

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SECADO POR ASPERSIÓN DE
JUGO DE JACA (*ARTOCARPUS HETEROPHYLLUS* L.) UTILIZANDO
FRUCTANOS DE AGAVE AGP Y MALTODEXTRINA COMO MATERIAL
ENCAPSULANTE**

**ALLAN DANIEL DLAIKAN CASTILLO
MARIAM GIANELLA TRUJILLO AYALA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SECADO POR ASPERSIÓN DE
JUGO DE JACA (*ARTOCARPUS HETEROPHYLLUS* L.) UTILIZANDO
FRUCTANOS DE AGAVE AGP Y MALTODEXTRINA COMO MATERIAL
ENCAPSULANTE**

**ALLAN DANIEL DLAIKAN CASTILLO
MARIAM GIANELLA TRUJILLO AYALA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Director:

**CARLOS JESÚS MUVDI NOVA
Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.**

Co-directora:

**ROSA ISELA ORTIZ BASURTO
Ingeniera Bioquímica, M.Sc., Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

A Dios por las oportunidades que me ha brindado.

A mis padres por el consejo y apoyo invaluable e incondicional durante todos
estos años.

A mi hermano por ser un gran amigo con el que siempre pude contar.

A Pacho por su carisma y encontrar siempre alguna forma de levantarnos el
ánimo.

A mis nonitas Aydé y Julieta que espero llenarlas de orgullo.

A mis tíos/as y primos/as por ser una familia increíble.

A David, excelente amigo de toda la vida.

A Liz, esa amiga que conocí gracias a las vueltas impredecibles de la vida.

A mis grandes amigos durante la carrera: Turi, Roa, Julián, Amilcar, Bryan; por
estos años apoyándonos y creciendo juntos.

A Mariam, por ser una grandísima persona, compañera, amiga y pareja.

Allan Daniel Dlaikan Castillo

A Dios, mi roca, mi fortaleza, mi castillo.

A la Santísima Virgen María; todo por la Inmaculada... ¡Nada sin ella!

A mis padres Jaime Trujillo Sierra y Emilce Ayala Quiñones, por su gran ejemplo, guía y motivación; por su amor, su paciencia, sus desvelos y por enseñarme de perseverancia y sacrificios. Porque se merecen todo y un poquito más.

A mis hermanos Cristhian y Andrés, por su cariño y compañía.

A mi nonita Lucrecia, por su amor, oración y consejo.

A mi familia, especialmente a mi tío Pbro. Ramiro Trujillo Sierra (Q.E.P.D.), por su ejemplo de vida, su dedicación, su amor a la familia y su testimonio de Fe.

A mis amigos, Dayis, Manuel, Ivonne, Zuly, Wendy, Luis Mi, Yully, Karol, Andrea J., por ser siempre incondicionales a pesar de la distancia y las circunstancias, y a todas aquellas personas que por la gracia de Dios han hecho parte de mi vida, gracias por su compañía, su apoyo, su aprecio, su tolerancia y por sus grandes lecciones de vida que me ayudaron en mi crecimiento personal y profesional.

A Allan, mi compañero de Tesis y compañero de viaje durante este proceso, con quien comparto la alegría de esta meta cumplida.

A mí.

Mariam Gianella Trujillo Ayala

AGRADECIMIENTOS

A DIOS Todopoderoso por brindarnos la oportunidad de obtener otro triunfo personal; por darnos salud, sabiduría, y entendimiento para lograr esta meta.

Por el apoyo único e incondicional que sólo personas tan especiales como nuestros padres nos otorgaron, nuestro agradecimiento es tan grande como el amor que les tenemos, gracias a ellos seguimos los ejemplos correctos, con su paciencia y amor nos enseñaron cosas que nadie en la vida puede quitar y con sus consejos seguiremos nuestros caminos con una sensación de satisfacción por haber cumplido con ellos.

Al Doctor **Carlos Jesús Muvdi Nova**, quien confió en nosotros y nos dio la posibilidad de aprender bajo su asesoría; por su dedicación, compromiso y exigencia durante la realización de este trabajo de grado y por sus aportes como docente en nuestros estudios académicos.

A la Doctora **Rosa Isela Ortiz Basurto**, quien además de su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo, nos brindó su apoyo incondicional durante la pasantía en México; por orientarnos en el proceso de la investigación y hacer amena nuestra estadía en su hermoso país.

Nuestro más grande sentimiento de gratitud hacia el **Instituto Tecnológico de Tepic (ITT)**, a su **Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos (LIIA)** y sus grupo de profesionales, especialmente hacia los Maestros **Adriana Navarrete, Isaacs Ceja, Pamela Aldrete** y **Darvin Jiménez**, quienes nos recibieron con todo el cariño y nos guiaron en nuestra estadía en Tepic; gracias por su disposición y apoyo brindado durante la fase experimental de esta investigación, por sus consejos, su compañía y su valiosa amistad.

Al **Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos (CICTA)** y a cada uno de sus miembros por su amabilidad y la colaboración prestada.

A la **Universidad Industrial de Santander** y a nuestra **Escuela de Ingeniería Química**, por brindarnos las herramientas para formarnos como profesionales íntegros; por ser nuestra *alma máter*, centro de estudio, campo de lucha y espacio de sueños cumplidos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	26
1.1. OBJETIVO GENERAL	26
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
2. METODOLOGÍA.	27
2.1. ETAPA 1: EVALUACIÓN DEL SECADOR POR ASPERSIÓN A TRAVÉS DE SIMULACIÓN EN EL <i>SOFTWARE</i> ANSYS® 18.1.	27
2.2. ETAPA 2: ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS FORMULACIONES DE LA SOLUCIÓN A SECAR.	30
2.3. ETAPA 3: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN OBTENIDAS POR SIMULACIÓN PARA EL SECADO POR ASPERSIÓN.	32
2.4. MATERIALES, MÉTODOS EXPERIMENTALES Y DE CUANTIFICACIÓN.	32
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	34
3.1. EVALUACIÓN DEL SECADOR POR ASPERSIÓN A TRAVÉS DE SIMULACIÓN EN EL <i>SOFTWARE</i> ANSYS® 18.1.	34
3.2. ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS FORMULACIONES DE LA SOLUCIÓN A SECAR.	38
3.3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN OBTENIDAS POR SIMULACIÓN PARA EL SECADO POR ASPERSIÓN.	40
4. CONCLUSIONES	46
5. RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS	55

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones de operación del secador para el diseño experimental.	29
Tabla 2. Contenido de material encapsulante para las soluciones a secar.	31
Tabla 3. Rendimientos y tamaño de gota obtenidos de la simulación del secado por aspersion utilizando agua como alimentación y 110°C de temperatura aire de entrada.	34
Tabla 4. Caracterizaciones fisicoquímicas del jugo hidrolizado de jaca (J), jugo hidrolizado con fructanos de agave (J-FA), jugo hidrolizado con fructanos de agave y maltodextrina (J-FA/MD) y jugo hidrolizado con maltodextrina (J-MD).	39
Tabla 5. Rendimientos del secado por aspersion para las distintas formulaciones del jugo hidrolizado de jaca en los lotes A y B con temperatura de aire de entrada de 110°C.	41
Tabla 6. Caracterizaciones fisicoquímicas de los polvos.	42
Tabla 7. Caracterizaciones fisicoquímicas de los polvos reconstituidos.	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Árbol de jaca.	18
Figura 2. Diagrama básico de un secador por aspersion. A) Atomización, B) Difusión del líquido en el aire, C) Evaporación y D) Separación del producto.	21
Figura 3. Estructura química de los fructanos.	24
Figura 4. Diagrama metodológico.	28
Figura 5. Superficie de respuesta del modelo del %Rendimiento. P: presión de aire del atomizador [MPa], f: flujo de alimentación [kg/h]	35
Figura 6. Patrón de flujo de líquido correspondiente a las condiciones de $f=0,6110$ kg/h y $P=0,1$ MPa, y un $d_{32}=297,3$ μm .	36
Figura 7. Patrones de flujo correspondiente a las condiciones de $f=0,6110$ kg/h y $P=0,3$ MPa, y un $d_{32}=119,5$ μm . A) Patrón de flujo de las gotas. B) Zonas de influencia resaltadas. C) Patrón de flujo de aire.	37

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Equipo de secado por aspersión.	55
ANEXO B. Comprobación de características de calidad de malla y simulación.	56
ANEXO C. Cálculos detallados de parámetros o variables para el simulador.	58

NOMENCLATURA

Índices

a_w	Actividad de agua (adimensional)
CFD	Referente a Dinámica de Fluidos Computacional
D	Diámetro del atomizador [m]
d	Diámetro de orificio del atomizador [m]
d_{32}	Diámetro medio de Sauter [μm]
ED	Referente a equivalentes de dextrosa
f	Flujo de alimentación [kg/h]
FA	Referente a fructanos de agave AGP
J	Referente a jugo hidrolizado de jaca
MD	Referente a maltodextrina
N	Velocidad de giro del atomizador [rpm]
n	Número de orificios del atomizador (adimensional)
P	Presión de aire del atomizador [MPa]
R	Radio del atomizador [m]
SST	Sólidos solubles totales [°Brix]
T	Temperatura de entrada del aire [°C]
TI	Intensidad turbulenta (adimensional)
V	Volumen [L]
v	Velocidad inicial de las gotas [m/s]
Wm	Peso del producto seco obtenido [g]
Wo	Peso de sólidos totales de entrada [g]
y^+	Coefficiente de la ley de la pared (adimensional)

Letras griegas

ρ	Densidad
--------	----------

Números adimensionales

Re	Reynolds
------	----------

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE SECADO POR ASPERSIÓN DE JUGO DE JACA (*ARTOCARPUS HETEROPHYLLUS* L.) UTILIZANDO FRUCTANOS DE AGAVE AGP Y MALTODEXTRINA COMO MATERIAL ENCAPSULANTE*

AUTORES: Allan Daniel Dlaikan Castillo – Mariam Gianella Trujillo Ayala**

PALABRAS CLAVE: Secado por aspersión, Jaca, Fructanos de agave AGP, Maltodextrina, Material encapsulante, CFD.

DESCRIPCIÓN:

La jaca es un fruto producido en México, principalmente en el estado de Nayarit; posee un alto contenido nutricional, en el que se destacan vitaminas, carotenoides y antioxidantes. Sin embargo, frecuentemente es desperdiciado, situación que advierte la necesidad de procesarlo para alargar su vida de anaquel y darle valor agregado. Como alternativa de solución, en este trabajo se propuso el secado por aspersión, que retira humedad y estabiliza el producto sin alterar significativamente su contenido nutricional, no obstante, es un proceso de carácter empírico donde intervienen diversas variables y fenómenos de transporte, por lo que se utilizó modelamiento y simulación mediante el *software* ANSYS® 18.1, escogiendo agua como compuesto representativo de la fase líquida y se realizó un diseño factorial 3^2 con flujo de alimentación f (0,3666-0,8555 kg/h) y presión de aire del atomizador P (0,1-0,3 MPa), para encontrar condiciones que permitieran el mayor rendimiento para el proceso.

Los resultados indicaron que a bajos flujos de alimentación y a altas presiones de aire se obtuvieron los mayores rendimientos. Las condiciones escogidas fueron $f=0,6110$ kg/h y $P=0,3$ MPa, que permitieron un rendimiento teórico del 100%, sin comprometer el tiempo de operación.

Con base en esto, se secaron 2 lotes de jugo de jaca en un secador por aspersión modelo LPG-5, el primero siguiendo el protocolo de Navarrete *et al.* (2017) ($f=0,6110$ kg/h; $P=0,2$ MPa), y posteriormente a las condiciones elegidas de la simulación, obteniendo rendimientos de $59,05\pm 4,86\%$ y $65,26\pm 3,41\%$ respectivamente. Las caracterizaciones fisicoquímicas de los jugos frescos y reconstituidos de jaca, comprobaron que el proceso no afectó drásticamente el contenido nutricional del producto gracias a la encapsulación ofrecida por los fructanos de agave AGP y la maltodextrina.

* Proyecto de grado. Modalidad Pasantía de Investigación.

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.; Co-directora: Rosa Isela Ortiz Basurto, Ingeniera Bioquímica, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF SPRAY DRYING CONDITIONS OF JACKFRUIT JUICE (ARTOCARPUS HETEROPHYLLUS L.) USING HDP AGAVE FRUCTANS AND MALTODEXTRIN AS ENCAPSULATING MATERIAL *

AUTHORS: Allan Daniel Dlaikan Castillo – Mariam Gianella Trujillo Ayala **

KEYWORDS: Spray drying, Jackfruit, HDP agave fructans, Maltodextrin, Encapsulating material, CFD.

DESCRIPTION:

The jackfruit is a crop produced in México, mainly in the state of Nayarit; this has a high nutritional value, where vitamins, carotenoids and antioxidants are highlighted. However, it's frequently wasted, situation that notices the need for processing it in order to lengthen its shelf life and give it added value. As an alternative, this work proposes the spray drying, which removes moisture and stabilizes the product without altering significantly its nutritional value, nevertheless, this is an empiric nature process where different variables and transport phenomena intervene, reason why modeling and simulation by software ANSYS® 18.1 was used, selecting water as representative compound of the liquid phase and a factorial design 3^2 with feed flow rate f (0,3666-0,8555 kg/h) and sprayer air pressure P (0,1-0,3 MPa) was made, aiming to find conditions which allow the highest yield to the process.

The results indicated that low feed flow rates and high sprayer air pressure meant the highest yields. The chosen conditions were $f=0,6110$ kg/h and $P=0,3$ MPa, which allowed a 100% theoretical yield, without compromising the operation time.

Based on this, 2 batches of jackfruit juice were dried in a spray dryer LPG-5 model, the first one following Navarrete *et al.* (2017) protocol ($f=0,6110$ kg/h; $P=0,2$ MPa), and later with the chosen conditions in the simulation, obtaining $59,05\pm 4,86\%$ and $65,26\pm 3,41\%$ yields respectively. The physicochemical characterizations of the fresh and reconstituted jackfruit juices proved that the process didn't affect drastically the product's nutritional value due to the encapsulation offered by the HDP agave fructans and the maltodextrin.

* Undergraduate Project. Research Internship modality.

** Physics-chemistry Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Industrial University of Santander. Advisors: Carlos Jesús Muvdi Nova, Chemical Engineer, M.Sc., Ph.D.; Rosa Isela Ortiz Basurto, Biochemical Engineer, M.Sc., Ph.D.

PRESENTACIÓN DEL LABORATORIO INTEGRAL DE INVESTIGACIÓN EN ALIMENTOS

El Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos (LIIA) del Instituto Tecnológico de Tepic (ITT), Nayarit, México, es un centro adscrito al programa de Posgrado en Ciencia en Alimentos, reconocido en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPc) del CONACYT, que está enfocado en el desarrollo de proyectos de investigación científica básica y/o aplicada en las áreas de fisiología, bioquímica, biotecnología, microbiología, nutrición e ingeniería de alimentos. En este lugar se desarrolló el presente trabajo de investigación, en la modalidad de pasantía de investigación, dirigida por la Doctora Rosa Isela Ortiz Basurto, profesora investigadora SNI-1.

La Doctora Rosa Isela Ortiz Basurto es Ingeniera Bioquímica en Alimentos, Maestra en Ciencias de la Biotecnología del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVer) y Doctora en Ingeniería de Procesos Alimentarios del Instituto Europeo de Membranas (ENSCM, UM, CNRS UMR5635). Su línea de investigación es en el Biocontrol, Inocuidad e Ingeniería de Alimentos, con área de interés científica en procesos de filtración tangencial para la separación, clarificación y/o purificación de compuestos bioactivos y/o de interés industrial, caracterización y aplicación de fracciones de Fructanos de Agave como aditivos en alimentos, secado por aspersión y microencapsulación de jugos y compuestos bioactivos (ITT, 2017).



Laboratorio Integral de Investigación en Alimentos (LIIA).

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam), o conocida en inglés como *jackfruit*, es un fruto cada vez más común en México, siendo los Estados de Nayarit, Veracruz y Jalisco, los mayores productores nacionales, con un reporte para 2016 de 17.053, 961 y 472 ton, respectivamente¹. A pesar de su alta producción, es un fruto desconocido en algunas partes del país, y en ocasiones desperdiciado a causa de su baja comercialización. Según Agencia Informativa Conacyt², únicamente entre un 30-40% de la producción es aprovechada, lo restante es utilizado como alimento para animales o desechado a cielo abierto, generando contaminación al ambiente. Además de esto, la jaca es un fruto con un alto contenido nutricional, razón por la que resulta de interés el procesamiento de ésta.

La jaca es un fruto originario del sudeste de Asia, que fue introducido a las islas pacíficas por los europeos, y también está presente en Brasil, Australia, África, Suriname y Florida³. En la Figura 1 se presenta el árbol de jaca, que mide entre 8-25 m⁴ y su fruto es el de mayor tamaño conocido, con un peso superior a los 5 kg.

¹ SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: Jaca (Jackfruit) para el 2016. [En línea]. (Recuperado en 31 de octubre de 2017). Disponible en http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/

² AGENCIA INFORMATIVA CONACYT. Investigan propiedades nutricionales de la jaca en Nayarit. (C. Gómez, Productor) [En línea]. 14 de Julio de 2016. (Recuperado en 28 de junio de 2017). Disponible en <http://conacytprensa.mx/index.php/ciencia/mundo-vivo/8629-investigan-propiedades-nutricionales-de-la-jaca-en-nayarit>

³ ELEVITCH, C. & MANNER, H. *Artocarpus heterophyllus* (jackfruit). Traditional Tree. [En línea]. Abril de 2006. (Recuperado en 27 de noviembre de 2016), p. 2. Disponible en <https://retirenicaragua.files.wordpress.com/2012/05/a-heterophyllus-jackfruit1.pdf>

⁴ *Ibíd.*, p. 2.

Figura 1. Árbol de jaca.



Fuente: National Fruit of Bangladesh, 2011.

Es una planta cuyo fruto se puede consumir verde, maduro, e incluso sus semillas, hojas y flores son comestibles; y tiene gran valor nutricional por su contenido de calorías, minerales como hierro, potasio, calcio y otros nutrientes como vitamina A, C y D⁵. Los componentes de la planta como la corteza, hojas, fruto y raíces tienen propiedades medicinales⁶. De estudios realizados sobre la caracterización fisicoquímica de la jaca, Simba⁷ indica que: “la composición de esta fruta en su mayoría es agua con 70 a 95%, pero su aporte nutricional posee gran cantidad de vitaminas, minerales, enzimas y carbohidratos”.

El alto contenido de humedad es la principal causa de alteración de los alimentos, y según Wagner⁸, los jugos, zumos de frutas, vegetales y compuestos farmacológicos, fácilmente pierden su actividad biológica por

⁵ OCHSE, J.J., *et al.* Cultivo y mejoramiento de plantas tropicales y subtropicales. México: Limusa, 1982. 1536p. ISBN: 9681803116.

⁶ ELEVITCH. Op. Cit., p. 10.

⁷ SIMBA CASA, María del Rocío. Caracterización fisicoquímica del Jackfruit y propuestas de dos alternativas para el procesamiento. Tesis de grado (Ingeniería de Alimentos). Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, 2014, 99p.

⁸ WAGNER, H. Natural products chemistry and phytomedicine research in the new millennium: new developments and challenges. *Archive for Organic Chemistry*, 2004, vol. 7, p. 277-284.

oxidación, cuando se exponen al ambiente. Esta situación sugiere la necesidad de aplicar técnicas que impidan la degradación por oxidación y ralenticen el efecto del envejecimiento de las células de los alimentos y el desarrollo microbiológico, además de dar un valor agregado al nuevo producto alimenticio, mejorando sus propiedades fisicoquímicas y organolépticas. Dentro de las técnicas que se pueden utilizar para su conservación, se encuentra la microencapsulación. Para Rubio⁹, en este proceso las partículas de interés, como por ejemplo compuestos bioactivos, son atrapados por un recubrimiento o matriz de biopolímeros del material encapsulante. Este material se usa principalmente para proteger la sustancia de la humedad atmosférica, la luz ultravioleta y las reacciones químicas de oxidación. Ghosh¹⁰ le atribuye una funcionalidad adicional de autorregulador, antibacteriano, anticorrosivo y autolimpiante. La industria alimenticia ha utilizado carbohidratos, ésteres, gomas, lípidos, proteínas y algunos compuestos inorgánicos como materiales encapsulantes, que se adicionan en muy bajas concentraciones para no dañar las propiedades nutricionales del alimento.

Esquivel *et al.*¹¹ enuncian las técnicas para la microencapsulación, entre las que se encuentran el secado por aspersión, aspersión con enfriamiento, liofilización, separación de fase (coacervación), lecho fluidizado, gelación iónica, extracción-evaporación de solvente, polimerización interfacial, expansión de fluidos supercrítico, entre otras. Para la elección de la técnica a usar se debe tener en cuenta el tamaño de las partículas que se requiere producir, las propiedades del material encapsulante, la biocompatibilidad y la biodegradación que necesite la partícula a encapsular. Sin embargo, en la

⁹ RUBIO IBARRA, Magali Elizabeth. Evaluación de fructanos de agave tequilana weber variedad azul como material encapsulante del jugo de pitanga (*Eugenia uniflora* L.), mediante secado por aspersión. Tesis de Maestría en Ciencias de Alimentos. Tepic: Instituto Tecnológico de Tepic, México, 2015, 178p.

¹⁰ GHOSH, Swapan Kumar. Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006. p. 2-25. ISBN: 3-527-31296-X

¹¹ ESQUIVEL GONZÁLEZ, B.E.; OCHOA MARTÍNEZ, L.A. & RUTIAGA QUIÑONES, O.M. Microencapsulación mediante secado por aspersión de compuestos bioactivos. Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 2015, vol.16 no.2, p. 180-192.

industria alimenticia utilizan el secado por aspersión debido a su relativo bajo costo y disponibilidad de equipos¹². Gouin¹³ y Lakkis¹⁴ afirman que el secado por aspersión es un método comúnmente utilizado tanto por costos como por aplicaciones, y naturalmente se presta a una operación continua, siendo un proceso flexible que proporciona buena estabilidad del producto final en comparación con las otras técnicas para la microencapsulación¹⁵⁻¹⁶⁻¹⁷, y apropiado para materiales sensibles al calor. En esta técnica, el líquido es atomizado en una corriente de gas caliente a una velocidad controlada bajo condiciones específicas y con temperaturas hasta de 180°C¹⁸ en un tiempo de exposición muy corto para transformarlo en un producto sólido (polvos).

Se han elaborado gran número de productos mediante el secado por aspersión, como aceites de pescado fijados sobre una matriz sólida de carbohidratos (almidón modificado, maltodextrina o ciclodextrina), pigmentos naturales, aditivos¹⁹, concentrado de células probióticas y leche en polvo²⁰. Por

¹² GHARSALLAOUI, Adem, *et al.* Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. [Base de datos en línea]. Noviembre de 2007. Food Research International, 40(9), 1107-1121. (Recuperado en 28 de Agosto de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996907001238?via%3Dihub>

¹³ GOUIN, Sébastien. Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. Trends in Food Science & Technology, 2004, vol.15 no.8, p. 330-347.

¹⁴ LAKKIS, Jamileh M. Encapsulation and Controlled Release Technologies in Food Systems. Blackwell Publishing, 1ra edición, 2007, p. 3-9. ISBN: 9780813828558.

¹⁵ ARELLANO CORRAL, Cristián Andrés. Extracción de luteína a partir de flores de tagete (*Tagete erecta*) y estabilización por Microencapsulación. Tesis de grado (Ingeniería en Alimentos). Santiago: Universidad de Chile. Depto. de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, 2011, 67p.

¹⁶ GARCÍA GUTIÉRREZ, G., *et al.* Microencapsulación del jugo de cebada verde mediante secado por aspersión. Ciencia y Tecnología Alimentaria, 2004, vol.4 no.4, p. 262-266.

¹⁷ GIBBS, Bernard F., *et al.* Encapsulation in the food industry: A review. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 1999, vol.50, p. 213-224.

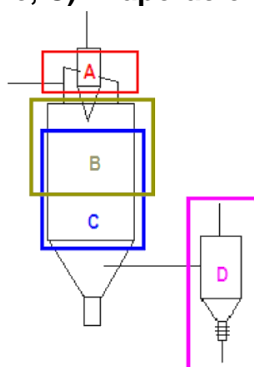
¹⁸ WONG, Chen Wai & TAN, Hong Hock. Production of spray-dried honey jafruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder from enzymatic liquefied puree. Journal of Food Science and Technology, 2017, vol.54 no.2, p. 564-571.

¹⁹ FUCHS, M., *et al.* Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration. Journal of Food Engineering, 2006, vol.75 no.1, p. 27-35.

otro lado, García *et al.*²¹ manifiesta el uso de esta técnica en la deshidratación de diferentes jugos de frutas como cebada verde, maracuyá con 12% p/p de maltodextrina y jugos vegetales (tomate, pepino, zanahoria, lechuga, betabel, espinaca apio y perejil) con una humedad final de 1,4%. Como características en los estudios anteriores, los autores evalúan las condiciones de formulación y de proceso en aspectos como: el control en las temperaturas de entrada y salida del aire de secado, el flujo de alimentación del producto a secar, el tiempo de residencia y el acondicionamiento de la materia prima, los cuales son fundamentales durante el secado por aspersión.

En esta operación de secado se involucra una combinación de varias etapas: la preparación de la dispersión o emulsión, homogeneización y pulverización²²; esta última etapa tiene lugar dentro del equipo. En la Figura 2 se observa el diagrama básico del equipo de secado por aspersión con la ubicación de la última etapa del proceso que se divide en: atomización (zona A), difusión del líquido en el aire (zona B), evaporación (zona C) y separación del producto (zona D).

Figura 2. Diagrama básico de un secador por aspersión. A) Atomización, B) Difusión del líquido en el aire, C) Evaporación y D) Separación del producto.



Fuente: Rubio, 2015.

²⁰ HEIDEBACH, Thomas; FÖRST, Petra & KULOZIK, Ulrich. Microencapsulation of probiotic cells by means of rennet-gelation of milk proteins. *Food Hydrocolloids*, 2009, vol.23 no.7, p. 1670-1677.

²¹ GARCÍA. Op. Cit.

²² PARIZE, Alexandre Luis, *et al.* Microencapsulation of the natural urucum pigment with chitosan by spray drying in different solvents. *African Journal of Biotechnology*, 2008, vol.7 no.17, p. 3107-3114.

Un secador por aspersión es un sistema en el que intervienen diversos fenómenos de transferencia muy complejos, por lo tanto, es factible aplicar herramientas computacionales para su modelamiento, como ejemplo, está el *software* ANSYS®. Éste es un *software* desarrollado por la compañía con el mismo nombre, que permite la simulación de diferentes fenómenos físicos en un volumen ocupado por fluidos en régimen laminar o turbulento; en este caso el transporte de masa, energía y momento en este volumen de control. Según Díaz²³, la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica ampliamente utilizada para predecir el flujo, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas y fenómenos afines mediante la solución numérica del conjunto de ecuaciones que gobiernan un modelo físico. En CFD se puede simular prácticamente cualquier sistema, el límite es el esfuerzo computacional; ésta es una variable importante a tener en cuenta, ya que debe existir un equilibrio entre la complejidad y exactitud de los modelos utilizados y el tiempo que tarde el *software* en llegar a convergencia. Para Morales *et al.*²⁴, CFD es una herramienta válida para el análisis del proceso de secado por aspersión, debido a que éste es de carácter empírico y los métodos tradicionales utilizados para su estudio demandan un alto número de experimentos, lo que conlleva a un gasto importante de tiempo y recursos. En su estudio, Morales *et al.*²⁵ simularon un secador por aspersión con el fin de comparar cuál de dos posibles configuraciones (flujo paralelo y contracorriente) entregaba mejores resultados, llegando a la conclusión de que si bien la eficiencia es alta para ambas configuraciones, en el flujo en contracorriente hay mejor dispersión espacial de las gotas dentro de la cámara de secado. Sin embargo, el tiempo de residencia es mayor (1,06 s para el flujo paralelo y 2,62 s para el flujo en contracorriente), lo que incrementa la temperatura del

²³ DÍAZ MATEUS, Fabián Andrey. Introducción a la dinámica de fluidos computacional. [Presentación pdf] Bucaramanga, Noviembre de 2016. 51p.

²⁴ MORALES CASTILLO, Javier, *et al.* Análisis comparativo del flujo y modelado de la transferencia de calor para una mezcla de gas y partículas en secadores ciclónicos por aspersión. Congreso de Instrumentación SOMI. (29: OCTUBRE, 2014: Puerto Vallarta, México). Memorias. Universidad Nacional Autónoma de México, 2014, 8p.

²⁵ *Ibíd.*

producto parcialmente seco. Como consecuencia, se alteran sus características sensoriales y se degrada térmicamente. Por lo tanto, se prefiere trabajar con el flujo paralelo, donde el producto alimenticio se trata con mayor cuidado debido a la rápida evaporación.

Para Gharsallaoui *et al.*²⁶ es fundamental la elección del material encapsulante en el secado por aspersión, dado que la eficiencia de la microencapsulación y la estabilidad del polvo dependen en gran medida de él. Como características generales, debe ser soluble en agua, tener baja viscosidad y poseer buenas propiedades emulsificantes y de formación de película. Los autores mencionan diferentes compuestos poliméricos usados como encapsulantes, como por ejemplo: la maltodextrina, la goma arábiga, el almidón, proteínas de suero, etc. En el caso del presente trabajo se optó por los fructanos de agave AGP (FA) y la maltodextrina (MD).

Los fructanos son el principal producto fotosintético del agave²⁷, una planta abundante en México, que es usada en la industria como materia prima para la producción del tequila²⁸. Estos son polímeros compuestos por cadenas de fructosa y una molécula de glucosa terminal, como se observa en la Figura 3; son una reserva de carbohidratos y se pueden clasificar según su grado de polimerización, como bajo, medio y alto. Cada variante tiene diferentes propiedades fisicoquímicas, tipos de enlace y ramificaciones, que lo han propuesto como material adecuado para la encapsulación de alimentos²⁹. Debido a la tendencia actual de reducir el consumo de calorías y aumentar la

²⁶ GHARSALLAOUI. Op. Cit.

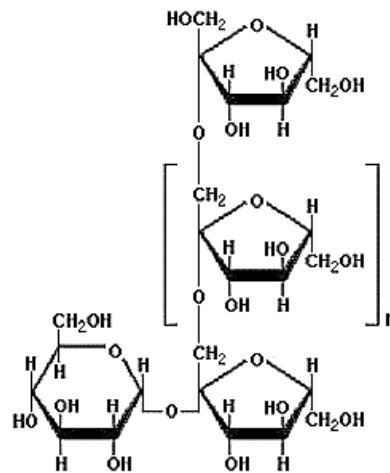
²⁷ URÍAS SILVAS, Judith Esmeralda. Efecto prebiótico de los fructanos de Agaves y Dasyliirion y su implicación en el metabolismo de glucosa y lípidos en ratones. Tesis de Doctorado. Guanajuato: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. 2008. 132p.

²⁸ ARRIZON, Javier, et al. Purification and substrate specificities of a fructanase from *Kluyveromyces marxianus* isolated from the fermentation process of Mezcal. [Base de datos en línea]. Febrero de 2011. Bioresource Technology, 102(3), 3298-3303. (Recuperado en 17 de junio de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241001727X>

²⁹ RUBIO. Op. Cit.

ingesta de compuestos bioactivos, los fructanos están tomando protagonismo gracias a su bajo aporte de calorías, y al ser fibra soluble tiene un efecto prebiótico natural, además han demostrado efectos positivos en la salud, como una mayor absorción de minerales, inhibición del cáncer de colon y disminución del nivel de colesterol y triglicéridos en sangre³⁰.

Figura 3. Estructura química de los fructanos.



Fuente: Ulloa *et al.*, 2010.

En cuanto a las maltodextrinas, son polímeros de glucosa formados a partir de la hidrólisis del almidón. Son uno de los encapsulantes más utilizados en la industria alimenticia debido a su buena relación costo/efectividad, no afecta las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del alimento, y en soluciones con alta proporción de sólidos (como en el caso de jugos de frutas) presenta una baja viscosidad^{31 32}. Se clasifican según el grado de equivalentes de dextrosa (ED), utilizándose comúnmente las de ED<20 con el propósito de formar una película encapsulante.³³

³⁰ RUBIO. Op. Cit.

³¹ NAVARRETE SOLIS, Adriana, *et al.* Rheological stability of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) pulp and hydrolyzed juice spray-dried. En: "31st EFFoST International Conference," Université Grenoble Alpes, Instituto Tecnológico de Tepic. Sitges, Barcelona, España [P1.142]. p.40.

³² PARRA HUERTAS, Ricardo Adolfo. Revisión: Microencapsulación de Alimentos. En Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, 2011, vol.63 no.3, p. 5669-5684.

Rubio³⁴ evaluó las propiedades de los fructanos de agave de alto grado de polimerización (AGP), medio grado de polimerización (MGP) y maltodextrinas (MD) para encapsular jugo de pitanga (*Eugenia uniflora* L.) mediante secado por aspersión, encontrando características similares para los fructanos AGP y la maltodextrina. También Vargas *et al.*³⁵ reportaron en un estudio realizado a encapsulados de carotenoides de cempasúchil, que los fructanos de agave conservan aproximadamente un 75% de los carotenoides encapsulados, presentando una protección similar a la observada con la maltodextrina (77%). En estudios recientes, Wong & Tan³⁶ obtuvieron el 66,90% de rendimiento en el secado por aspersión del jugo de jaca con MD al 30% p/p y previa licuefacción enzimática; estudio similar realizó Navarrete *et al.*³⁷ con esta fruta para evaluar la estabilidad reológica del jugo con MD mediante secado por aspersión.

³³ GUEVARA BRETÓN, N. A. & JIMÉNEZ MUNGUÍA, M. T. Materiales utilizados en la encapsulación. Temas selectos de ingeniería de alimentos, 2008, vol.2, p. 22-27.

³⁴ RUBIO. Op. Cit.

³⁵ VARGAS SOLANO, Silvia Viridiana, *et al.* Cinética de degradación de encapsulados de carotenoides de Cempaxuchil (*Tagetes erecta*) con fructanos de agave. VII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. León, Guanajuato: Centro de Investigaciones en Óptica, 2010.

³⁶ WONG. Op. Cit.

³⁷ NAVARRETE. Op. Cit.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar las condiciones de operación en el secado por aspersión de un producto a base de jaca (*Artocarpus heterophyllus* L.) encapsulado con fructanos de agave AGP y maltodextrina.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el secador por aspersión a través de simulación en el *software* ANSYS® 18.1.
- Analizar distintas formulaciones de la solución a secar a partir de jaca, fructanos de agave AGP y maltodextrina.
- Evaluar experimentalmente las condiciones de operación en el secador por aspersión que permitan obtener el producto pulverizado.

2. METODOLOGÍA.

En la Figura 4 se presenta el diagrama metodológico propuesto en donde se muestran las fases de este trabajo.

2.1. ETAPA 1: EVALUACIÓN DEL SECADOR POR ASPERSIÓN A TRAVÉS DE SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE ANSYS® 18.1.

El primer paso para esta etapa fue construir la geometría del secador (presentado en el Anexo A) en el complemento *Geometry* de ANSYS 18.1. Posteriormente, se realizó el mallado de esta geometría, es decir, se dividió en volúmenes finitos con el complemento *Mesh* del software. Por último, en el programa ANSYS Fluent 18.1 se evaluaron diferentes combinaciones de condiciones de operación para el secador mediante un diseño experimental factorial 3^2 , con el fin de construir una superficie de respuesta de la que se pueda deducir el tratamiento más conveniente. El primer factor seleccionado fue el flujo de alimentación [kg/h] (f) y el segundo fue la presión de aire para el atomizador (P) (el cual es rotatorio y funciona con este suministro, por lo tanto su medida en MPa debió ser convertida a rpm para poder ser utilizada en el simulador), cuyos niveles elegidos se muestran en la Tabla 1. Para optar por dichos valores, se tomaron las condiciones utilizadas por Navarrete *et al.*³⁸ como punto intermedio (f=0,6110 kg/h y P=0,2 MPa), y se escogió un límite superior e inferior dentro del rango de parámetros de operación recomendado en el manual del equipo. La temperatura de entrada del aire se fijó a 110°C, puesto que a mayor temperatura hay riesgo de caramelización del jugo³⁹. También se realizaron las comprobaciones necesarias acerca de la calidad de la malla y la simulación, resultando satisfactorias (ver Anexo B para más detalles).

³⁸ NAVARRETE. Op. Cit.

³⁹ *Ibíd.*

Figura 4. Diagrama metodológico.

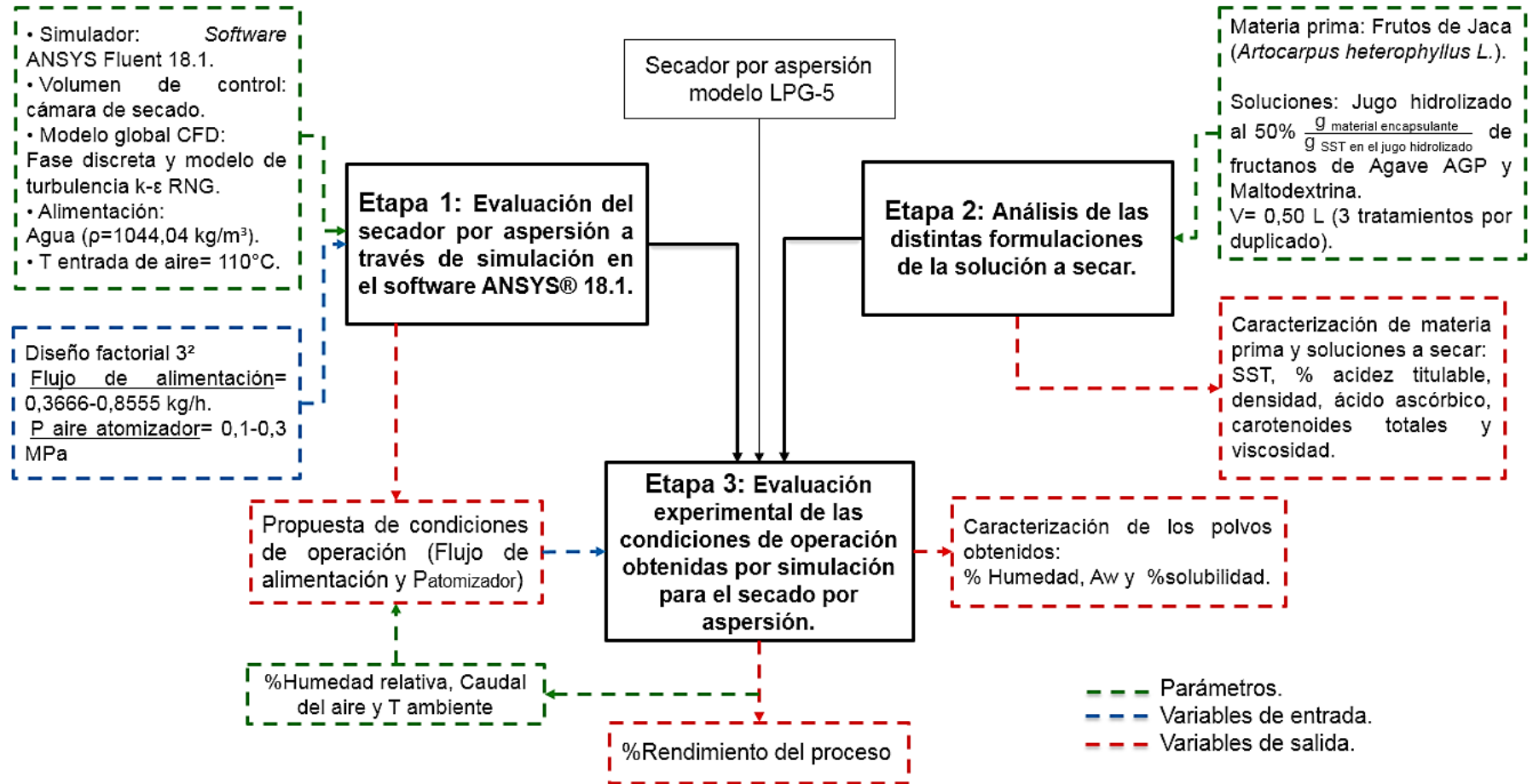


Tabla 1. Condiciones de operación del secador para el diseño experimental.

Flujo de alimentación [kg/h] (f)	Presión de aire del atomizador [MPa] (P)
0,3666	0,1
	0,2
	0,3
0,6110	0,1
	0,2
	0,3
0,8555	0,1
	0,2
	0,3

Como modelo de turbulencia se eligió el k- ϵ RNG, de acuerdo a lo reportado por Gutiérrez⁴⁰, en donde analiza el desempeño de los diferentes modelos aplicados a un secador por aspersión. Además, se seleccionó únicamente agua como alimentación usando el modelo de fase discreta, considerando que es el componente principal de los jugos de frutas. Se modificó su densidad por la del jugo de jaca, pues de esta depende el patrón de flujo que siguen las gotas del líquido (observación evidenciada mientras se llevaba a cabo la simulación). Otras consideraciones que se tomaron en cuenta son; que el atomizador es estático, aunque la velocidad de salida de las gotas corresponde a la que tendrían si estuviera rotando, las gotas son esféricas y tienen un único diámetro, la temperatura de entrada del aire siempre es de 110°C, a diferencia del equipo de secado en donde fluctúa entre 105 y 115°C debido a que el sistema de control no tiene una respuesta suficientemente rápida, la temperatura es homogénea en cualquier punto de las paredes del secador y se asumió un estado estable, pues éste permite el seguimiento de las gotas de la fase discreta en todo el volumen de control⁴¹.

Para calcular el rendimiento, se eligió una configuración en el programa que permite eliminar de los cálculos las gotas que alcancen la pared, simulando de

⁴⁰ GUTIÉRREZ SUÁREZ, Jairo Andrés. Modelación CFD y validación experimental del proceso de vaporación de agua en un secador por aspersión. Tesis de Maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica, 2015, 141p.

⁴¹ FLETCHER, D.F., *et al.* What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current CFD models perform? [Base de datos en línea]. Noviembre de 2006. Applied Mathematical Modelling, 30(11), 1281-1292. (Recuperado en 18 de julio de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X06000266?via%3Dihub>

esta manera la masa que se perdería por adhesión a las paredes. De esta forma, al comparar la masa de agua alimentada con la masa de agua (evaporada) a la salida (sin tener en cuenta la humedad del aire de secado) se puede encontrar el rendimiento. Cabe destacar que el volumen de control que se tomó en cuenta para la simulación es el de la cámara de secado, por lo que el rendimiento hallado es solamente hasta este punto, sin tener en cuenta las pérdidas posteriores de masa que ocurrirían en los codos, tubería y en el ciclón.

Fue necesario suministrar algunos datos al programa como lo son el diámetro de las gotas (105-322 μm), sus vectores de posición (x y z entre 0,045 y -0,045 m, $y=0,60803$ m) y velocidad iniciales (x y z entre -21,21 y 21,21 m/s, $y=0$ m/s), el caudal de aire (0,08 m^3/s), su humedad relativa (32%), su Reynolds (6071,92) y el diámetro hidráulico (0,122 m), por lo que para obtenerlos (detallado en el Anexo C), se decidió realizar pruebas de secado iniciales a $P=0,2$ MPa y $f=0,6110$ kg/h según el procedimiento utilizado por Navarrete *et al.*⁴²; procedimiento que se presenta de forma general en la siguiente sección. Adicionalmente, el secado a estas condiciones sirvió como referencia para comparar con el posterior secado (experimental) a las condiciones elegidas a partir de los resultados del simulador ($P=0,3$ MPa y $f=0,6110$ kg/h).

2.2. ETAPA 2: ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS FORMULACIONES DE LA SOLUCIÓN A SECAR.

Cada experimento se realizó con un lote diferente de jugo de jaca (Lote A con $P=0,2$ MPa y $f=0,6110$ kg/h; lote B a $P=0,3$ MPa y $f=0,6110$ kg/h), obtenidos según la siguiente metodología utilizada por Navarrete *et al.*⁴³

- Lavado, corte y desbullado: 11 frutas de jaca en madurez de consumo fueron lavadas con hipoclorito de sodio a una concentración de 200 ppm en

⁴² NAVARRETE. Op. Cit.

⁴³ *Ibíd.*

agua durante 5 min a temperatura ambiente, posteriormente se cortaron y se retiraron manualmente la cáscara y los periantos, logrando de esta forma la extracción de los bulbos que fueron almacenados bajo congelación.

- **Despulpado:** Los bulbos fueron introducidos en una despulpadora CONNECTOR 16/20/26A con malla de 0,80 mm de diámetro de poro; obteniéndose así la pulpa y el material fibroso del fruto, que inmediatamente fueron congelados. De la masa inicial de las jacas (84,1 kg), el 24,1% se recuperó como pulpa.

- **Hidrólisis enzimática:** La pulpa se introdujo en una incubadora con recirculación durante 3 h a una temperatura de 37°C, y se adicionó una mezcla de enzimas comerciales (Pectinex ultra pulp® y Celluzyme®) al 1% de concentración en proporción 1:1, con el propósito de reducir la viscosidad de la jaca en aproximadamente un 95% y de esta forma favorecer el flujo a través del atomizador. El hidrolizado obtenido se almacenó bajo congelación.

- **Preparación de las soluciones:** Se decidió realizar 3 tratamientos de soluciones de jugo de jaca variando la proporción de material encapsulante, utilizando FA y MD (ED 10), pero a contenido total constante de 50% p/p ($\text{g}_{\text{material encapsulante}} \times 100\% / \text{g}_{\text{sólidos solubles totales (SST) en el jugo hidrolizado}}$), según lo reportado por Navarrete *et al.*⁴⁴ En la Tabla 2 se presentan los contenidos de material encapsulante para cada solución a preparar.

Tabla 2. Contenido de material encapsulante para las soluciones a secar.

Soluciones	Contenido FA*	Contenido MD*
1 (J-FA)	50%	0%
2 (J-FA/MD)	25%	25%
3 (J-MD)	0%	50%

J-FA: Jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP, J-FA/MD: jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP y maltodextrina, J-MD: jugo hidrolizado con maltodextrina. * $(\text{g}_{\text{material encapsulante}} \times 100\% / \text{g}_{\text{SST en el jugo hidrolizado}})$.

⁴⁴ NAVARRETE. Op. Cit.

Es importante resaltar que esta composición se está dando con respecto a la masa de sólidos solubles totales del jugo hidrolizado, lo que equivale aproximadamente al 12% ($\frac{g_{\text{material encapsulante}}}{g_{\text{totales}}}$). Se prepararon por duplicado las soluciones mencionadas anteriormente con volúmenes de aproximadamente 0,5 L de jugo de jaca, y además de agregar el material estabilizante, se adicionaron 0,3 L agua/L jugo de jaca según el procedimiento realizado por Navarrete *et al.*⁴⁵; esto para compensar el aumento en la viscosidad del jugo que genera el adicionar el material encapsulante.

2.3. ETAPA 3: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN OBTENIDAS POR SIMULACIÓN PARA EL SECADO POR ASPERSIÓN.

Cada solución preparada se procesó en un secador por aspersion semi-industrial CIMA Industries Inc. modelo LPG-5 con atomizador rotatorio que funciona con un suministro de aire a presión de un compresor, a una temperatura de 110°C, inicialmente a las condiciones propuestas por Navarrete *et al.*⁴⁶ ($P=0,2$ MPa y $f=0,6110$ kg/h); y posteriormente a las condiciones que permitieron un mayor rendimiento según la simulación realizada ($P=0,3$ MPa y $f=0,6110$ kg/h), como se detallará más adelante en los resultados.

Al finalizar el proceso, los polvos fueron almacenados en bolsas metalizadas resellables trilaminadas y guardados en un desecador mientras se tomaron muestras para análisis fisicoquímico, y posteriormente empacados al vacío.

2.4. MATERIALES, MÉTODOS EXPERIMENTALES Y DE CUANTIFICACIÓN.

2.4.1. Materia prima e insumos. Jacas procedentes del Llano, Nayarit, México; maltodextrina (MD) ED 10 y fructanos de agave AGP (FA).

⁴⁵ NAVARRETE. Op. Cit.

⁴⁶ *Ibíd.*

2.4.2. Métodos experimentales y de cuantificación. Se tomaron muestras de jugo hidrolizado, solución con material encapsulante y polvo para sus respectivos análisis fisicoquímicos. Además, se tomaron muestras de todos los polvos para reconstituir agregando agua destilada hasta alcanzar aproximadamente los mismos °Brix que tenían las soluciones antes de secar. Se realizaron los siguientes análisis con el objetivo de confirmar si se presentaron cambios en las propiedades y el contenido nutricional de los productos luego de las respectivas etapas.

- Acidez titulable: Titulación con NaOH y fenolftaleína. (AOAC 942.15, 1990).
- Actividad acuosa: Medición directa en un equipo Aqualab Emin Tech calibrado con NaCl a temperatura ambiente.
- Carotenoides totales: Método colorimétrico reportado por Chauhan *et al.*⁴⁷ empleando un espectrofotómetro fluorescente Varian Cary Eclipse.
- Densidad: Método directo (AOAC 962.37, 1995).
- Humedad: Método directo (AOAC 925.10, 1990), la muestra se secó en una estufa marca Memmert modelo 40050-IP20.
- Sólidos solubles totales: Medición de índice de refracción con un refractómetro HANNA Instruments HI 96804 (AOAC 932.12, 1990/ISO 2173, 1978).
- Solubilidad: Método utilizado por Eastman & Moore⁴⁸.
- Vitamina C: Método de ácido metafosfórico (AOAC 967.21, 1990).
- Viscosidad: Medición en un reómetro TA instruments DISCOVERY HR-1 con Software Trios v4.0.1, usando geometría de plato y cono, según el protocolo de Navarrete *et al.*⁴⁹

⁴⁷ CHAUHAN, A., *et al.* Physicochemical changes during microfiltration (MF) of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lamk) juice. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2010, vol.9 no.4, p. 720-737.

⁴⁸ EASTMAN, James E. & MOORE, Carl O. Cold-water-soluble granular starch for gelled food compositions. 1984 [Patente] no. US 4465702 en Google Patents.

⁴⁹ NAVARRETE. Op. Cit.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

3.1. EVALUACIÓN DEL SECADOR POR ASPERSIÓN A TRAVÉS DE SIMULACIÓN EN EL SOFTWARE ANSYS® 18.1.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de las simulaciones según el diseño experimental propuesto en la etapa 1.

Tabla 3. Rendimientos y tamaño de gota obtenidos de la simulación del secado por aspersión utilizando agua como alimentación y 110°C de temperatura aire de entrada.

Flujo de alimentación [kg/h] (f)	Presión de aire del atomizador [MPa] (P)	% Rendimiento	Diámetro de gota calculado [μm]
0,3666	0,1	26,73	263,0
	0,2	100,00	148,0
	0,3	100,00	105,7
0,6110	0,1	6,46	297,3
	0,2	81,35	167,3
	0,3	100,00	119,5
0,8555	0,1	4,38	322,3
	0,2	56,82	181,3
	0,3	100,00	129,5

Los diámetros de gota fueron un dato requerido por el programa, y fueron calculados según la Ecuación 1⁵⁰:

$$d_{32} = \frac{1,4 \cdot 10^4 f^{0,24}}{(N \cdot D)^{0,83} (n \cdot d)^{0,12}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

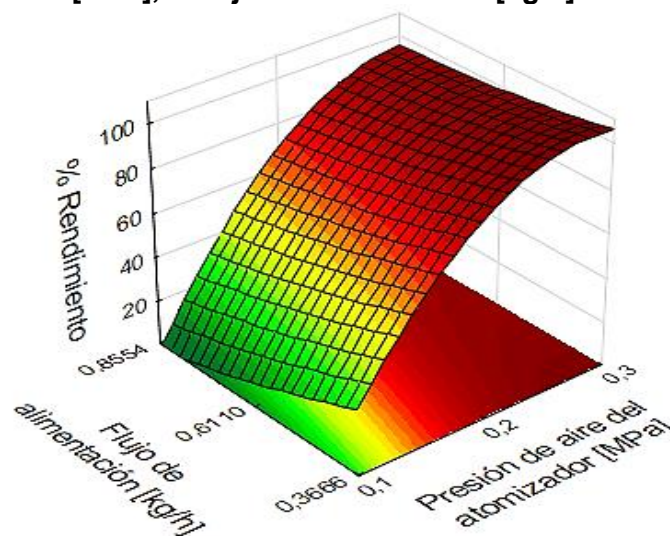
En donde d_{32} es el diámetro medio de Sauter [μm], que representa un diámetro promedio de la distribución de tamaños; f es el flujo de alimentación [kg/h], N es la velocidad de giro del atomizador [rpm], D es el diámetro del atomizador [m], n es el número de orificios del atomizador y d es el diámetro de estos orificios [m]. Debido a que se trata de un secador rotatorio que funciona con aire a presión para girar el atomizador, la variable que se controla es la presión de

⁵⁰ HUANG, Li Xin & MUJUMDAR, Arun S. The effect of rotary disk atomizer rpm on particle size distribution in a semi-industrial spray dryer. Drying Technology: An International Journal, 2008, vol.26 no.11, p. 1319-1325.

este aire, sin embargo, este dato debe ser convertido a velocidad de giro (en rpm) para ser aplicado en el simulador. Este procedimiento de conversión se detalla en el Anexo C.

Los datos de la Tabla 3 fueron ingresados al *software* STATISTICA™ 10.0 para analizar la interacción entre los factores que afectan el rendimiento del secado, mediante un modelo de superficie de respuesta y la ecuación del modelo de predicción, presentados en la Figura 5.

Figura 5. Superficie de respuesta del modelo del %Rendimiento. P: presión de aire del atomizador [MPa], f: flujo de alimentación [kg/h]



$$\%R = -33,902 + 1222,8 * P - 2312,9 * P^2 - 132,38 * f + 34,338 * f^2 + 228,62 * P * f$$

$$R^2 = 0,97143 \quad R^2 \text{ ajustado} = 0,92381$$

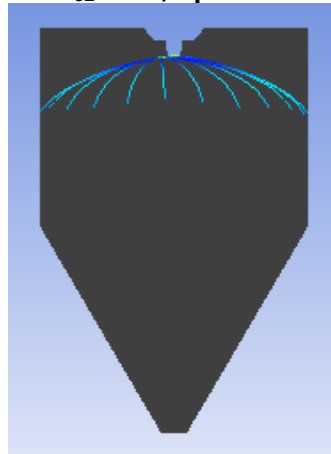
Según lo observado en la Figura 5, dentro del rango estudiado, la presión de aire del atomizador (que se traduce en velocidad de giro del mismo) influyó significativamente ($p < 0,05$) sobre el rendimiento del proceso, y el flujo de alimentación fue significativo a $P = 0,1$ y $0,2$ MPa, mientras que a $P = 0,3$ MPa, no presentó una diferencia sobre el rendimiento.

En la Tabla 3, se puede identificar una relación inversa entre los diámetros de gota calculados y el rendimiento. De acuerdo a la Ecuación 1 y Tabla 3, a mayor velocidad de atomización y menor flujo de alimentación, se disminuye el

tamaño de las gotas⁵¹, que además conlleva a un mayor rendimiento. Esto sucede porque las gotas suficientemente grandes ($d_{32} \geq 263 \mu\text{m}$ en este caso) no son fácilmente arrastradas por el aire, y siguen un patrón de caída parabólico alcanzando las paredes, lo que significa un incremento en las pérdidas de material. Un ejemplo de esto se aprecia en la Figura 6. Mientras tanto, las gotas suficientemente pequeñas ($d_{32} \leq 148 \mu\text{m}$ en este caso) son fácilmente arrastradas por el aire, por lo que siguen su misma trayectoria, esto se puede observar en la Figura 7A.

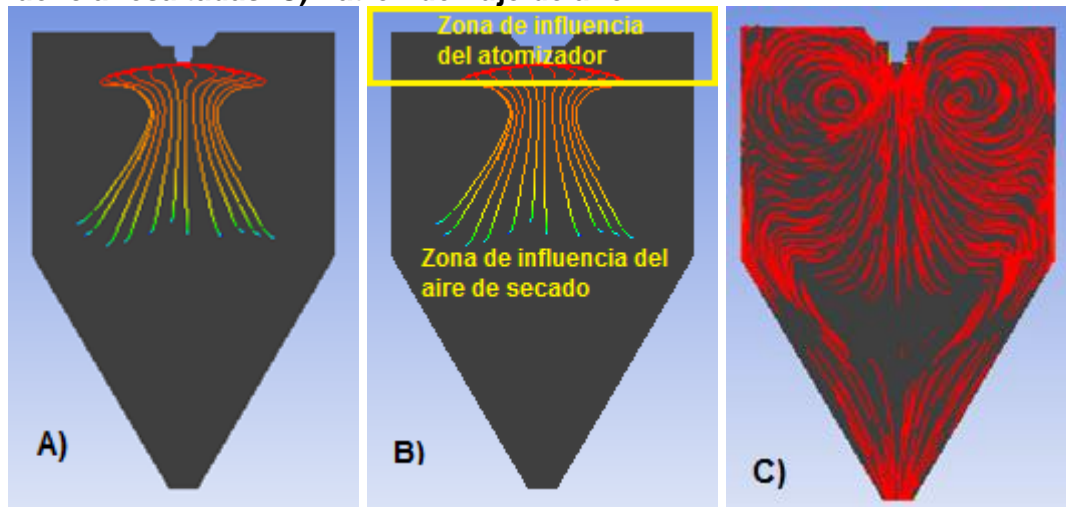
Cabe señalar que cuando las líneas de flujo de las gotas terminan, significa que se evaporó totalmente el agua, sin alcanzar a tocar las paredes del equipo. De estas figuras, se percibe que las gotas de agua tienen inicialmente la trayectoria parabólica característica debida al impulso dado por el atomizador, pero en las zonas en donde se presentan los remolinos (Figura 7C), el aire cambia por completo la trayectoria de las gotas y las arrastra consigo, y por ende, no llegan a las paredes según la Figura 7A.

Figura 6. Patrón de flujo de líquido correspondiente a las condiciones de $f=0,6110 \text{ kg/h}$ y $P=0,1 \text{ MPa}$, y un $d_{32}=297,3 \mu\text{m}$.



⁵¹ GUTIÉRREZ. Op. Cit.

Figura 7. Patrones de flujo correspondiente a las condiciones de $f=0,6110$ kg/h y $P=0,3$ MPa, y un $d_{32}=119,5$ μm . A) Patrón de flujo de las gotas. B) Zonas de influencia resaltadas. C) Patrón de flujo de aire.



Lo anterior está de acuerdo con lo expuesto por Ángeles⁵², en donde se refiere a 2 zonas de influencia dentro del secador como se detalla en la Figura 7B. En la zona de influencia del atomizador, la gota sale a altas velocidades según el típico patrón de caída parabólico, para luego desacelerar, dando lugar a la zona de influencia del aire de secado, donde la velocidad relativa de la gota con el aire es 0 y ya no es afectada por el atomizador, a diferencia de lo que sucede en la Figura 6, las gotas grandes y pesadas no son arrastradas por el aire.

De la superficie de respuesta (Figura 5), se resalta la alta influencia de la velocidad del atomizador, principalmente en el límite superior de este factor, indicando que en esta zona roja se obtiene el máximo rendimiento de secado para cualquier valor de flujo de alimentación dentro de la región de operabilidad del equipo. Esta interacción de atomización-alimentación sobre el rendimiento, es explicada por el tamaño inicial de las gotas del jugo, donde a altas velocidades de atomización y bajos flujos de alimentación se evita el efecto de

⁵² ÁNGELES MARTÍNEZ, Liliana. Dimensionamiento y simulación de un secador por aspersión nivel piloto. Tesis de Maestría en Ciencias. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, 2009, 135p.

la deposición de la solución en las paredes de la cámara de secado, gracias a que el flujo de aire caliente logra secar las gotas.

Se decidió escoger como condiciones ideales para el secado por aspersión, las correspondientes a $P=0,3$ MPa y $f=0,6110$ kg/h; teóricamente, se podría operar al máximo flujo de alimentación ($f=0,8555$ kg/h) según los resultados obtenidos en la Tabla 3 para lograr el mismo rendimiento reduciendo el tiempo de secado, pero se manejó a $f=0,6110$ kg/h, puesto que, en la práctica hay una distribución de tamaños de gota y aumentar f implica tener gotas con diámetros mayores al calculado con la Ecuación 1, esto sumado al hecho de que la temperatura del aire de secado es oscilatoria, bajando hasta los 105°C , puede causar un rendimiento menor.

3.2. ANÁLISIS DE LAS DISTINTAS FORMULACIONES DE LA SOLUCIÓN A SECAR.

El jugo hidrolizado junto con sus 3 formulaciones con material encapsulante utilizados para el secado por aspersión fue caracterizado a nivel fisicoquímico y los resultados por lote se presentan en la Tabla 4 (Lote A: condiciones utilizadas por Navarrete *et al.*⁵³ y Lote B: a condiciones obtenidas en la Etapa 1). Según estos datos, se esperaría que al agregar el material encapsulante al jugo, aumenten sus °Brix considerablemente, pero esto no sucede a causa de la adición de agua como solución para disminuir la viscosidad de la mezcla, como se expuso en la metodología.

⁵³ NAVARRETE. Op. Cit.

Tabla 4. Caracterizaciones fisicoquímicas del jugo hidrolizado de jaca y formulaciones.

		J	J-FA	J-FA/MD	J-MD
Lote A	SST (°Brix)	24,65±1,63	25,25±2,47	24,50±3,68	27,15±0,35
	% Ácido cítrico	0,608±0,009	0,456±0,036	0,512±0,130	0,446±0,160
	Densidad (g/mL)	1,090±0,006	1,043±0,021	1,049±0,013	1,040±0,021
	Ácido ascórbico (mg/100 g)	25,0±7,1	25,0±7,1	32,0±1,3	28,0±2,8
	Carotenoides totales (mg/100 g)	0,163±0,007	0,104±0,024	0,077±0,002	0,101±0,003
	Viscosidad (cP)	16,64±0,83	9,51±1,04	7,29±2,24	10,20±0,13
Lote B	SST (°Brix)	27,27±0,19	28,50±0,00	28,55±0,35	28,20±0,14
	% Ácido cítrico	0,646±0,009	0,544±0,045	0,560±0,023	0,522±0,014
	Densidad (g/mL)	1,075±0,006	1,082±0,020	1,091±0,005	1,095±0,002
	Ácido ascórbico (mg/100 g)	27,0±4,2	25,0±1,4	28,0±2,8	24,0±0,0
	Carotenoides totales (mg/100 g)	0,434±0,011	0,317±0,004	0,341±0,003	0,197±0,016
	Viscosidad (cP)	17,64±0,19	10,48±0,27	11,69±2,62	11,25±0,04

J: Jugo hidrolizado de jaca, J-FA: jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP, J-FA/MD: jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP y maltodextrina, J-MD: jugo hidrolizado con maltodextrina. *Desviación media.

En cuanto a la densidad, dato requerido por el simulador, se midió y se tomó un promedio entre las densidades de jugo hidrolizado con fructanos de agave (J-FA), jugo hidrolizado con fructanos de agave y maltodextrina (J-FA/MD) y jugo hidrolizado con maltodextrina (J-MD) del lote A, el cual fue preparado y secado específicamente para obtener este parámetro y los necesarios en la Etapa 1. En la Tabla 4, también es posible observar una disminución en la concentración de ácido cítrico y de carotenoides de las soluciones a secar con respecto al jugo de jaca hidrolizado (J), consecuencia de la adición de sólidos y agua.

La diferencia encontrada en el contenido de carotenoides entre los dos lotes puede deberse a las distintas variedades de jaca presentes en las muestras, puesto que el contenido nutricional cambia entre ellas. Lo anterior corrobora el resultado del estudio de Jagadees *et al.*⁵⁴ a 24 clones de jaca, que presentaron una gran diversidad en el contenido de carotenoides (0,363-0,879 mg/100 g). El % ácido cítrico encontrado es de aproximadamente el doble del reportado por

⁵⁴ JAGADEESH, S., *et al.* Chemical composition of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) selections of Western Ghats of India. Food Chemistry, 2007, vol.102, p. 361-365.

Chauhan *et al.*⁵⁵ ($0,30\pm 0,02\%$), de igual forma el contenido de ácido ascórbico hallado es mayor al reportado por el mismo autor, con $16,40\pm 0,03$ mg/100g para la pulpa fresca, y de $10,89\pm 0,02$ mg/100g para el jugo hidrolizado enzimáticamente, mas hay que aclarar que esta disminución entre pulpa y jugo se debió a la inactivación de enzimas a 70°C por 3 min después de la incubación durante 3 h (similar al explicado en la metodología), lo que degradó parte del ácido ascórbico, sin embargo, en el presente estudio no se realizó la anterior inactivación en la hidrólisis del jugo.

En el estudio de Chauhan *et al.*⁵⁶ se encuentra una viscosidad de $68,80\pm 0,7$ cP para el jugo tratado con enzimas, la viscosidad reportada para la pulpa es de $1280\pm 0,8$ cP, significando una reducción de aproximadamente el 95% de la viscosidad, que concuerda en el orden de magnitud con los datos obtenidos en los jugos hidrolizados de este trabajo. Adicionalmente, se puede observar una disminución cerca del 38% en la viscosidad de las soluciones con materiales encapsulantes con respecto al jugo hidrolizado de jaca (J), el cual se debe al agua que se adiciona y a la capacidad de dispersar el componente activo del material encapsulante, que cumple con el objetivo de facilitar el paso adecuado a través el atomizador.

3.3. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN OBTENIDAS POR SIMULACIÓN PARA EL SECADO POR ASPERSIÓN.

Los rendimientos obtenidos de polvos secados por aspersion de los lotes A y B se muestran en la Tabla 5.

⁵⁵ CHAUHAN. Op. Cit.

⁵⁶ *Ibíd.*

Tabla 5. Rendimientos del secado por aspersión para las distintas formulaciones del jugo hidrolizado de jaca en los lotes A y B con temperatura de aire de entrada de 110°C.

Soluciones de jugo	% Rendimiento	
	Lote A (0,2 MPa y 0,6110 kg/h)	Lote B (0,3 MPa y 0,6110 kg/h)
J-FA	55,52 ± 7,23	65,37 ± 5,34
J-FA/MD	60,89 ± 4,06	65,00 ± 6,35
J-MD	60,73 ± 5,96	65,40 ± 0,78

J-FA: Jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP, J-FA/MD: jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP y maltodextrina, J-MD: jugo hidrolizado con maltodextrina. *Desviación media.

El rendimiento de los tratamientos de secado, se calculó según la Ecuación 2:

$$Rendimiento (\%) = \frac{W_m}{W_o} \times 100 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde W_m es el peso del producto seco obtenido [g] y W_o los sólidos totales de entrada de la solución [g].

De la Tabla 5 se puede apreciar que los rendimientos del secado de los jugos del lote B (condiciones obtenidas en la Etapa 1) fueron mayores que los del lote A (condiciones utilizadas por Navarrete *et al.*⁵⁷), sin tener diferencia significativa entre los tratamientos ($p < 0,05$), lo que confirma lo encontrado en el análisis realizado en la Etapa 1, en donde el rendimiento del secado obtenido en la simulación aumenta cuando la velocidad de giro del atomizador es mayor (con presiones de 0,2 y 0,3 MPA se logró rendimientos de 81,35 y 100%, respectivamente). Cabe recordar que en la simulación se simplificó el caso de estudio al considerar la cámara de secado como volumen de control. Desde el punto de vista experimental, las pérdidas de masa en el proceso no sucedieron solamente por la deposición del producto parcialmente seco en las paredes de la cámara de secado, estas incrustaciones también tuvieron lugar en los codos, el ciclón y en el recolector de polvos.

Los rendimientos obtenidos en la Tabla 5 se encontraron dentro del rango reportado por Wong & Tan⁵⁸, quienes secaron por atomización jugo de jaca con

⁵⁷ NAVARRETE. Op. Cit.

MD al 30% p/p y 160°C y obtuvieron un rendimiento máximo de 66,90±0,90%. Sin embargo, en el presente trabajo se utilizó menor temperatura de entrada (110°C) y menos material encapsulante (12% p/p), lo cual representa una reducción en el costo del proceso y disminuye el riesgo de caramelización del producto por ser sometido a altas temperaturas. Asimismo, los resultados fueron mayores a los valores reportados por Jiménez *et al.*⁵⁹, quien implementó la mezcla de fructanos de agave nativos (4% p/v) y MD (10% p/v) en el secado por aspersión de jugos de Chayote y Piña, alcanzando rendimientos entre 21,8-46,4%.

Los resultados que describen la caracterización fisicoquímica de los polvos de jaca se presentan en la Tabla 6. El contenido de humedad de los polvos está por debajo del 10% (valor establecido para alimentos secos) y los valores obtenidos de a_w se encuentran dentro del rango óptimo (< 0,6). Estos bajos contenidos de humedad y actividad de agua evitan el crecimiento de microorganismos, favorecen la capacidad de fluidez del polvo, y según Rubio⁶⁰ reflejan que los materiales encapsulantes utilizados en el proceso de secado logran de forma efectiva estabilidad, ya que permite la evaporación del agua disponible de las gotas atomizadas; mientras que la alta solubilidad presentada de los polvos los hace adecuados para la reconstitución con agua.

Tabla 6. Caracterizaciones fisicoquímicas de los polvos.

		J-FA	J-FA/MD	J-MD
Lote A (0,2 MPa y 0,6110 Kg/h)	% Humedad	8,54 ± 0,41	8,27 ± 0,51	7,89 ± 0,15
	a_w	0,224 ± 0,011	0,221 ± 0,010	0,209 ± 0,001
	% Solubilidad	99,06 ± 0,02	99,09 ± 0,01	99,10 ± 0,02
Lote B (0,3 MPa y 0,6110 Kg/h)	% Humedad	8,33 ± 0,35	8,59 ± 0,36	8,34 ± 0,30
	a_w	0,246 ± 0,004	0,259 ± 0,026	0,257 ± 0,004
	% Solubilidad	99,39 ± 0,01	99,32 ± 0,13	99,33 ± 0,07

J-FA: Jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP, J-FA/MD: jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP y maltodextrina, J-MD: jugo hidrolizado con maltodextrina. *Desviación media.

⁵⁸ WONG. Op. Cit.

⁵⁹ JIMÉNEZ SÁNCHEZ, Darvin E., *et al.* Effect of addition of Native Agave Fructans on Spray-Dried Chayote (*Sechium edule*) and Pineapple (*Ananas comosus*) juices: Rheology, Microstructure and Water Sorption. Food and Bioprocess Technology, 2017, vol.10 no.11, p. 2069-2080.

⁶⁰ RUBIO. Op. Cit.

Los resultados de estos parámetros no reportan diferencia significativa ($p < 0,05$) entre los tratamientos y lotes. Además, se encuentran dentro del rango reportado por Wong & Tan⁶¹ (7,27-8,81% de humedad, 0,17-0,21 en a_w y 96,84-98,78% de solubilidad), para la jaca con MD (10-15% p/p) en polvo.

Por otro lado, se tomaron muestras de estos polvos para reconstituir a los °Brix originales y comparar con las soluciones antes de secar. Los resultados de las pruebas fisicoquímicas se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Caracterizaciones fisicoquímicas de los polvos reconstituidos.

		J-FA	J-FA/MD	J-MD
Lote A (0,2 MPa y 0,6110 Kg/h)	SST (°Brix)	25,50 ± 2,26	24,55 ± 3,75	27,05 ± 0,35
	% Ácido cítrico	0,464 ± 0,005	0,387 ± 0,050	0,387 ± 0,023
	Densidad (g/mL)	1,026 ± 0,017	1,043 ± 0,016	1,068 ± 0,022
	Ácido ascórbico (mg/100 g)	28,0 ± 2,8	19,0 ± 1,4	34,0 ± 8,5
	Carotenoides totales (mg/100 g)	0,051 ± 0,004	0,077 ± 0,003	0,079 ± 0,005
	Viscosidad (cP)	7,07 ± 0,18	6,72 ± 0,23	6,72 ± 0,13
Lote B (0,3 MPa y 0,6110 Kg/h)	SST (°Brix)	28,50 ± 0,14	28,20 ± 0,00	28,30 ± 0,14
	% Ácido cítrico	0,592 ± 0,023	0,576 ± 0,000	0,608 ± 0,000
	Densidad (g/mL)	1,084 ± 0,030	1,066 ± 0,009	1,079 ± 0,020
	Ácido ascórbico (mg/100 g)	28,0 ± 2,8	28,0 ± 2,8	33,0 ± 1,4
	Carotenoides totales (mg/100 g)	0,194 ± 0,006	0,271 ± 0,013	0,180 ± 0,011
	Viscosidad (cP)	7,43 ± 0,24	7,50 ± 0,14	7,60 ± 0,26

J-FA: Jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP, J-FA/MD: jugo hidrolizado con fructanos de agave AGP y maltodextrina, J-MD: jugo hidrolizado con maltodextrina. *Desviación media.

Al comparar los datos de la Tabla 7 con los de la Tabla 4 (pág. 39), los FA presentan capacidad encapsulante similar a la MD, donde la concentración de ácido cítrico y vitamina C en los jugos (frescos y reconstituidos) no presentaron diferencia significativa ($p < 0,05$) entre sí, resultado de la protección proporcionada por los materiales encapsulantes; contrario a la concentración de carotenoides, que son fácilmente vulnerables a tratamientos térmicos y

⁶¹ WONG. Op. Cit.

procesos oxidativos⁶², mostrando una disminución significativa ($p < 0,05$). Se evidenció una reducción en el contenido de carotenoides totales entre los jugos (de frescos a reconstituidos) entre el 8% para la MD y el 39% para los FA con respecto al lote B, y entre el 21% para la MD y el 51% para los FA en cuanto al lote A, lo que indica que las condiciones a las que se secó el lote B significaron una menor reducción en este contenido, y que la MD brindó mayor protección térmica que los FA. Así, un estudio realizado por Kha *et al.*⁶³, encontró un comportamiento similar, donde un incremento en la temperatura de entrada provocó una pérdida mayor del contenido de carotenoides totales de jugo de gac (*Momordica cochinchinensis*), y de contenido de β -caroteno en jugo de melón (*Cucumis melo*) en secado por aspersion⁶⁴.

El comportamiento de flujo de las soluciones de jugos frescos y reconstituidos, presentó diferencia significativa ($p < 0,05$), donde la disminución de la viscosidad de los polvos reconstituidos, sugiere que los cambios moleculares de los sólidos durante el secado por aspersion, modificó el comportamiento de flujo además de otras propiedades del jugo. Lo anterior se podría respaldar con estudios compilados por Grabowski *et al.*⁶⁵, que encontró que una disminución en los sólidos de la patata dulce, así como una interacción entre la MD y los polisacáridos de la patata durante su proceso de secado, contribuyeron a una disminución de la viscosidad del puré reconstituido. Por lo tanto, la discrepancia en los valores obtenidos para la viscosidad de las Tablas 4 y 7 (reducción de

⁶² ESQUIVEL. Op. Cit.

⁶³ KHA, Tuyen C.; NGUYEN, Minh H. & ROACH, Paul D. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. *Journal of Food Engineering*, 2010, vol.98, p. 385-392.

⁶⁴ SOLVAL, Kevin Mis, *et al.* Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) juice powders using spray drying technology. [Base de datos en línea]. Abril de 2012. *LWT-Food Science and Technology*, 46(1), 287-293. (Recuperado en 2 de septiembre de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643811003069?via%3Dihub>

⁶⁵ GRABOWSKI, J.A.; TRUONG, V.D., y DAUBERT, C.R. Nutritional and rheological characterization of spray drying sweet potato powder. [Base de datos en línea]. Marzo de 2008. *LWT-Food Science and Technology*, 41(2), 206-216. (Recuperado en 2 de octubre de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643807001144?via%3Dihub>

viscosidad de 7,29-11,69 cP a 6,72-7,60 cP) indican diferencias en la estructura molecular de los jugos⁶⁶. No obstante, la reología del jugo de jaca no se profundizó en el presente estudio.

Los resultados obtenidos en el secado por aspersión lograron mayor estabilidad sin alterar drásticamente las propiedades fisicoquímicas de la jaca, y el uso de materiales encapsulantes en este proceso, permitió proteger los compuestos activos del producto del medio que los rodea durante los tratamientos térmicos, indicando que pueden producirse polvos de jaca con buena calidad mediante secado por aspersión, evitando afectación a propiedades sensoriales (como el color y la apariencia) y favoreciendo la conservación del producto alimenticio, lo cual sucede con otros procesos de deshidratación de alimentos. En contraste, el proceso realizado por Saxena *et al.*⁶⁷ a bulbos de jaca en un secador de bandejas de una sola capa a temperaturas entre 50-70°C, degradó de 73,1 a 98,7% el contenido de carotenoides totales presentes en la fruta, mientras la diferencia de color y el pardeamiento no enzimático aumentaron con el período de secado, afectó de manera significativa las buenas propiedades sensoriales que posee la jaca.

⁶⁶ RUBIO. Op. Cit.

⁶⁷ SAXENA, Alok, *et al.* Degradation kinetics of colour and total carotenoids in Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) bulb slices during hot air drying. Food and Bioprocess Technology, 2012, vol.5, p. 672-679.

4. CONCLUSIONES

El simulador del secador desarrollado en ANSYS Fluent 18.1 permitió el estudio del proceso de secado por aspersion a diferentes condiciones de operacion, revelando informacion sobre los patrones de flujo del agua y aire y su relacion con el rendimiento, de manera que se pudo elegir las condiciones correspondientes a velocidad de giro del atomizador en presion de aire de 0,3 MPa y flujo de alimentacion de 0,6110 kg/h como las mas adecuadas, pues permiten un rendimiento teorico del 100%, sin comprometer el tiempo de la operacion.

Fue posible el analisis de las distintas formulaciones realizadas al jugo de jaca con fructanos de agave AGP y maltodextrina mediante su caracterizacion fisicoquimica. Los resultados obtenidos mostraron similitud en la capacidad emulsionante de los FA en comparacion con la MD, sin afectar significativamente ($p < 0,05$) la composicion de las soluciones a secar, reportando SST de $25,96 \pm 4,15$ °Brix, concentracion de acido citrico de 0,47-0,54%, contenido de vitamina C de 25,67 mg/100g y densidad de 1,06 g/mL. Sin embargo, la adiccion de agua y material encapsulante en la solucion disminuyó su viscosidad (41,5 %) y concentracion de carotenoides totales (38,5%).

Se evaluó experimentalmente las condiciones de operacion elegidas de la simulacion ($P=0,3$ MPa y $f=0,6110$ kg/h) para el secador por aspersion que permitieron obtener el producto pulverizado del jugo de jaca con mayor rendimiento ($65,26 \pm 3,41\%$) que las medidas experimentales propuestas por Navarrete *et al.* (2017) ($59,05 \pm 4,86\%$), dando validez a la tendencia de aumento que se observó en la simulacion a altas velocidades del atomizador. Mediante la implementacion del software, se pudo reducir el gran numero de experimentos que hubiera requerido un estudio tradicional. Asimismo, se logró la caracterizacion fisicoquimica mostrando que el proceso de secado por aspersion no afectó drásticamente el contenido nutricional del producto alimenticio.

5. RECOMENDACIONES

Para estudios futuros se recomienda:

- Realizar un estudio de la distribución de tamaños de gotas atomizadas a diferentes flujos de alimentación y velocidades de giro del atomizador, e incluir en el simulador un compuesto representativo de los azúcares presentes en el jugo mediante programación C++, para lograr una mayor exactitud en los resultados.
- Realizar una optimización de costos sobre las condiciones de operación del secado por aspersión a nivel experimental, que garantice la viabilidad técnica y económica del proceso.
- Hacer pruebas sensoriales sobre los jugos frescos y reconstituidos para determinar el grado de influencia del secado por aspersión sobre estas propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA INFORMATIVA CONACYT. Investigan propiedades nutricionales de la jaca en Nayarit. (C. Gómez, Productor) [En línea]. 14 de Julio de 2016. (Recuperado en 28 de junio de 2017). Disponible en <http://conacytprensa.mx/index.php/ciencia/mundo-vivo/8629-investigan-propiedades-nutricionales-de-la-jaca-en-nayarit>

ÁNGELES MARTÍNEZ, Liliana. Dimensionamiento y simulación de un secador por aspersion nivel piloto. Tesis de Maestría en Ciencias. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, 2009, 135p.

ARELLANO CORRAL, Cristián Andrés. Extracción de luteína a partir de flores de tagete (*Tagete erecta*) y estabilización por Microencapsulación. Tesis de grado (Ingeniería en Alimentos). Santiago: Universidad de Chile. Depto. de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química, 2011, 67p.

ARRIZON, Javier, *et al.* Purification and substrate specificities of a fructanase from *Kluyveromyces marxianus* isolated from the fermentation process of Mezcal. [Base de datos en línea]. Febrero de 2011. Bioresource Technology, 102(3), 3298-3303. (Recuperado en 17 de junio de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241001727X>

CHAUHAN, A., *et al.* Physicochemical changes during microfiltration (MF) of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lamk) juice. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2010, vol.9 no.4, p. 720-737.

DÍAZ MATEUS, Fabián Andrey. Introducción a la dinámica de fluidos computacional. [Presentación pdf] Bucaramanga, Noviembre de 2016. 51p.

EASTMAN, James E. & MOORE, Carl O. Cold-water-soluble granular starch for gelled food compositions. 1984 [Patente] no. US 4465702 en Google Patents.

ELEVITCH, C. & MANNER, H. *Artocarpus heterophyllus* (jackfruit). Traditional Tree. [En línea]. Abril de 2006. (Recuperado en 27 de noviembre de 2016). Disponible en <https://retirenicaragua.files.wordpress.com/2012/05/a-heterophyllus-jackfruit1.pdf>

ESQUIVEL GONZÁLEZ, B.E.; OCHOA MARTÍNEZ, L.A. & RUTIAGA QUIÑONES, O.M. Microencapsulación mediante secado por aspersion de compuestos bioactivos. Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, 2015, vol.16 no.2, p. 180-192.

FLETCHER, D.F., *et al.* What is important in the simulation of spray dryer performance and how do current CFD models perform? [Base de datos en línea]. Noviembre de 2006. Applied Mathematical Modelling, 30(11), 1281-1292. (Recuperado en 18 de julio de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X06000266?via%3Dihub>

FUCHS, M., *et al.* Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidised bed agglomeration. Journal of Food Engineering, 2006, vol.75 no.1, p. 27-35.

GARCÍA GUTIÉRREZ, G., *et al.* Microencapsulación del jugo de cebada verde mediante secado por aspersión. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 2004, vol.4 no.4, p. 262-266.

GHARSALLAOUI, Adem, *et al.* Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. [Base de datos en línea]. Noviembre de 2007. *Food Research International*, 40(9), 1107-1121. (Recuperado en 28 de Agosto de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996907001238?via%3Dihub>

GHOSH, Swapan Kumar. *Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006. p. 2-25. ISBN: 3-527-31296-X

GIBBS, Bernard F., *et al.* Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 1999, vol.50, p. 213-224.

GOUIN, Sébastien. Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, vol.15 no.8, p. 330-347.

GRABOWSKI, J.A.; TRUONG, V.D., y DAUBERT, C.R. Nutritional and rheological characterization of spray drying sweet potato powder. [Base de datos en línea]. Marzo de 2008. *LWT-Food Science and Technology*, 41(2), 206-216. (Recuperado en 2 de octubre de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643807001144?via%3Dihub>

GUEVARA BRETÓN, N. A. & JIMÉNEZ MUNGUÍA, M. T. Materiales utilizados en la encapsulación. Temas selectos de ingeniería de alimentos, 2008, vol.2, p. 22-27.

GUTIÉRREZ SUÁREZ, Jairo Andrés. Modelación CFD y validación experimental del proceso de vaporación de agua en un secador por aspersión. Tesis de Maestría. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica, 2015, 141p.

HEIDEBACH, Thomas; FÖRST, Petra & KULOZIK, Ulrich. Microencapsulation of probiotic cells by means of rennet-gelation of milk proteins. Food Hydrocolloids, 2009, vol.23 no.7, p. 1670-1677.

HUANG, Li Xin & MUJUMDAR, Arun S. The effect of rotary disk atomizer rpm on particle size distribution in a semi-industrial spray dryer. Drying Technology: An International Journal, 2008, vol.26 no.11, p. 1319-1325.

Jackfruit (Kathal)-National Fruit of Bangladesh [Anónimo]. We love Our Bangladesh. [En línea]. 2011. (Recuperado en 17 de enero de 2017). Disponible en http://weloveourbangladesh.blogspot.com.co/2011/01/jackfruit-kathal-national-fruit-of_06.html

JAGADEESH, S., *et al.* Chemical composition of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) selections of Western Ghats of India. Food Chemistry, 2007, vol.102, p. 361-365.

JIMÉNEZ SÁNCHEZ, Darvin E., *et al.* Effect of addition of Native Agave Fructans on Spray-Dried Chayote (*Sechium edule*) and Pineapple (*Ananas*

comosus) juices: Rheology, Microestructure and Water Sorption. Food and Bioprocess Technology, 2017, vol.10 no.11, p. 2069-2080.

KHA, Tuyen C.; NGUYEN, Minh H. & ROACH, Paul D. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. Journal of Food Engineering, 2010, vol.98, p. 385-392.

LAKKIS, Jamileh M. Encapsulation and Controlled Release Technologies in Food Systems. Blackwell Publishing, 1ra edición, 2007, p. 3-9. ISBN: 9780813828558.

MORALES CASTILLO, Javier, *et al.* Análisis comparativo del flujo y modelado de la transferencia de calor para una mezcla de gas y partículas en secadores ciclónicos por aspersión. Congreso de Instrumentación SOMI. (29: OCTUBRE, 2014: Puerto Vallarta, México). Memorias. Universidad Nacional Autónoma de México, 2014, 8p.

NAVARRETE SOLIS, Adriana, *et al.* Rheological stability of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* L.) pulp and hydrolyzed juice spray-dried. En: "31st EFFoST International Conference," Université Grenoble Alpes, Instituto Tecnológico de Tepic. Sitges, Barcelona, España [P1.142]. p.40.

OCHSE, J.J., *et al.* Cultivo y mejoramiento de plantas tropicales y subtropicales. México: Limusa, 1982. 1536p. ISBN: 9681803116.

PARIZE, Alexandre Luis, *et al.* Microencapsulation of the natural urucum pigment with chitosan by spray drying in different solvents. African Journal of Biotechnology, 2008, vol.7 no.17, p. 3107-3114.

PARRA HUERTAS, Ricardo Adolfo. Revisión: Microencapsulación de Alimentos. En Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, 2011, vol.63 no.3, p. 5669-5684.

RUBIO IBARRA, Magali Elizabeth. Evaluación de fructanos de agave tequilana weber variedad azul como material encapsulante del jugo de pitanga (*Eugenia uniflora* L.), mediante secado por aspersion. Tesis de Maestría en Ciencias de Alimentos. Tepic: Instituto Tecnológico de Tepic, México, 2015, 178p.

SAXENA, Alok, *et al.* Degradation kinetics of colour and total carotenoids in Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) bulb slices during hot air drying. Food and Bioprocess Technology, 2012, vol.5, p. 672-679.

SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: Jaca (Jackfruit) para el 2016. [En línea]. (Recuperado en 31 de octubre de 2017). Disponible en http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/

SIMBA CASA, María del Rocío. Caracterización fisicoquímica del Jackfruit y propuestas de dos alternativas para el procesamiento. Tesis de grado (Ingeniería de Alimentos). Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, 2014, 99p.

SOLVAL, Kevin Mis, *et al.* Development of cantaloupe (*Cucumis melo*) juice powders using spray drying technology. [Base de datos en línea]. Abril de 2012. LWT-Food Science and Technology, 46(1), 287-293. (Recuperado en 2 de septiembre de 2017). Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643811003069?via%3Dihub>

ULLOA, José Armando, *et al.* Los fructanos y su papel en la promoción de la salud. Revista Fuente UAN, 2010, vol.5, p. 57-62.

URÍAS SILVAS, Judith Esmeralda. Efecto prebiótico de los fructanos de Agaves y Dasyilirion y su implicación en el metabolismo de glucosa y lípidos en ratones. Tesis de Doctorado. Guanajuato: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. 2008. 132p.

VARGAS SOLANO, Silvia Viridiana, *et al.* Cinética de degradación de encapsulados de carotenoides de Cempaxuchil (*Tagetes erecta*) con fructanos de agave. VII Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia. León, Guanajuato: Centro de Investigaciones en Óptica, 2010.

WAGNER, H. Natural products chemistry and phytomedicine research in the new millennium: new developments and challenges. Archive for Organic Chemistry, 2004, vol. 7, p. 277-284.

WONG, Chen Wai & TAN, Hong Hock. Production of spray-dried honey jacfruit (*Artocarpus heterophyllus*) powder from enzymatic liquefied puree. Journal of Food Science and Technology, 2017, vol.54 no.2, p. 564-571.

ANEXOS

ANEXO A. Equipo de secado por aspersion.

Secador por aspersion utilizado en este trabajo



En la figura se presenta el secador por aspersion modelo LPG-5 CIMA Industries Inc. con atomizador rotatorio que requiere de un suministro de aire a presión.

Este aire para el atomizador entra a un deshumidificador pues debe ser aire seco, posteriormente es ingresado a un compresor para aumentar su presión y finalmente se dirige hacia el atomizador, haciéndolo rotar. Esta presión de entrada se controla con una perilla manual dentro del intervalo de 0-1 MPa, sin embargo, en el manual del secador se recomienda no sobrepasar los 0,3 MPa si no se cuentan con válvulas de seguridad especiales.

El aire de secado, diferente del aire del atomizador, es succionado por un sistema de presión negativa hacia un filtro y una serie de resistencias eléctricas que calientan al mismo, para ser ingresado a la cámara de secado por la parte superior.

El líquido, que también ingresa por la parte superior, debe ser impulsado mediante una bomba peristáltica, lo que permite control sobre el caudal de alimentación.

El producto pulverizado sale hacia un ciclón, en donde es separado del aire y cae a un recolector de polvos.

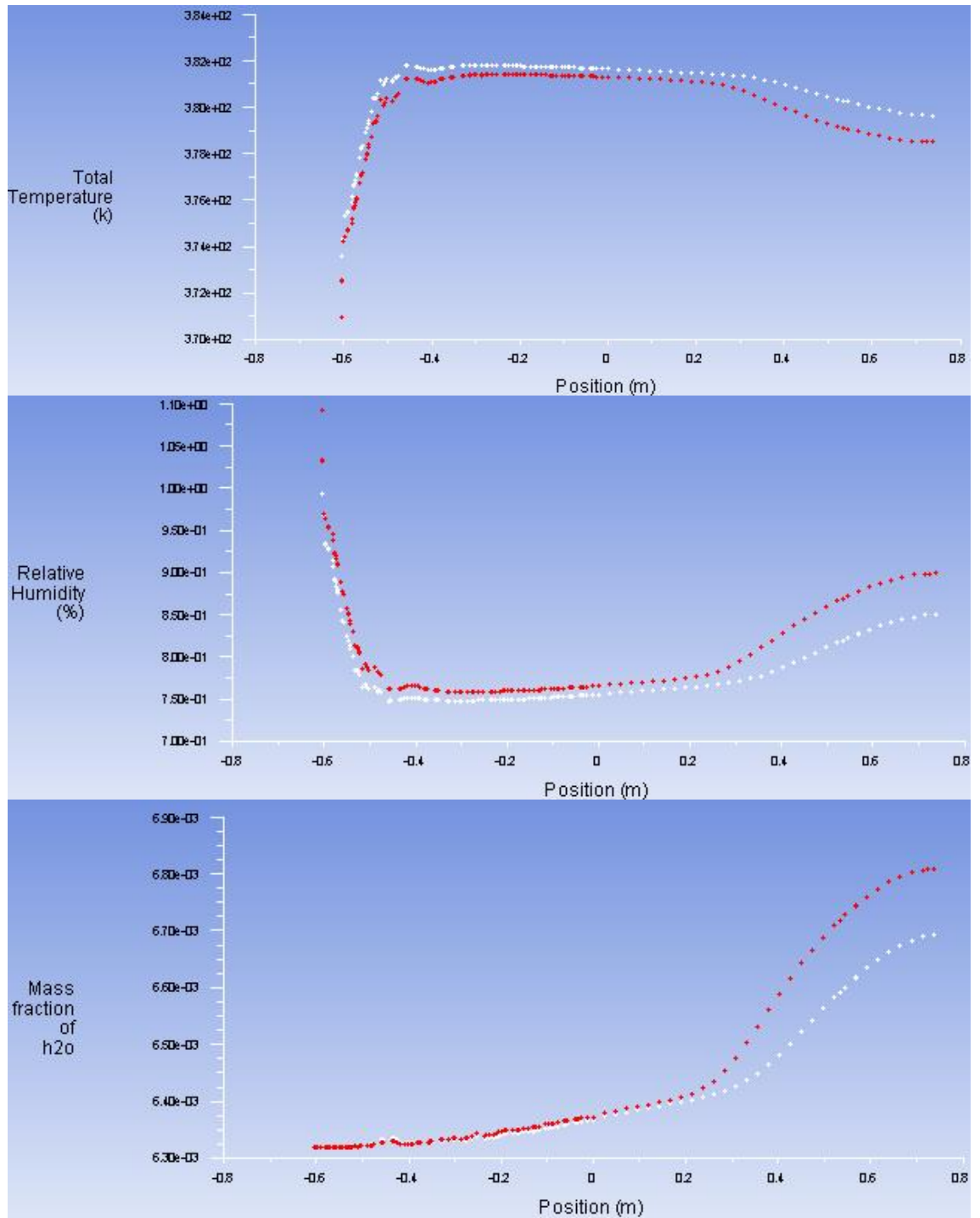
ANEXO B. Comprobación de características de calidad de malla y simulación.

La malla construida tuvo un total de 214.603 celdas, un *skewness* máximo de 0,84675 y un *aspect ratio* máximo de 4,59 para los elementos hexaédricos, ambos valores dentro de los rangos permitidos (*skewness*<0.85 y *aspect ratio*<5 para hexaedros). Existen algunos hexaedros con *aspect ratio*>5, mas están en la capa límite, lo cual está permitido.

Posterior a las corridas en el simulador, se comprobó que el coeficiente y^+ estuviera dentro del rango adecuado (30-300).

Por último, para verificar la independencia de la malla, ésta se refinó en función de las paredes automáticamente por el programa, y se graficaron a lo largo del eje y del secador los perfiles de temperatura, humedad relativa y fracción másica de agua para la malla antigua y la refinada, con el objetivo de comparar estos perfiles. Las gráficas se muestran a continuación (color blanco para malla antigua y rojo para malla refinada), y se puede observar que los perfiles tienen el mismo comportamiento, por lo que se puede afirmar que los resultados son independientes de la malla.

Comparación de perfiles de temperatura, humedad relativa y fracción másica de agua para la malla antigua y la refinada.



ANEXO C. Cálculos detallados de parámetros o variables para el simulador.

- Flujo másico de aire: Para calcularlo, primero se midió con un anemómetro la velocidad de éste a la salida del secador, que fue de 9,2 m/s en promedio. Posteriormente, con el área transversal de la sección de salida del aire, se calculó el flujo volumétrico que es de 0,07935 m³/s. Para convertir éste dato a flujo másico, fue necesaria la densidad, que se calculó según la ecuación de gases ideales (Ecuación 3), cuyo resultado fue $\rho=0,9924 \text{ kg/m}^3$.

$$\rho = \frac{P \cdot P_M}{R \cdot T} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Finalmente el flujo másico calculado es de 0,07874 kg/s.

- Intensidad turbulenta: Es un parámetro que depende del número de Reynolds y se calcula según la Ecuación 3 (Díaz, 2016).

$$TI = 0,16 * Re^{-1/8} \quad (\text{Ecuación 4})$$

El Re calculado fue de 6071,96 y la TI de 5,39%.

- Diámetro hidráulico: Se calculó un diámetro equivalente al de una circunferencia para la sección de entrada de aire al secador, con un resultado de 0,1220 m.

- Humedad del aire: Con un higrómetro se tomó la humedad relativa del aire, que correspondió a 32%. Hay que mencionar que éste es un dato muy variable según las condiciones climáticas del día, se tomó un promedio entre varios días de medición. Utilizando una carta psicrométrica, este dato se convirtió a composición másica de H₂O en el aire, obteniéndose un resultado de 0,006319 kg H₂O/kg totales aire.

- Equivalencia entre presión de aire del atomizador y velocidad de giro del mismo: Se utilizó la ecuación 5, deducida a partir del valor máximo de P (1 MPa) y de N (30000 rpm).

$$N = 30000 * P \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde P es la presión del aire [MPa] y N es la velocidad de giro del atomizador [rpm]

- Vectores de posición y velocidad inicial para las gotas de líquido: El atomizador del secador cuenta con 24 orificios, por lo que se calcularon los 24 vectores de posición y velocidad inicial para cada orificio. Para estos cálculos se utilizó la geometría del secador, y específicamente para la velocidad se utilizó la Ecuación 6 (Gutiérrez, 2015).

$$v = 2\pi R * \left(\frac{N}{60}\right) \quad \text{(Ecuación 6)}$$

En donde v es la magnitud de velocidad inicial de las gotas [m/s] y R es el radio del atomizador [m]. La dirección de la velocidad se tomó tangencial a cada orificio del atomizador.

- Temperatura de la pared del secador: Se tomaron varias mediciones con un sensor laser de temperatura. En promedio la temperatura fue de 58°C.