una mayor frecuencia de caídas de presión permite aumentar la velocidad de secado. El modelo propuesto considera que una alta frecuencia y una diferencia de presiones mayor, representa un mayor caudal de aire a través de la cámara de tratamiento. Se asumió que durante la DCP, la remoción de agua desde el

material se da principalmente en la fase de la caída súbita de presión. Entonces, el agua contenida en forma líquida en el material pasa a forma de vapor para restablecer el equilibrio con la presión parcial del vapor del ambiente. Si este fenómeno se presenta con mayor frecuencia, el secado será más rápido. Así mismo, se sugiere trabajar con  $P_a > 4$  bar para obtener un secado más rápido y restringir el pardeamiento del material hasta un 40 % relativo al valor de brillo inicial.

Para el caso del producto estudiado, no hay una diferencia significativa al utilizar  $P_b < P_{atm}$  o  $P_b = P_{atm}$ . Sin embargo, puede que haya una ventaja representativa cuando la estructura del producto sea más porosa.

### **Modelo de simulación**

El modelo de simulación propuesto es la primera macro-aproximación que se reporta para un sistema de DCP. Esta herramienta será útil para futuros trabajos de experimentación y diseño. El uso del modelo permitió conocer el efecto de las variables de operación sobre la cinética de secado y así mismo definir la configuración que permite la mayor velocidad de secado. Es un modelo que logra explicar gran parte de la variación de los datos experimentales. Sin embargo, el modelo sobreestima la capacidad de remoción de agua del aire y no tiene en cuenta la condensación que puede ocurrir entre las capas de producto.

### **Registros de color**

Para esta investigación se desarrolló una herramienta en Visual Basic que permite registrar la evolución del color de papas durante el secado por DCP. Monitorear el color es una herramienta útil para conocer el efecto del tratamiento sobre diferentes calidades del producto final, lo cual se ve reflejado en la apariencia y color del producto final. Esta información en conjunto con el modelo de cinética de secado es útil para predecir el tiempo de secado y el tipo de producto que se obtiene.

**Recomendaciones para trabajos futuros**

Se recomienda realizar evaluaciones adicionales del modelo de simulación matemática de la DCP, para otros valores de presión y frecuencia de caídas de presión y otras capacidades del sistema. Así mismo, se sugiere vincular la información que puede ser obtenida por medio de fotografías con la caracterización nutricional y química del producto. Esta información permitirá conocer el campo de aplicación del producto obtenido. Se recomienda explorar la posibilidad de trabajar con frecuencias de depresión mayores y su efecto sobre la cinética de secado y la calidad del producto.