



DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS MEDIANTE CRIODESECACIÓN ATMOSFÉRICA

Autor:

ALFREDO MONTES PERDOMO

**Propuesta de revisión crítica como trabajo de grado, requisito parcial para optar por el
Título de Ingeniero de Alimentos**

Director:

JUAN SEBASTIÁN RAMÍREZ-NAVAS, I.Q., PH.D.

Codirector:

ALFREDO AYALA APONTE, I.A., PH.D.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI
2017**

DEDICATORIA

A Dios por brindarme sabiduría, paciencia, salud y fortaleza a lo largo de todos estos años de estudio.

A mí amada familia, Juliana y Liliana por ser el motivo de esforzarme día a día, por su comprensión, amor y paciencia.

A mi Mamá Gloria Perdomo, sin ella nada de esto sería posible.

A mis hermanos y sobrinos por su compañía y ejemplo.

AGRADECIMIENTOS

A mis compañeros y amigos de clase. Por sus buenos deseos, palabras de aliento y compañía en los momentos más difíciles.

A mis jefes, compañeros y amigos de Familia del Pacifico, por todo el apoyo recibido durante este tiempo.

A mis directores, los profesores Juan Sebastián Ramírez y Alfredo Ayala por confiar en mí, por su guía y acompañamiento permanente.

A todos los que hacen parte de la Escuela de Ingeniería de Alimentos por su valiosa colaboración.

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido	4
Lista de Figuras	5
Lista de tablas	6
Nomenclatura	6
Resumen	7
Abstract	7
1 Introducción.....	8
2 Problema de investigación	9
2.1 Planteamiento y formulación del problema	9
2.2 Justificación	9
2.3 Objetivos	10
3 Vigilancia tecnológica	11
4 Antecedentes históricos.....	14
5 Liofilización.....	16
5.1 Generalidades.....	16
5.2 Etapas de la criodesecación	17
6 Criodesecación atmosférica.....	21
6.1 Principios básicos.....	21
6.2 Influencia de parámetros del proceso CDA	25
6.3 Influencia del proceso CDA sobre las características de calidad.....	30
6.4 Modelos matemáticos en CDA	36
7 Tipos de CDA.....	46
7.1 CDA asistido con bomba de calor.....	46
7.2 CDA asistido con lecho fluidizado	48
7.3 CDA asistido con ultrasonido	51
7.4 CDA asistido con microondas.....	54
7.5 CDA en proceso Aspersión con Frío (Spray Freezing)	55
8 Consideraciones finales.....	57
8.1 Comparación entre métodos convencionales de criodesecación	57
8.2 Ventajas y desventajas de CDA. Problemas y mejoras del proceso	60
9 Conclusiones	64
10 Bibliografía	65
11 Anexos	71
11.1 Anexo 1.....	71
Tabla 2. Condiciones del proceso y resultados en CDA reportados en los últimos años	71
11.2 Anexo 2.....	74
Tabla 3. Comparativo de los tipos de asistencia en el proceso CDA.....	74
11.3 Anexo 3. Diferentes configuraciones de equipos usados en CDA.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Documentos publicados por año.....	11
Figura 2. Revistas con mayor número de publicaciones en CDA.....	11
Figura 3. Publicaciones por autor.....	12
Figura 4. Países con mayores publicaciones en CDA.....	12
Figura 5. Distribución de documentos publicados.....	13
Figura 6. Diagrama de fase del agua.....	16
Figura 7. Etapas del proceso de liofilización.....	17
Figura 8. Transferencia de calor y masa en el secado por congelación.....	20
Figura 9. Diagrama sobre aspectos principales de la criodesecación atmosférica.....	21
Figura 10. Diagrama esquemático de la criodesecación atmosférica.....	22
Figura 11. Viabilidad de la cepa de <i>Lactobacillus acidophilus</i> en el proceso CDA.....	26
Figura 12. Curvas de secado de manzana a diferentes temperaturas.....	27
Figura 13. Efecto de temperaturas fijas y variables en propiedades organolépticas.....	28
Figura 14. Efecto de las velocidades de aire de secado sobre el tiempo de sublimación de solución acuosa de manitol al 20%.....	29
Figura 15. Efecto de la temperatura en las cinéticas de secado de solución acuosa de manitol al 20%.....	30
Figura 16. Fotos de barrido electrónico para partículas a través de spray freezing.....	32
Figura 17. Diagrama de fases temperatura-composición suplementado de una mezcla binaria soluto/agua.....	34
Figura 18. Esquema del frente de sublimación en retroceso con el tiempo.....	40
Figura 19. Transferencia de calor en criodesecación atmosférica.....	42
Figura 20. Bosquejo de equipo de lecho fluidizado con bomba de calor.....	48
Figura 21. Influencia del tipo de adsorbente en el proceso CDA de camarones.....	50
Figura 22. Comparativo de las cinéticas de secado (agua remanente vs tiempo) en el proceso CDA de muestras de manzana.....	53
Figura 23. Curva de secado de <i>Calanus finmarchicus</i> obtenida mediante CDA y liofilización.....	57
Figura 24. Cinéticas de secado (pérdida de agua en el tiempo) para la CDA (AFD) y la liofilización (VFD) de camarones.....	59
Figura 25. Descomposición del costo de energía para el proceso de liofilización.....	60
Figura 26. Relación costo-beneficio de tres métodos de deshidratación.....	61
Figura 27. Configuración del equipo de lecho fluidizado con bomba de calor.....	62
Figura 28. Esquema del equipo usado en CDA de proteína de tomate.....	75
Figura 29. Esquema del equipo usado en CDA de papa.....	75
Figura 30. Esquema del equipo usado en CDA de papa.....	76
Figura 31. Esquema del equipo usado en CDA de murtilla berry.....	76
Figura 32. Esquema del equipo usado en CDA de papa.....	77
Figura 33. Esquema del equipo usado en CDA de manzana.....	77
Figura 34. Esquema del equipo propuesto para procesos de CDA.....	78
Figura 35. Equipo de CDA.....	78
Figura 36. Equipo de CDA ubicado en el laboratorio de operaciones unitarias del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Santiago de Chile.....	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la Ecuación 2 para distintas geometrías	40
Tabla 2. Condiciones del proceso y resultados en CDA reportados en los últimos años	71
Tabla 3. Comparativo de los tipos de asistencia en el proceso CDA.....	74

NOMENCLATURA

Sigla	Significado
CDA	Criodesecación atmosférica
CFD	Mecánica de fluidos computacional
COP	Coeficiente de eficiencia en equipos
DE	Difusividad efectiva
SCDM	Modelo de difusión constante simplificado
URIF	Modelo de frente de hielo retirado uniformemente
VFD	Liofilización al vacío

RESUMEN

La criodesecación o liofilización es un proceso de eliminación de agua, y por consiguiente de conservación de alimentos que emplea los procesos de congelación y sublimación del agua a través de descenso de temperatura y vacío. Esta técnica ofrece ventajas significativas frente a otros métodos de secado en cuanto a los parámetros de calidad del producto final. Sin embargo, sus altos costos iniciales y de operación dificultan su empleo en la industria. Una alternativa que se ha estudiado es la criodesecación atmosférica ya que ha demostrado requerimientos energéticos más bajos debido a la ausencia de vacío y la posibilidad de operar en continuo. En esta revisión se recopilan los fundamentos teóricos de este proceso, la influencia de parámetros así como el modelamiento matemático que involucra los fenómenos de transferencia de masa y calor. En general, el método estudiado exhibe características similares al proceso convencional con vacío, pero sus largos tiempos de proceso obligan a usar tecnologías combinadas para acelerar las cinéticas de secado, dominadas por la transferencia interna de masa. Por esta razón, se presenta una revisión de los principales tecnologías complementarias como bomba de calor, lecho fluidizado de partículas adsorbentes, ultrasonido y microondas. Finalmente, se consideran las ventajas y desventajas del proceso a través del análisis global del efecto sobre las propiedades organolépticas del producto final como encogimiento y porosidad.

Palabras clave: Bomba de calor, Lecho fluidizado, Liofilización, criodesecación, atmosférica, Sublimación, Transferencia de Masa y Calor, Ultrasonido.

ABSTRACT

Freeze drying is a water removal process and therefore, it extends foods shelf life which uses the freezing and sublimation state changes through the decrease of temperature and vacuum in a chamber. This technique offers important advantages in comparison to the other drying processes in terms of the end product quality characteristics. Nevertheless, the high fixed and operational costs make difficult to scale up to industry level. Atmospheric freeze drying (AFD) is an alternative that has been studied given its low energy requirements, the latter due to lack of vacuum and the chance to operate in-flow. In this review, the fundamentals, the influence of the process parameters and the mathematical models that involve heat and mass transfer mechanisms are studied. In general, the AFD process shows similar characteristics to the conventional vacuum technique, but the longer operational times that actually occur demand the combination of some technological energy saving methods. Thus, the main technological operations like heat pump, fluidized bed, ultrasound and microwave are mentioned and fully explained. Finally, it has been considered the process advantages and disadvantages on the effect of the organoleptic properties in the end product, like shrinkage and porosity.

Keywords: Heat Pump, Fluidized Bed, Freeze Drying, Atmospheric, Sublimation, Mass and Heat Transfer, Ultrasound.

1 INTRODUCCIÓN

La liofilización (criodesecación al vacío) es un proceso de conservación mediante sublimación utilizado con el fin de reducir las pérdidas de los componentes volátiles o termo-sensibles. En América este proceso fue utilizado, de forma rudimentaria, por los incas para obtener alimentos de larga durabilidad. En las elevadas cumbres de los Andes disponían de una planta natural de criodesecación, pues allí la presión atmosférica es baja y el frío en la noche congelaba sus alimentos que, expuestos al suave calor del día siguiente, perdían humedad por sublimación [Orrego, 2008].

Este proceso garantiza la calidad final de productos biológicos porque aún los dos métodos más fiables de conservación, la congelación y la deshidratación sin el uso de conservantes o productos químicos. Se utiliza intensivamente en farmacia, en alimentos deshidratados, en producción de catalizadores y en nuevos materiales. Es el proceso más adecuado para preservar células, enzimas, vacunas, virus, levaduras, sueros, derivados sanguíneos, algas, así como frutas, vegetales, carnes, pescados y alimentos en general. En este proceso los productos obtenidos no se ven alterados en sus propiedades y se rehidratan fácilmente, sin embargo, su costo es muy elevado [Ramírez-Navas, 2006].

Por otra parte, si para un investigador liofilizar es extraer más del 95% de agua, para un comerciante significa: llevar diez veces más mercancía, pero sin unidad frigorífica; stocks de frutas y hortalizas sin gastos de conservación, y valor agregado local, aproximadamente del 1200% más en términos económicos.

En la actualidad, los productos deshidratados deben presentar unas buenas propiedades nutricionales y organolépticas, tener un coste de producción bajo y un mínimo impacto ambiental. La criodesecación a presión atmosférica (CDA) junto con el uso de secaderos equipados con bomba de calor puede ser una alternativa válida para cumplir con dichos requisitos [García-Pascual *et al.*, 2004]. La CDA es una alternativa a la liofilización para obtener productos de elevada calidad a un menor coste. La principal ventaja de este procedimiento se debe a la simplificación del equipo (no hay cámara de vacío) y a la reducción de costes energéticos. Sin embargo, el incremento del tiempo de secado es un inconveniente, debido al descenso de la velocidad de sublimación del hielo [García-Pascual *et al.*, 2004].

Este documento es una investigación bibliográfica que abordó el uso de la CDA en diferentes alimentos, su aplicación a nivel nacional e internacional, y sus ventajas y desventajas frente a otros tipos de procesos de deshidratación. Se presenta información referente a las últimas publicaciones que orienten sobre las tendencias actuales en configuración de equipos, parámetros de proceso, alimentos procesados y tecnologías aplicadas a la CDA.

2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Planteamiento y formulación del problema

Colombia es un país rico en flora y fauna, cuenta con gran variedad de frutas, verduras y flores que pese a ser cultivados todo el año presentan problemas en algunos casos por la falta de manejo post-cosecha. A nivel mundial, los componentes presentes en forma natural en los alimentos van cobrando mayor importancia debido al papel que desempeñan en la salud humana. Constantemente se han estudiado métodos de conservación para asegurar que los compuestos bioactivos presentes en los alimentos se mantengan o se modifiquen mínimamente, conservando así su valor nutricional y nutracéutico. Uno de los métodos más usados es la deshidratación, con la cual se obtienen productos de buena calidad, higiénicos y libres de sustancias tóxicas. En algunos métodos de deshidratación el calor empleado para deshidratar alimentos altera las características organolépticas y provoca pérdidas del valor nutritivo; en la deshidratación por criodesecación estos parámetros resultan menos afectados [Bantle y Eikevik, 2011].

2.2 Justificación

Las tendencias de consumo de frutas y hortalizas procesadas están directamente relacionadas con temas como salud, conveniencia, productos orgánicos, étnicos y comercio justo. Las frutas y hortalizas procesadas son cada vez más utilizadas en la industria alimenticia. En el caso de las frutas procesadas, la demanda supera la producción interna, por lo que se hace necesaria la importación de estos productos. Adicionalmente, las frutas exóticas y tropicales no se pueden producir en la Unión Europea, lo que abre una variedad de oportunidades para estos productos colombianos [Procolombia, 2012].

La Unión Europea ha incrementado la importación de productos hortofrutícolas procedentes de terceros países durante el año 2016, según los últimos datos actualizados de la Oficina de Estadísticas de Eurostat, procesados por Fepex, la compra comunitaria de frutas creció un 9% en volumen y un 8% en valor en comparación con el mismo periodo del año anterior, totalizando 6,5 millones de toneladas y 6 714 millones de euros. En el sector de las hortalizas, la importación de países terceros aumentó un 23% en volumen y un 11% en valor, alcanzando cifras de 1,55 millones de toneladas y 1 602 millones de euros [Fepex, 2017].

En cuanto al origen de las importaciones extracomunitarias de frutas, existe una importante diversificación de los países proveedores. Costa Rica, Ecuador y Colombia son los principales suministradores de la UE en términos absolutos debido al plátano. La importación comunitaria de fruta de Costa Rica totalizó 1,05 millones de toneladas, la de Ecuador fue de 771 635 toneladas y la de Colombia se ubicó en 729 468 toneladas [Fepex, 2017].

Las tendencias de consumo de alimentos saludables y funcionales han encaminado a los empresarios colombianos hacia la transformación de frutas y hortalizas a productos procesados de mayor valor agregado como pulpa, deshidratados, concentrados, criodesecados y congelados. Debido a las condiciones climáticas del país, existe una gran variedad de frutas y hortalizas, lo que permite ofrecer una amplia gama de productos procesados al consumidor internacional [Nielsen, 2015]. Cada vez son más demandados los productos de valores agregados y de conveniencia para el consumidor “fáciles de preparar” y “listos para comer”, los productos criodesecados entran a desempeñar un papel clave dentro de este sector alimenticio.

La principal motivación para el desarrollo de la CDA, es la reducción del consumo de energía en comparación con la liofilización, mientras se mantiene una alta calidad del producto. La CDA puede representar una técnica con características intermedias que permita la obtención de productos de mayor calidad que los obtenidos con el secado por aire caliente, pero con un coste menor que en el caso de la liofilización. Así, esta técnica podría convertirse en una alternativa interesante con la que obtener productos deshidratados que mantengan bien las características nutricionales y organolépticas del producto fresco, aprovechando la actual demanda de productos de calidad a precios económicos [Santacatalina *et al.*, 2013].

Por tanto, será de gran interés ofrecer a la comunidad científica y empresarial un documento de revisión que muestre las diferentes alternativas que brinda la CDA en términos de competitividad y productividad, ya que sería posible obtener los mismos resultados de la liofilización aplicando CDA con el valor agregado de disminución del costo de procesamiento.

2.3 Objetivos

2.3.1 General

Compilar y analizar información bibliográfica sobre la actualidad científica y tecnológica en la deshidratación de alimentos mediante la criodesecación atmosférica.

2.3.2 Específicos

- Recopilar información sobre equipos, parámetros de proceso y alimentos usados en la criodesecación atmosférica.
- Analizar las ventajas y desventajas de la criodesecación atmosférica con otras operaciones de deshidratación.
- Evaluar de manera crítica toda la información.

3 VIGILANCIA TECNOLÓGICA

Con el fin de dimensionar la importancia del tema en estudio, se realizó una revisión de las publicaciones registradas en la base de datos SCOPUS®. De los resultados obtenidos se destaca el incremento de publicaciones en los últimos 20 años, después de mucho tiempo sin ser objeto de estudio la CDA cobra relevancia en el campo investigativo. En la Figura 1 se muestra el número de documentos publicados en las mejores revistas a nivel internacional. En la Figura 2 se presentan las revistas que más han publicado a cerca de la CDA.

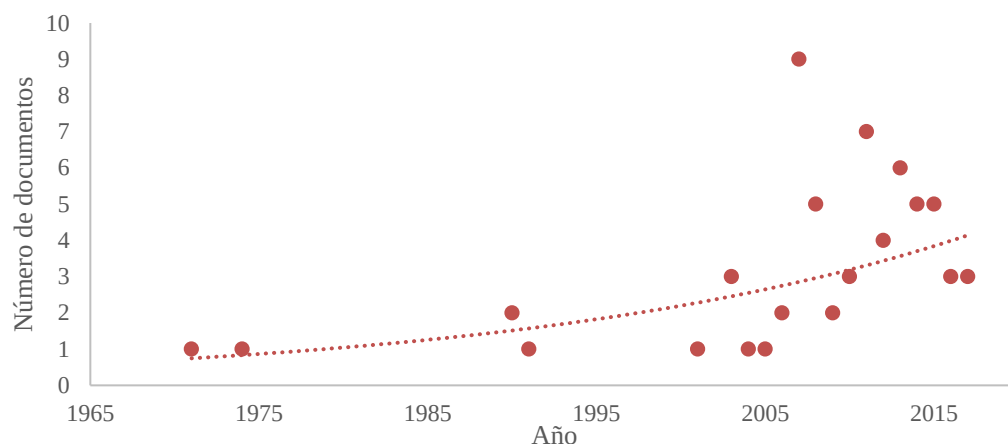


Figura 1. Documentos publicados por año

Fuente: Scopus [2017]

La investigación en CDA en los últimos cinco años se orientando hacia el estudio de CDA asistida con bomba de calor y CDA asistida con ultrasonido.

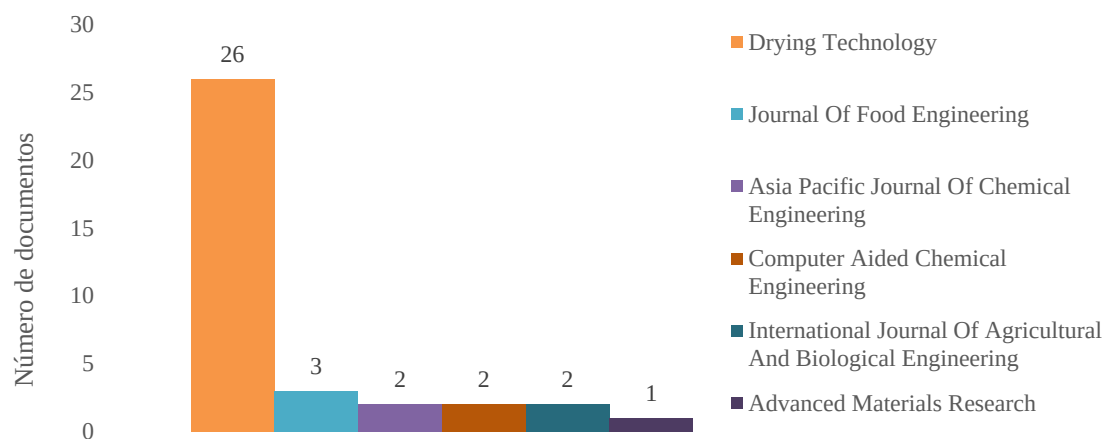


Figura 2. Revistas con mayor número de publicaciones en CDA

Fuente: Scopus [2017]

Como se observa en la Figura 2, *Drying Technology* es la revista más interesada en las publicaciones a cerca de la CDA.

En la Figura 3 se muestran los autores que más aportes han realizado al estudio de la CDA.

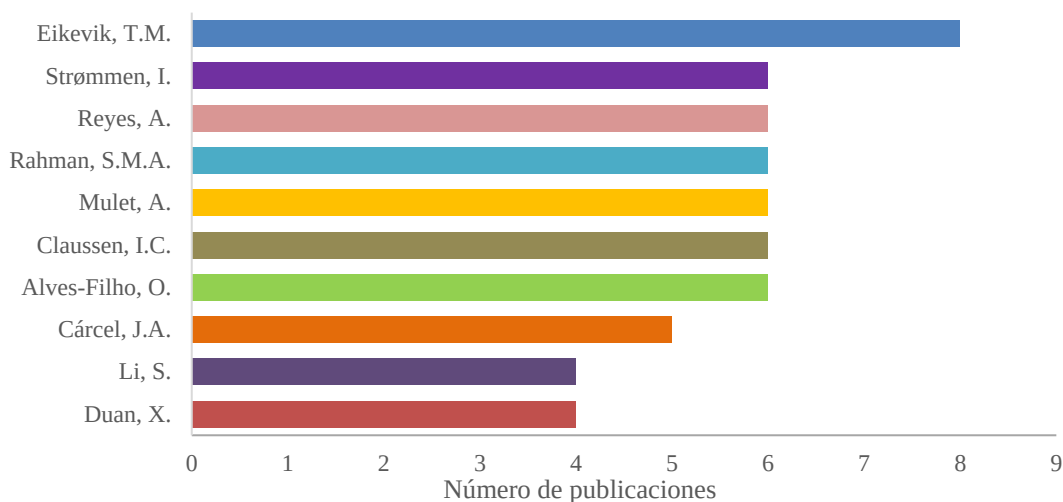


Figura 3. Publicaciones por autor

Fuente: Scopus [2017]

En la Figura 4 se muestran los países que más han publicado sobre CDA, Noruega y China son los líderes en investigación del tema, por Latinoamérica se destaca el aporte de Chile.

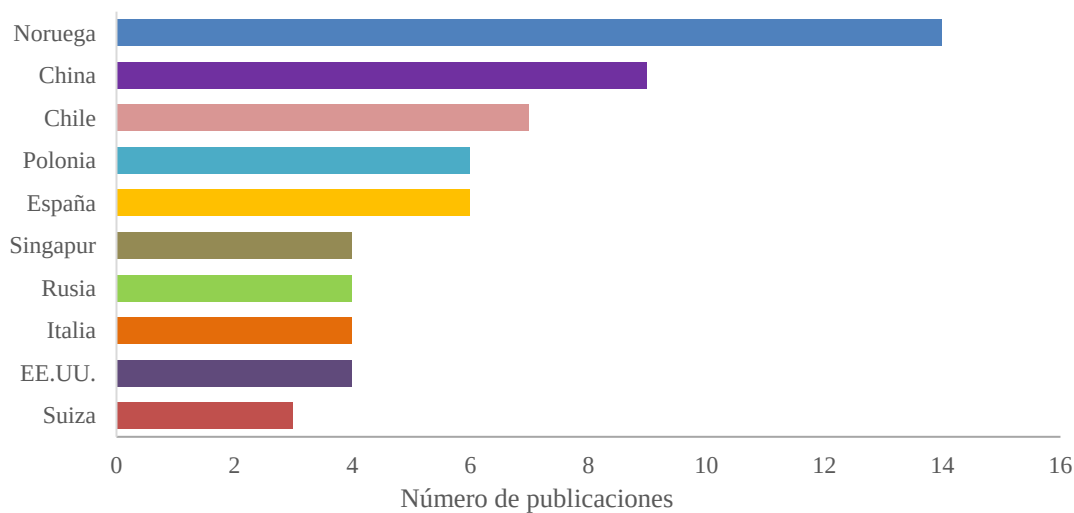


Figura 4. Países con mayores publicaciones en CDA

Fuente: Scopus [2017]

Para finalizar, en la Figura 5 se presenta la distribución por tipo de documento. La mayor parte de la información publicada son artículos, los cuales en su gran mayoría han sido referenciados en el texto.

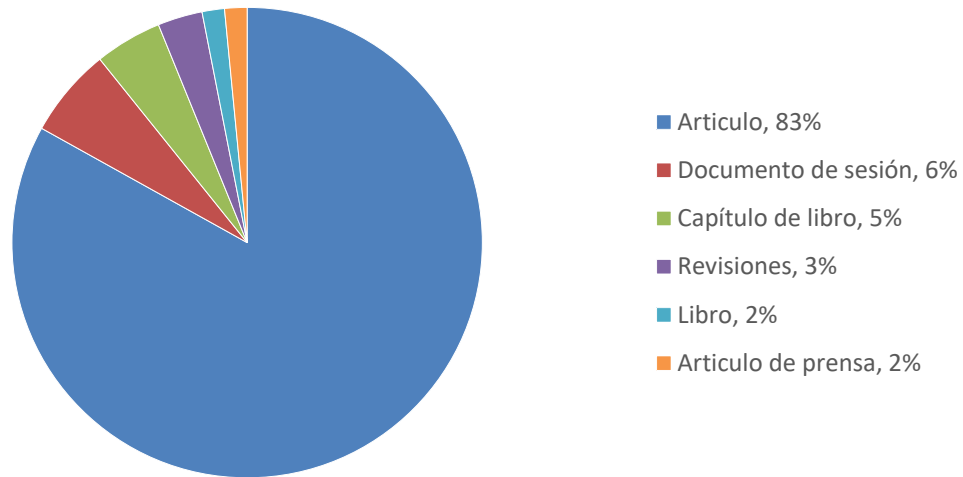


Figura 5. Distribución de documentos publicados

Fuente: Scopus [2017]

4 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El frío es utilizado desde tiempos inmemoriales para la conservación de alimentos. Doscientos años a. C. los incas desarrollaron un proceso rudimentario de criodesecación, con el fin de obtener comida hipercalórica, ultraliviana e imputrescible para sus tropas militares. Aprovechando las nieves andinas se congelaban papas y carne de llama debido a las frías temperaturas de la montaña durante la noche, y se descongelaban en el día para extraer el agua por la baja presión atmosférica (4500 metros sobre el nivel del mar). El proceso se repetía hasta obtener un producto estable de baja humedad. La técnica también fue empleada por los vikingos, aprovechando las bajas temperaturas en el invierno, pero con montañas más bajas y sol más oblicuo, criodesecaron atmosféricamente arenque con menos perfección [Ramírez-Navas, 2006].

En 1904, físicos franceses desarrollaron una tecnología llamada liofilización o crio-dsecación en razón de su fase inicial de congelación y posterior deshidratación del producto. Sin saberlo, ellos estaban dando inicio a la liofilización a nivel tecnológico. La conservación de bacterias, virus u otros microorganismos fueron su primera aplicación. La palabra liofilización proviene de los términos griegos *luen* o solvente y *phineo* o amigo [Flosdorf y Kimball, 1939; Flosdorf y Mudd, 1935]. Los trabajos de secado realizados a bajas temperaturas antes de 1905, no incluían el uso de vacío, ya que las bombas de vacío mecánicas no estaban disponibles en aquellas épocas; fueron Benedict y Manning quienes la introdujeron en el proceso de crio-dsecación. Ellos informaron del secado de materiales provenientes de animales en un equipo con una bomba química de vacío, que trabajaba desplazando el aire de la cámara mediante la evaporación de éter etilo, posteriormente se conectaba la cámara de secado a una vasija que contenía ácido sulfúrico concentrado, así que al disolverse el éter etilo en el ácido se producía en el sistema una presión sub-atmosférica. Reportan que esta técnica no fue muy eficiente para pruebas con gelatina, tomándoles dos semanas para reducir su contenido de humedad hasta 20% en peso [Jennings, 1993].

Fue Shackell en 1909 quien agregó una bomba mecánica de vacío a un equipo de secado similar al mencionado, reduciendo la presión por debajo de 133 Pa en pocos minutos. Usó una trampa de ácido sulfúrico para los vapores condensados antes de que entraran a la trampa de vacío. Su sistema estaba compuesto de una cámara de secado, una trampa de vapor de agua y el sistema de vacío; esencialmente los componentes principales de los equipos actuales de criodesecación. Fue el primero en trabajar con alimentos, demostrando que las carnes, frutas y vegetales podían ser secados mientras estuvieran congelados [Flosdorf y Kimball, 1939; Heller, 1941; Jennings, 1993; Link *et al.*, 1941].

Aunque Flosdorf y Mudd introdujeron el término, no fue reconocido formalmente sino hasta 1934 cuando Alexander Fleming lo propuso. A finales de la década de 1930 resultó significativa la producción a gran escala de liofilizados. A través de toda la Segunda Guerra Mundial y en la posguerra, la fabricación de plasma de sangre seco, fue quizá el primer uso real de la tecnología de liofilización como un proceso productivo comercial. Entre 1935 y 1940, Flosdorf y Mudd

mejoraron el proceso empleando fármacos y tejido animal, definieron las mejores condiciones de proceso para plasma sanguíneo y antibióticos y para liofilizar a gran escala penicilina. Sus mejoras rigen el proceso de liofilización actual. Desde 1958 se aplicó al sector alimentario, y por ser una técnica costosa se enfocó en pocos alimentos: leche, sopas, huevos, levaduras, zumos de frutas y café, aunque actualmente son más de 400 los alimentos que se liofilizan [Ramírez-Navas, 2006].

En 1965, Cuper realizó un estudio de la aplicación de la tecnología de criodesecación a los alimentos, llegando a la conclusión de su trascendental importancia estratégica con alta probabilidad de aplicación en carnes, frutos de mar, hortalizas, infusiones, etc. Respecto a la criodesecación a presión atmosférica, en 1959 Meryman demostró la posibilidad de secar productos congelados sin necesidad de vacío. Estableció que el gradiente de presiones de vapor es el que facilita el paso del agua entre el frente de secado y la zona seca. Heldman, en 1974, con base a pruebas experimentales de CDA y al desarrollo de un modelo matemático, concluyó que la principal limitante económica es la baja velocidad de secado controlada por la difusión molecular de vapor de agua en la estructura seca del producto y mostró que el mayor potencial para hacer practicable el secado por congelación a presión atmosférica es la aproximación a lechos fluidizados. Alvarado, en 1979 aplicó los principios de CDA a diferentes variedades de papa con el fin de realizar ensayos de almacenamiento (de 10 a 15 °C durante periodos de 5 a 7 días, de 4,4 °C para periodos de 4 a 5 meses) observó que temperaturas menores no son necesarias y resultan contradictorias en el almacenaje, concluyó que la CDA es una alternativa a la liofilización, conservando sus características y propiedades nutricionales. En 1980 Kelly diseñó un sistema de alto vacío a bajo costo, mejoró la cámara de sublimación, el aislamiento de ésta y el cierre de su puerta, aunque no reportó información sobre la eficiencia del nuevo diseño [Ramírez-Navas, 2006].

A partir de 1990, se han realizado numerosos estudios de liofilización, en los cuales se observa el comportamiento del alimento y sus componentes incluso antes de la operación misma, siendo el método de deshidratación que da lugar a productos alimenticios de más alta calidad que con cualquier otro, además de que previene el daño térmico, los volátiles diferentes al agua son retenidos, el producto se reconstituye y el encogimiento es despreciable. Sin embargo, es una forma de deshidratación de alimentos bastante costosa, debido a la velocidad lenta de secado y a la necesidad de usar vacío. Una de las causas de este elevado costo es la longevidad del producto procesado. En efecto, la baja presión del proceso y la débil conductividad de los productos liofilizados (debido a la textura porosa) afectan de manera significativa y negativa la transferencia de calor y de masa y por consecuencia la duración de la operación de deshidratación. En la actualidad, varios estudios a escala laboratorio y escala planta piloto se realizan con el fin de obtener una mejor comprensión de los detalles de liofilización [Ramírez-Navas, 2006].

5 LIOFILIZACIÓN

5.1 Generalidades

La criodesecación o liofilización al vacío CDA (VFD, *Vacuum Freeze Drying*) es un proceso de secado mediante sublimación que se ha desarrollado con el fin de reducir las pérdidas de los compuestos responsables del sabor y el aroma en los alimentos, los cuales se pierden durante los procesos convencionales de secado. El proceso consta principalmente de dos pasos; el primero consiste en congelar el producto y en el segundo paso el producto es secado por sublimación directa del hielo bajo presión reducida. Es una técnica que da como resultado productos deshidratados de alta calidad debido a la ausencia de agua líquida y las bajas temperaturas requeridas en el proceso. El estado sólido de agua durante la criodesecación protege la estructura primaria y minimiza los cambios en la forma del producto, con una reducción mínima de volumen [Ratti, 2001].

En la criodesecación el agua sólida es removida como vapor desde una sustancia congelada. Para que esto ocurra, es necesario que la temperatura usada para secar el material esté por debajo de la correspondiente al punto triple del agua. La Figura 6 muestra el diagrama de fases del agua, en donde se explican los cambios físicos por los que pasa el agua al someter un material al proceso de criodesecación. Si se desea secar al vacío un producto que se encuentra en condiciones ambiente de temperatura y presión (A), se debe seguir la línea desde el punto A hasta B. Sin embargo, si el mismo producto se quiere liofilizar, se debe seguir la línea desde A hasta C, para lo cual debe congelarse primero (bajando su temperatura), y luego disminuir la presión de vapor de agua por debajo de la presión que corresponde al punto triple, pasando la línea de sublimación [Ratti, 2001].

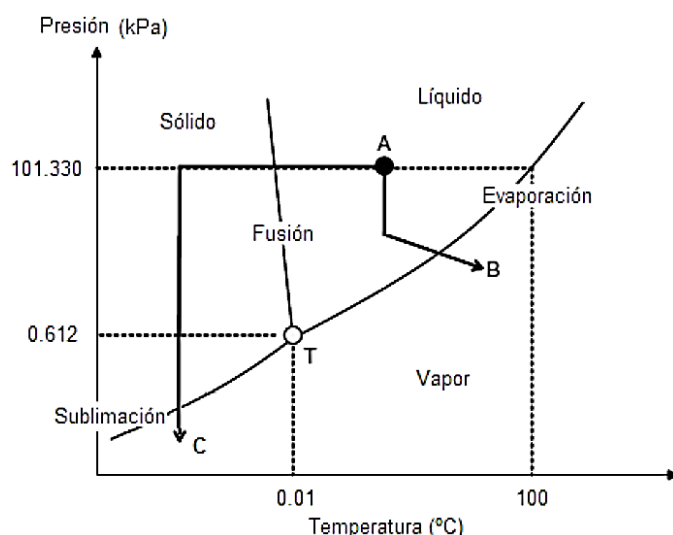


Figura 6. Diagrama de fase del agua

T: punto triple del agua

Fuente: Ratti [2009]

A pesar de las ventajas, la liofilización siempre se ha reconocido por sus altos costos de inversión, puesta en marcha y operación, además de las grandes cantidades de energía que se utiliza en el proceso [Liu *et al.*, 2008], por lo que para la gran mayoría de los productos no se justifica económicamente. Sus costos varían dependiendo del tipo de materia prima, el producto, el envase, la capacidad de la planta, duración del ciclo, etc. [Sunderland, 1980]. Comparado con el proceso de secado convencional con aire a altas temperaturas, los costos de la liofilización son entre cuatro y ocho veces mayores y del orden de cinco veces más que un secador por atomización a escala industrial [Hammami y René, 1997].

Sin embargo, es importante considerar toda la energía usada cuando se evalúan o comparan diferentes procesos. Por ejemplo, la comparación entre los costos de la liofilización con otros métodos de preservación de alimentos, como el congelado, es bastante ventajosa si se toma en cuenta la energía gastada en el almacenamiento en los hogares. También, la energía gastada en el proceso de criodesecación resulta insignificante cuando se trata de materias primas de gran valor.

5.2 Etapas de la criodesecación

La liofilización de un material húmedo se efectúa en tres etapas básicas (ver la Figura 7). Estas operaciones comprenden muchos procesos fundamentales que ocurren simultáneamente y las condiciones que gobiernan la velocidad en cada proceso deben optimizarse para un producto específico a fin de obtener una velocidad de secado satisfactoria.

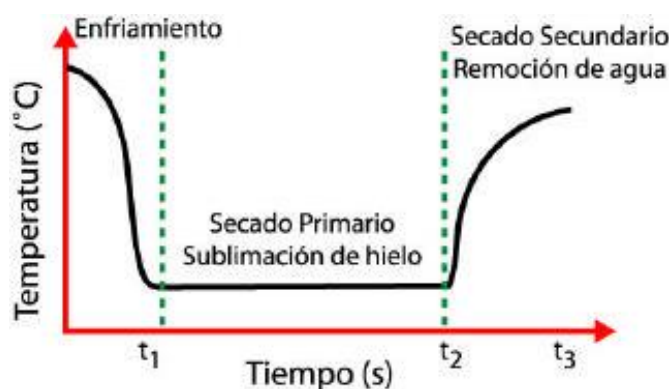


Figura 7. Etapas del proceso de liofilización

Fuente: Ramírez-Navas [2006]

Inicialmente, por congelación, se separa el agua de los componentes hidratados del producto mediante la formación de cristales de hielo o mezclas eutécticas. Al sublimar estos cristales, se elimina el agua del seno del producto. Cuando se ha eliminado todo el hielo, los sólidos remanentes todavía tendrán una pequeña cantidad de agua absorbida en el interior de la estructura de sus componentes. Esta agua residual puede eliminarse por evaporación en el equipo de liofilización, cosa que normalmente se hace elevando la temperatura del producto [Brennan, 1980].

5.2.1 Congelación

La temperatura y tiempo de congelación de productos alimentarios es función de los solutos en solución que contienen. La temperatura de congelación para el agua pura permanece constante en el punto de congelación hasta que el agua se ha congelado. Para los alimentos, la temperatura de congelación es más baja que para el agua pura, ya que los solutos del agua no congelada se van concentrando y la temperatura de congelación va disminuyendo continuamente hasta que la solución queda congelada. Al final de la congelación la masa entera del producto se ha convertido en rígida, formando un estado eutéctico que consiste en cristales de hielo y componentes del alimento. Se requiere llegar al estado eutéctico para asegurar la eliminación de agua sólo por sublimación y no por combinación de sublimación y evaporación. La permeabilidad de la superficie congelada puede verse afectada por la migración de componentes solubles durante la etapa de congelación. Sin embargo, la eliminación de la fina capa de la superficie del producto congelado, o la congelación bajo condiciones que inhiban la separación de la fase de concentrado, dan lugar a mejores velocidades de criodesecación [Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005].

En condiciones ideales, para realizar el proceso de criodesecación correctamente, debería congelarse todo el líquido presente en el alimento. En la práctica, sin embargo, esto no es posible y además siempre que la calidad de líquido remanente no congelado sea pequeña la calidad del producto no resulta seriamente afectada. La velocidad óptima de congelación con fines de criodesecación depende en gran parte de la naturaleza del producto. La variación en la velocidad de congelación afecta al tamaño de los cristales de hielo y por tanto al tamaño de poro en el producto seco, siendo de esperar, en consecuencia, que influya en la velocidad de desecación y en las características del producto, sobre todo en rehidratación. Las velocidades óptimas de congelación tienen que determinarse experimentalmente [Brennan, 1980]

La estructura celular puede dañarse durante la congelación perjudicando la textura del producto reconstituido y el producto seco es muy quebradizo y susceptible a daños mecánicos. Los alimentos de tamaño pequeño se congelan más rápidamente, dando lugar a cristales de hielo más pequeños que dañan menos su estructura. En los alimentos líquidos se procura que la congelación sea lenta, con objeto de que se forme una red cristalina que da lugar a la formación de canales por los que el vapor de agua puede escapar [Fellows, 1994].

5.2.2 Sublimación (deshidratación primaria)

La velocidad de deshidratación depende principalmente de la resistencia que el alimento ofrece a la transferencia de calor y en menor grado, a la transferencia de vapor (transferencia de materia) desde el frente de sublimación. La deshidratación primaria corresponde a la sublimación de toda el agua congelada del alimento, cuya velocidad es proporcional a la diferencia entre las presiones parciales de vapor de agua de hielo que se encuentran a nivel del frente de sublimación y sobre el condensador. Esta diferencia de presión depende directamente de la diferencia de temperatura entre

el producto todavía congelado y el condensador del criodesecador. Como las diferencias de presión de vapor que se manejan son muy bajas, se explica que la velocidad de criodesecación siempre sea pequeña, esto es la razón por la que se trabaja frecuentemente bajo vacío a una presión absoluta comprendida entre 13 y 267 Pa (lo ideal sería que la presión absoluta fuese próxima a un tercio de la presión parcial de vapor de agua a nivel del frente de sublimación) [Fellows, 1994].

La sublimación tiene lugar desde la superficie del hielo, de manera que, al proseguir, el límite del hielo se va retirando hacia el centro del alimento, es decir que el alimento se deshidrata desde la superficie hacia adentro. Finalmente, el último resto de hielo se sublima y la humedad del alimento queda reducida a menos de 5%. Ya que el alimento congelado permanece rígido durante la sublimación, las moléculas de agua que se escapan dejan huecos, lo cual resulta en una estructura seca, porosa y esponjosa. Por eso, los alimentos criodesecados se reconstituyen rápidamente pero tienen que ser protegidos mediante envases adecuados contra la absorción de humedad atmosférica y oxígeno [Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005].

El hielo sublima cuando se suministra la energía correspondiente al calor latente. La fuerza impulsora de la sublimación es la diferencia de presión entre la presión de vapor de agua en la interfase del hielo y la presión parcial de vapor de agua en la cámara de secado. A medida que la criodesecación progresa, el frente de sublimación se traslada hacia el interior del alimento y el calor latente para la sublimación se conduce hasta allí por conducción, o se genera en la masa del alimento por efecto de las microondas. El vapor de agua escapa del alimento a través de los canales formados por sublimación del hielo. El material congelado puede estar sujeto a una sublimación a presión atmosférica o bajo vacío [Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005]. En la Figura 8 se muestra el progreso del frente sublimación y la transferencia de calor y masa en el secado por congelación

La sublimación de los cristales de hielo puede considerarse comprendida por dos procesos fundamentales: transferencia de masa y transferencia de calor. Se suministra calor para sublimar los cristales de hielo y el vapor de agua generado es transferido fuera de la interfase de sublimación. La velocidad de deshidratación está limitada principalmente por la resistencia que el alimento ofrece a la transferencia de calor y en menor grado, a la transferencia de vapor (transferencia de materia) desde el frente de sublimación [Fellows, 1994].

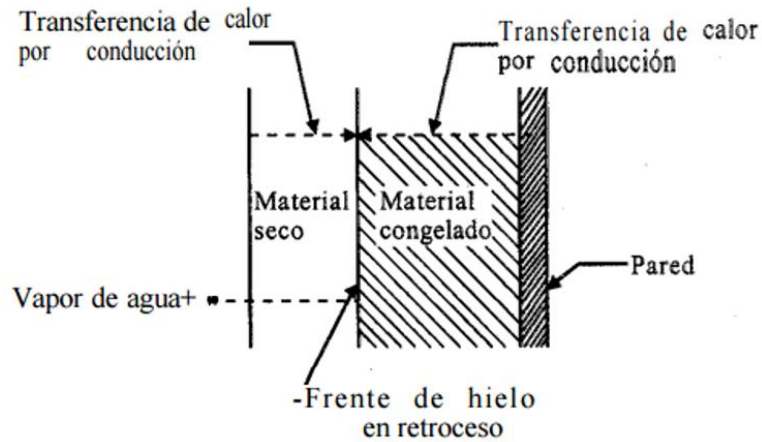


Figura 8. Transferencia de calor y masa en el secado por congelación

Fuente: Geankoplis [1998]

5.2.3 Desorción (deshidratación secundaria)

La etapa secundaria de secado comienza cuando se ha agotado el hielo en el producto y la humedad proviene del agua parcialmente ligada en el material que se está secando. En este momento la velocidad de calentamiento debe disminuir para mantener la temperatura del producto por debajo de los 30°C, lo que evita el colapso del material. Si la parte sólida del material está demasiado caliente, la estructura colapsa, lo que se traduce en una disminución de la velocidad de sublimación de hielo en el producto [Ibarz y Barbosa-Cánovas, 2005]. En esta etapa, la pérdida de agua se produce por deshidratación evaporativa (desorción) del agua no congelada, el contenido de agua se reduce hasta el 2% (sobre peso húmedo). La desorción se consigue manteniendo el liofilizador a baja presión y elevando la temperatura hasta un valor próximo a la temperatura del ambiente.

6 CRIODESECACIÓN ATMOSFÉRICA

6.1 Principios básicos

La criodesecación atmosférica CDA (*Atmospheric Freeze Drying*) consiste en un secado convectivo, proceso en el que la temperatura del aire tiene que ser mantenida por debajo del punto de congelación del material procesado y la humedad relativa tiene que ser en general muy baja. Puesto que el aire no está saturado con vapor de agua, se crea un gradiente de presión parcial del vapor de entre el producto y el aire, forzando al hielo a sublimar y al vapor de agua a difundirse en el aire [Bantle y Eikevik, 2011; Meryman, 1959]. Los procesos de CDA constan de tres etapas: la primera de congelación, la segunda de sublimación que retira la mayor cantidad de agua disponible en los primeros minutos [Xu *et al.*, 2015b] y que se realiza a temperaturas bajo cero y una etapa de evaporación que permite acelerar los tiempos de proceso, en su mayoría ralentizados en la parte final de la primera etapa [Alves-Filho, 2010]. En la Figura 9 se muestra un breve resumen acerca de la CDA.

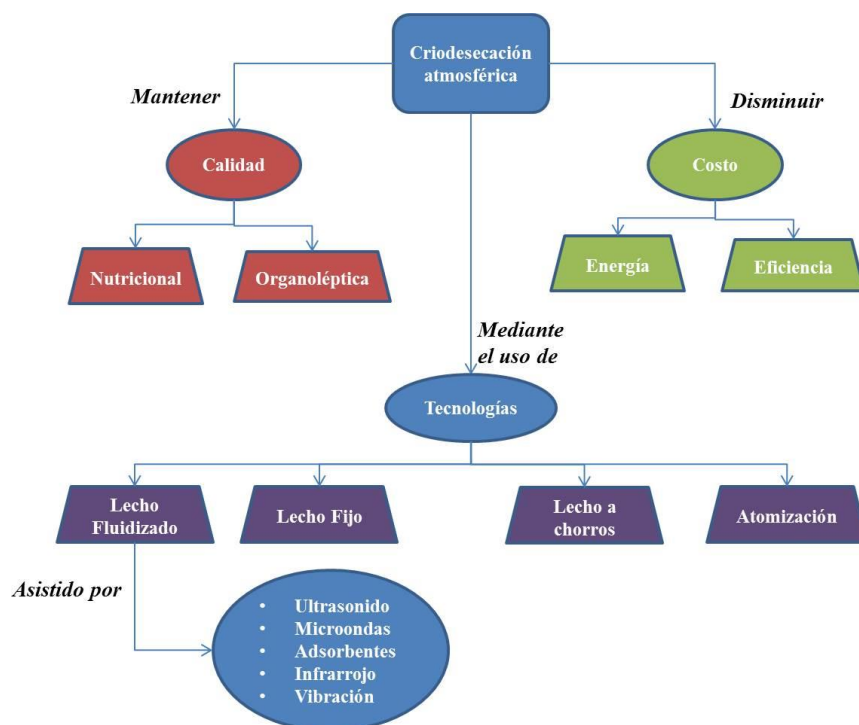


Figura 9. Diagrama sobre aspectos principales de la criodesecación atmosférica

Meryman [1959] en una serie de experimentos demostró que la difusión de vapor de agua desde el límite de secado a través de la capa seca se produce por un gradiente de presión de vapor y no por la presión absoluta en el sistema. Por lo tanto, es posible realizar criodesecación a presión atmosférica. Este proceso se logra mediante la circulación de aire frío y seco generalmente a una temperatura entre -6°C a -10°C sobre un producto congelado con el fin de mejorar la transferencia de calor y masa. El único requisito es que la presión parcial de vapor de agua en el medio de secado

se mantenga lo suficientemente baja que proporcione una fuerza motriz para la transferencia de masa de vapor de agua desde la muestra congelada.

Heldman y Hohner [1974] analizaron la cinética de secado de la CDA, la cual se presenta esquemáticamente en la Figura 10. Con base a pruebas experimentales y al desarrollo de un modelo matemático, llegaron a la conclusión de que la principal limitante económica es la lenta velocidad de secado, controlada por la difusión molecular de vapor de agua en la estructura seca del producto, y que la reducción de tamaño y el incremento del coeficiente superficial de transferencia de masa ofrecen las mejores posibilidades para acelerar el secado.

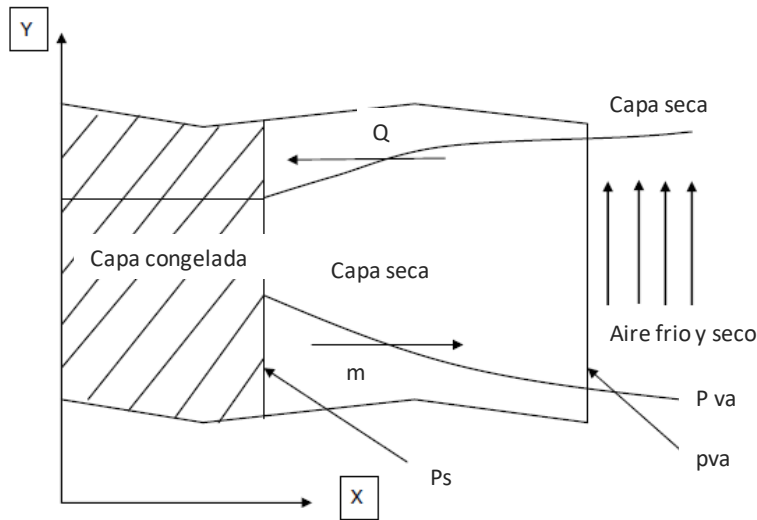


Figura 10. Diagrama esquemático de la criodesecación atmosférica.

Q, transferencia de calor; m, transferencia de masa; P va, gradiente de presión parcial; Ps, presión parcial de vapor de agua alrededor de la superficie del producto; pva, presión parcial de agua en la cámara de secado
Fuente: Heldman y Hohner [1974].

Charm [1981] indicó que las bases que gobiernan la CDA son similares a las del secado convencional por aire. por tanto, recomiendan utilizar la ecuación siguiente, considerando un único período de secado a velocidad constante.

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = k_m^* A(H_m - H_a) = \frac{h_t A(T_a - T_w)}{\lambda} \quad (1)$$

Dónde: W = contenido de agua [kg/kg seco], t= tiempo (s), k* = coeficiente de transferencia [kg/m².s], A = área [m²], H = humedad [kg agua/kg aire], h = coeficiente de transferencia de calor [W/m².K o W/m².°C], T = temperatura [°C], λ = calor latente de sublimación [J/kg]

La Ecuación 1 que considera a la transferencia de masa; lleva a determinar el coeficiente superficial de transferencia de masa k_m^* con base a datos experimentales. Igualmente considera a la

transferencia de calor, con lo que se puede determinar el coeficiente total de transferencia de calor h_t [Alvarado [1996].

Burke y Decareau [1964] indicaron que la Ecuación 1 es efectiva únicamente para el inicio del secado, dado que no considera las variaciones en los coeficientes de transferencia según avanza el proceso. Adicionalmente mencionan que, prácticamente en todos los casos, el secado por CDA es descrito por la ecuación siguiente:

$$W = K^{\wedge} e^{-t/b} \quad (2)$$

Al graficar los datos experimentales según este modelo, la constante K generalmente fue diferente de uno, lo que indica que la ecuación no se aplica en la fase inicial de secado, o cuando las condiciones varían al inicio del proceso. En un proceso estable y continuo este valor se aproxima a la unidad. El término b es una constante [Alvarado [1996].

Schmidt *et al.* [1977] para el caso de CDA, y considerando la disminución de volumen observada al secar zanahorias cortadas en cubos, flujo de calor y masa unidireccional, frente agudo de secado, proceso de transferencia en estado no estacionario, propiedades térmicas constantes, distribución uniforme de temperatura en la zona congelada y efectos secundarios pequeños, desarrollaron la siguiente ecuación:

$$T_g - T_h = -\left(\frac{y\lambda}{3V_w}\right)\left(\frac{\Delta W}{\Delta t}\right)\left(\frac{1}{h}\right) + \left(\frac{y}{k}\right)\left(\left(\frac{1}{W_{0.33}}\right) - 1\right) \quad (3)$$

Heldman y Hohner [1974] indicaron que en CDA, el mecanismo que controla la velocidad de secado es la difusión molecular del vapor de agua a través de la estructura seca del producto. Al contrario, en el secado por liofilización con vacío, el mecanismo limitante habitualmente es la transferencia de calor. Para el cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de vapor de agua en la zona porosa propusieron la siguiente ecuación:

$$D_E = \frac{BDM}{P(RG)(TA)} \quad (4)$$

Dónde: D = coeficiente de difusión [m^2/s], B = constante de la ecuación, (DM) = densidad de la materia seca [kg/m^3], P = presión [Pa], (RG) = constante de los gases [$8314,34 m^3.Pa/kg \text{ mol.K}$], (TA) = temperatura absoluta [K o R]

En esta ecuación D corresponde a la difusividad entre el aire y el vapor de agua como gases libres, a y una atmósfera de presión es $0,22E-4$ [m^2/s], multiplicada por la presión atmosférica y la constante B determinada experimentalmente [Alvarado [1996].

Heldman y Hohner [1974] concluyeron que el efecto del tamaño de partícula y el coeficiente superficial de transferencia de masa, sobre la velocidad de secado en CDA, puede ser representado mediante un número adimensional, que relaciona el cociente entre la transferencia externa y la transferencia interna de masa en la muestra, descrito por:

$$N_H = \frac{k_D^* \delta}{D_E} \quad (5)$$

Por reemplazo de D_E (Ecuación 4) se obtiene:

$$N_H = \frac{k_D^* P(RG)(TA)}{BDM} \quad (6)$$

En estas ecuaciones, k_D^* es el coeficiente superficial de transferencia de masa.

El número adimensional N_H , según lo indicado por Heldman y Hohner [1974], es similar al número de Biot, y permite definir las condiciones en las cuales el proceso es controlado por el mecanismo de transferencia de masa interna.

Al tener un número mayor a 100 en el número adimensional N_H , se establece que el proceso es controlado por el mecanismo de transferencia de masa interna, valores menores a 100 muestran que el mecanismo predominante es la transferencia de masa superficial [Alvarado [1996].

De la Ecuación 7 se obtiene el valor de pendiente $k_m^* A(H_m - H_a)$, donde se despeja (k_m^*) el coeficiente superficial de transferencia de masa [Alvarado [1996].

$$\Delta W = k_m^* A(H_m - H_a) \Delta t \quad (7)$$

Teniendo en cuenta la transferencia de calor, se puede escribir:

$$\Delta W = \frac{h_t A(T_a - T_w)}{\lambda} \Delta t \quad (8)$$

De la Ecuación 8 se obtiene el valor de pendiente $\frac{h_t A(T_a - T_w)}{\lambda}$, donde se despeja (h_t) el coeficiente total de transferencia de calor [Alvarado [1996].

Alvarado [1996] en su estudio de CDA de papas aplicando experimentalmente las ecuaciones anteriores, obtuvo valores de coeficientes de transferencia de masa y calor en el mismo orden de magnitud que los reportados para superficies en contacto con aire en movimiento.

En el proceso de construcción de modelos se deben tener en cuenta suposiciones y para el caso de este fenómeno en particular la más usada es la difusión que se realiza al interior del alimento por diferencia de concentraciones [Santacatalina *et al.*, 2011]. Por otra parte, los mismos autores suponen que como consecuencia del dominio de la resistencia interna, la externa puede ser ignorada, así como también los efectos por encogimiento, lo que conduce a modelos aproximados para describir el fenómeno.

Stawczyk *et al.* [2006] validaron la implementación de un modelo de mecánica de fluidos computacional (CFD) para obtener de manera numérica el perfil en los parámetros de secado CDA.

Emplearon en manzana las suposiciones y los modelos de la capa límite de sublimación y compararon los valores obtenidos con los experimentales. Los resultados muestran la dependencia del proceso por la difusividad interna, además calcularon valores de porosidad, tortuosidad y difusividad efectiva para solucionar el modelo.

Bantle *et al.* [2011] realizaron estudios de CDA sobre manzanas, guisantes verdes, piñas y zooplancton para determinar el ajuste del modelo empírico de Weibull en dicho proceso. Estudiaron diferentes temperaturas, velocidades del aire y tamaños de partículas y a través de regresiones no lineales concluyeron que el modelo representaba bien el fenómeno y que éste dependía principalmente de la resistencia interna. Todos estos modelos se basan en la teoría de la capa límite.

Las simulaciones numéricas de dos dimensiones fueron usadas para estudiar los fenómenos que ocurren en la capa límite en el proceso de CDA [Bubnovich *et al.*, 2012]. Así pues, el método de diferencias finitas se adecuó correctamente para explicar el movimiento en la interfaz de CDA. En este estudio, también concluyeron que en zanahoria la comparación unidireccional y bidireccional de la transferencia de masa y calor se mostraban menos diferencias a medida que se reducía el radio y la configuración se aproximaba a una placa infinita.

6.2 Influencia de parámetros del proceso CDA

La influencia de diferentes factores como temperatura de aire y tamaño de partícula es esencial. La CDA de partículas pequeñas presenta en muchos casos el mismo efecto de secado que las sometidas a liofilización con vacío. En el proceso de congelación, la temperatura usada es la más crítica a lo largo de todo el proceso ya que ésta influye en la estructura final del producto (rápida congelación conforman cristales pequeños) [Mumenthaler y Leuenberger, 1991].

Reyes *et al.* [2011] estudiaron el efecto de múltiples variables en la CDA y a liofilización de rodajas de manzana. Para esto usaron un diseño de experimentos factorial donde se tuvo en cuenta tamaño de partícula, tasa de enfriamiento, radiación infrarroja y temperatura de aire sobre las variables de salida contenido de agua, tiempo de secado, estructura y color. Los autores señalan que tanto el tamaño de partícula como la intensidad de la irradiación son los factores que más afectan en ambos procesos y la temperatura de aire sólo en la segunda etapa de proceso, en concordancia con otros estudios. Se sugiere que el congelado rápido en el proceso CDA es mejor por tener cristales más pequeños, menor daño y mejor rehidratación del producto final. Caso contrario para los experimentos con liofilización al vacío.

En el proceso CDA, el espesor de las muestras resulta crucial en el momento de rehidratar ya que aumentos en el mismo no favorecen el proceso. La rehidratación ocurre en los primeros instantes cuando el agua encuentra suficientes poros vacíos para llenar y luego cae drásticamente.

Generalmente, la estructura colapsa cuando el agua no puede pasar por los poros que no han sido correctamente formados [Reyes *et al.*, 2011].

También se debe destacar que los procesos de CDA no son estacionarios ya que se presentan continuos cambios en las propiedades difusivas del material con el paso del tiempo. Esto es debido a las variaciones en las resistencias internas o externas del producto en el secado: a medida que las capas de humedad son retiradas, la resistencia interna aumenta y el proceso de secado se torna más lento [Alves-Filho *et al.*, 2007]. Obtener las cinéticas de procesos no estacionarios como éstos permiten determinar cuándo se debe detener el secado para ahorros energéticos considerables. Se ha concluido que controlar los factores externos frente a los internos es mucho más factible, ya que los primeros pueden ser más fácilmente manipulables en los procesos de secado debido a que se refieren a las condiciones ambiente de la operación. Conociendo dichos parámetros se puede predecir fácilmente todos los mecanismos del proceso de secado [Boeh-Ocansey, 1988].

El estudio del efecto de la temperatura de proceso ha presentado múltiples perspectivas. La CDA se lleva a cabo generalmente a temperaturas entre -10°C y el punto de congelación inicial del producto; este parece ser un buen rango de temperatura que beneficia los costos y calidad del producto final [Claussen *et al.*, 2007c; Wolff *et al.*, 1990; Wolff y Gibert, 1990a].

Bórquez *et al.* [2013] liofilizaron microorganismos lácticos y se estudiaron las cinéticas de secado con base al cambio de temperatura. En este caso, el proceso CDA se realizó a temperaturas por debajo del punto de fusión del agua, pero más altas respecto al proceso con vacío (-10°C hasta -5°C), teniendo en cuenta que a temperaturas más bajas el aire húmedo seca menos y el proceso se alarga. No obstante, los mismos autores en sus revisiones de la literatura indican el uso de temperaturas por encima del punto de congelación del agua en diferentes partes del proceso final para acelerar la cinética. En la Figura 11 se muestra la viabilidad del proceso CDA para *Lactobacillus acidophilus*.

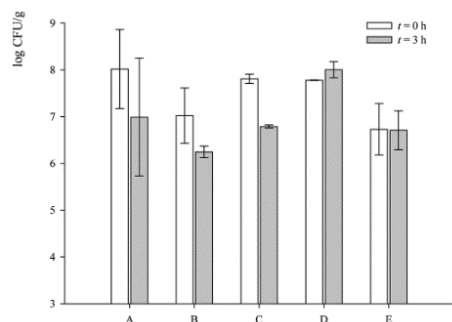


Figura 11. Viabilidad de la cepa de *Lactobacillus acidophilus* en el proceso CDA

Al inicio $t=0$ h y al final de la CDA $t=3$ h; A-B-C-D-E: Agentes protectores

Fuente: Bórquez *et al.* [2013]

De acuerdo a lo presentado en la Figura 11, el uso de CDA no disminuyó la viabilidad de la cepa, los medios de protección en este caso determinan la mayor o menor viabilidad.

Stawczyk *et al.* [2006] realizaron un estudio sobre la variación de la temperatura de aire de secado en manzanas, en el cual se plantearon dos experiencias: la primera utilizando temperaturas de secado constante y la segunda una combinación de temperaturas, en la Figura 12 se muestra el resultado del estudio realizado a temperatura constante (CT).

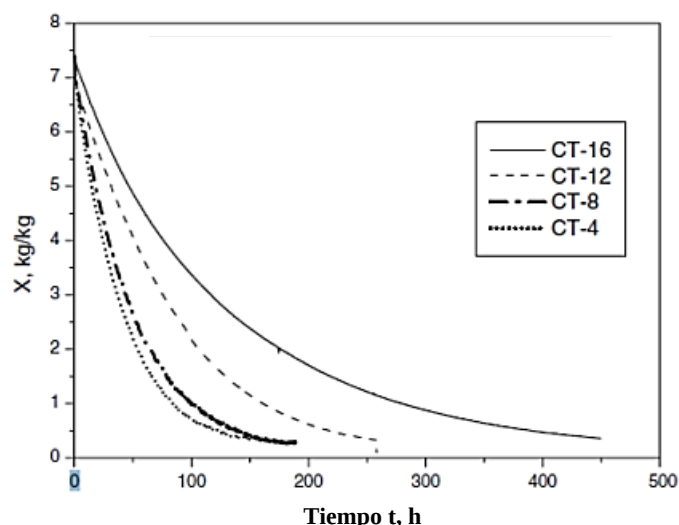


Figura 12. Curvas de secado de manzana a diferentes temperaturas

Fuente: Stawczyk *et al.* [2006]

De acuerdo a los resultados obtenidos del estudio, se tienen menores tiempos de secado a temperaturas cercanas a 0°C, sin embargo, las características de calidad son mejores a temperaturas por debajo de -10°C, adicionalmente, la evaluación de calidad de las muestras sometidas CDA fueron similares a las obtenidas mediante liofilización. En la segunda experiencia de combinación de temperaturas condujeron el experimento a una temperatura de -8°C y 22°C, dicha combinación mostró mejor rendimiento en el tiempo de secado, sin embargo, las características de calidad no fueron satisfactorias.

Se ha identificado el uso de rampas de temperatura para controlar el proceso como actividad frecuente. De esta manera, Reyes *et al.* [2010b] emplearon una rampa de temperatura para estudiar el efecto de este parámetro en el proceso de CDA de zanahoria. En las primeras cinco horas trabajaron a -15 °C para luego variar la temperatura entre -5 °C y 0°C, se compararon los efectos con un proceso a temperatura constante. Una importante reducción del tiempo de secado se observó cuando en la segunda etapa de secado incrementaron la temperatura.

Xu *et al.* [2015b] estudiaron la deshidratación de rodajas de ajo. Sugieren que el conocimiento del punto de congelación en cada parte de la deshidratación es de suma importancia para evitar el

colapso de la estructura. Por lo tanto, requirieron del uso de un sistema de control automático de la temperatura en el aire de entrada de tal manera que esta variara según el contenido de agua. No obstante, cuando las muestras estuvieron por debajo del 30% de humedad, punto hasta el cual la mayor parte del agua retirada se debe a sublimación, el secado se hizo más lento. Otra gran parte de agua fue retirada a través de evaporación razón por la cual se necesitó aumentar la temperatura por encima de cero para obtener velocidades de secado normales. En este mismo estudio, el sistema de cambio gradual de temperatura fue comparado con un sistema fijo; éste último no ayudó a conservar la estructura del producto seco. En sus estudios de CDA de cubos de manzana Duan *et al.* [2013] señalan que el empleo de un programa de monitoreo de temperatura permitiría reducir el tiempo de secado hasta en un 50%.

En general, como muchos experimentos lo han señalado, el aumento de la temperatura en el transcurso del proceso propicia mayores cinéticas de secado. Así lo confirmaron Rahman y Mujumdar [2008] cuando observaron el avance del secado y notaron que el grosor del alimento disminuía y con ello la velocidad de secado por aumento de la resistencia interna. De esta manera, se puntualiza en la importancia de aumentar la temperatura en el control de la cinética de secado.

Duan *et al.* [2013] en el diagrama de barras representado en la Figura 13 permite observar la influencia de la temperatura en diferentes formas (estática a dos temperaturas y cambiante) en dos propiedades organolépticas de manzanas deshidratadas por CDA.

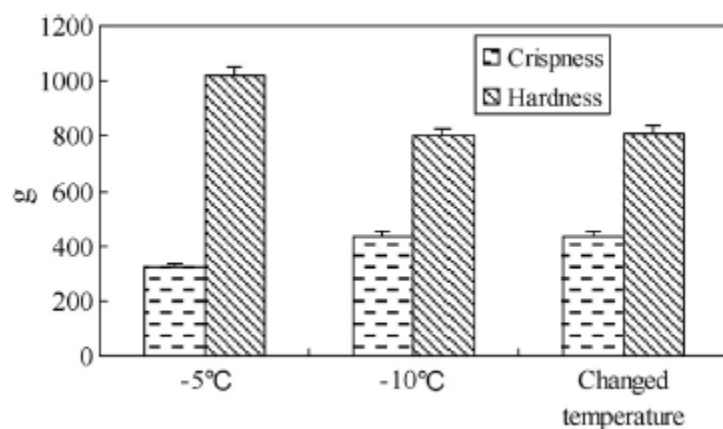


Figura 13. Efecto de temperaturas fijas y variables en propiedades organolépticas

Dureza (*hardness*) y crujencia (*crispness*) de cubos de manzana en una escala de fuerza requerida por texturómetro (g-fuerza)

Fuente: Duan *et al.* [2013]

De acuerdo a la Figura 13, el efecto de utilizar temperaturas variables y fija a -10°C es el mismo, para la temperatura constante de -5°C se obtiene mayor dureza y disminuye la crujencia, la elección de la temperatura de trabajo está ligada a las características de calidad deseadas, en el estudio faltó un análisis comparativo con fruta fresca que brindaría información sobre el comportamiento del producto final.

El seguimiento del punto de rocío del aire de salida también puede significar una alternativa para controlar el proceso ya que cuando se equiparan los valores de dicha temperatura a la entrada y salida se considera que el secado ha terminado [Mumenthaler y Leuenberger, 1991]. Estos autores demostraron una mayor influencia de la velocidad del aire sobre el proceso de secado de acuerdo a lo expuesto en la Figura 14, adicional identificaron las tres etapas donde se produce:

- Una primera etapa con un secado tortuoso, a temperaturas muy bajas dado que la difusividad se complica a dichos valores
- Una segunda donde se reduce la temperatura a valores cercanos a 0 y se presenta la mayor tasa de secado
- Y finalmente, cuando ya queda poca humedad por retirar, el proceso se ralentiza nuevamente debido a la alta tortuosidad causada por los poros y la baja difusión de vapor al interior del producto.

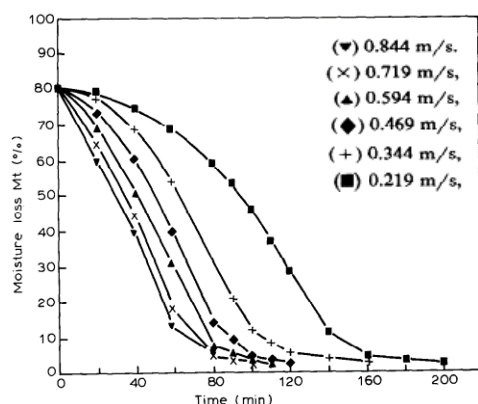


Figura 14. Efecto de las velocidades de aire de secado sobre el tiempo de sublimación de solución acuosa de manitol al 20%.

Fuente: Mumenthaler y Leuenberger [1991]

En términos generales, el incremento de temperatura conduce a un aumento las cinéticas de secado en las primeras etapas, pero debe considerarse modificarlas en las siguientes etapas dado que el aumento del encogimiento y la resistencia interna se hacen mayores, en la Figura 15 se observa el efecto que la temperatura tiene sobre las cinéticas de secado. De igual manera, se menciona que en la segunda etapa de secado se sube la temperatura para eliminar el agua restante de la segunda etapa. Sin embargo, se aconseja no aumentarla mucho para evitar problemas de biodegradación o polimerización de proteínas [Nireesha *et al.*, 2013].

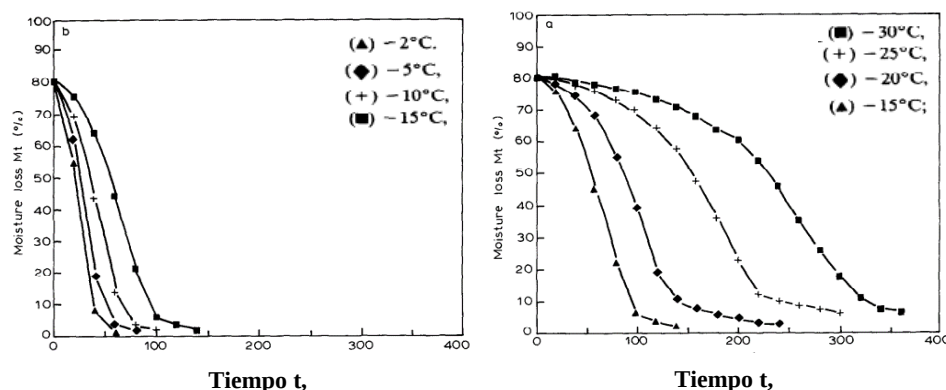


Figura 15. Efecto de la temperatura en las cinéticas de secado de solución acuosa de manitol al 20%.

Fuente: Mumenthaler y Leuenberger [1991]

6.3 Influencia del proceso CDA sobre las características de calidad

La liofilización, en cualquiera de sus formas como el método de secado más llamativo, se debe a su impacto moderado sobre las cualidades organolépticas del producto final. Cuando se estudian los efectos en la porosidad, encogimiento y densidad aparente que ejercen diversos métodos de secado (liofilización, osmosis, aire caliente, lecho fluidizado) en alimentos seleccionados, se observa que la liofilización es el único donde se presenta disminución de la densidad aparente con la disminución de la humedad total [Koc *et al.*, 2008]. Como se ha mencionado, en muchos otros estudios, los menores valores de encogimiento y los más altos para porosidad se encuentran en la liofilización. Esto ocurre debido a la eliminación de agua que se produce sin pasar por la fase líquida, lo que evita la tensión superficial y ésta a su vez en un colapso de la estructura del alimento. La estructura obtenida del alimento sometido a CDA es altamente porosa, lo que facilita la rápida y casi completa rehidratación [Claussen *et al.*, 2007b].

6.3.1 Efectos sobre la dureza

Los valores de dureza obtenidos del texturómetro en la evaluación de diferentes secados de berenjenas [Santacatalina *et al.*, 2011] posicionan a la técnica CDA en rangos intermedios de impacto sobre propiedades organolépticas frente a los otros dos secados (con aire caliente y liofilización). La deshidratación implica una alta degradación de la estructura de la berenjena, por lo tanto, las muestras rehidratadas no recuperan la textura inicial. Independientemente del método de secado, muestras secas y rehidratadas eran mucho más suaves que la berenjena fresca, esto demuestra que debe evaluarse su implementación en términos de calidad de producto final. Para este proceso no se presentó encogimiento significativo en ninguna de las muestras.

6.3.2 Efectos sobre el encogimiento final

Según Ratti [2001] cuando se comparan métodos de secado se devela que el mayor cambio que ejercen dichos procesos sobre el alimento está dado por el encogimiento final. Dicho factor de salida en los experimentos es mucho menor en los procesos CDA que aquellos donde se utiliza aire caliente. Teniendo en cuenta lo anterior, Claussen *et al.* [2007c] estudiaron las propiedades estructurales y fisicoquímicas en muestras de manzana, repollo y bacalao (isotermas de sorción, descenso del punto de congelación, cinéticas de secado y encogimiento) tras aplicarse la criodesecación atmosférica. Se evidenció mayor encogimiento en las muestras a -5 °C que a -10 °C por lo que la temperatura de secado claramente influyó el proceso de encogimiento.

Reyes *et al.* [2010b] estudiaron la influencia de parámetros como tamaño de partículas, velocidad del aire, temperatura de secado, velocidad de congelamiento y uso de infrarrojo y demás en el proceso de encogimiento como atributo sensorial de alta importancia para el secado de zanahorias con CDA y lecho fluidizado. El parámetro más influyente fue la velocidad del aire de secado, mientras que el proceso de secado en sí mismo mejoró a pequeños tamaños de partículas, temperaturas de secado más altas, cristales de hielo más grandes. Cuando se presenta el congelamiento, en el alimento se separa el agua libre de la ligada en formas de cristales de hielo para la primera y una estructura vítrea con solutos en el segundo caso. Esta estructura tiene una temperatura por encima de la cual se colapsa y se conoce como temperatura de transición vítrea. El encogimiento relacionado tiene su explicación en el colapso de la débil estructura formada en la criodesecación por efecto de factores externos, entre ellos la temperatura de transición vítrea.

La formación de cristales de hielo grandes o pequeños están relacionados directamente con la matriz a deshidratar, los cristales grandes son favorables para matrices que requieren rápidos tiempos de secado y rápida rehidratación, donde las características de calidad cualitativas no son tan críticas. Al tener cristales de hielo pequeños en una matriz, se tienen matrices con menos porosidad por tanto, la velocidad de secado es menor y los efectos en las características de calidad son menos notorios.

Evaluando diferentes temperaturas de aire de secado en criodesecación atmosférica de ajo, Xu *et al.* [2015b] encontraron que al mantener temperaturas fijas de secado a -5°C y -10°C, los ajos presentaban daños en la estructura y por ende baja calidad; además, al incorporar una variación de temperaturas mediante un programa electrónico los productos obtenidos mejoraron sus características generales de calidad y menor tiempo de proceso.

6.3.3 Efectos sobre la porosidad

Aunque el encogimiento es uno de los factores más estudiados, para el caso particular de la liofilización, la porosidad es uno de los más interesantes. Stawczyk *et al.* [2007] evidenciaron que

los poros del proceso de vacío para muestras de quitosano resultaron ser hasta cinco veces más grandes que los presenciados en la CDA y los de éste, a su vez, más grandes que en el proceso de aire caliente. A pesar de esto, la presencia de dichos poros en el proceso CDA es una característica de calidad deseada ya que propicia una correcta rehidratación del producto.

Las Figuras 16 y 17 muestran las tomas fotográficas realizadas por Wang *et al.* [2006] en sus estudios de secado de partículas atomizadas mediante liofilización y CDA. En ellas muestra la estructura formada, los poros y cómo el efecto de una mala temperatura puede conducir a colapsos en la estructura.

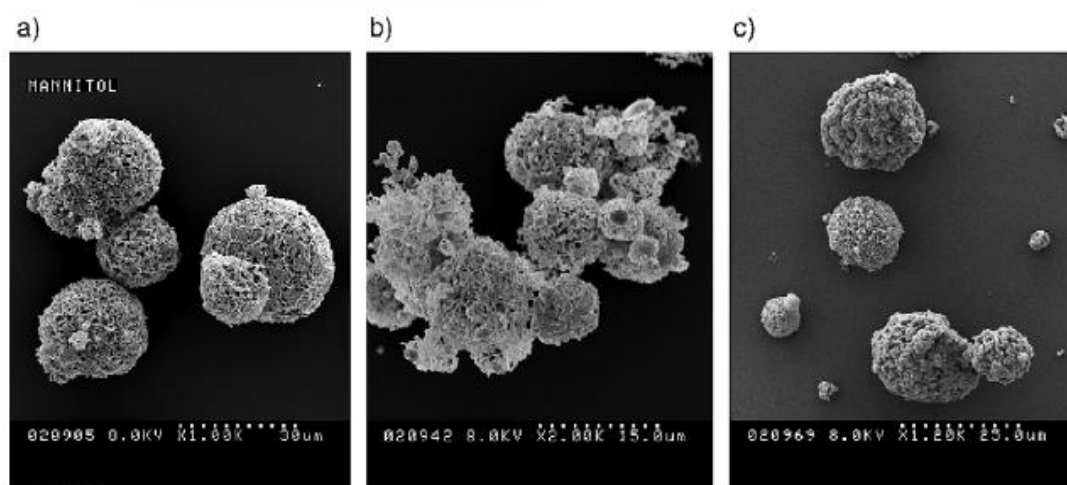


Figura 16. Fotos de barrido electrónico para partículas a través de spray freezing con a) Manitol al 20% y liofilización b) Manitol al 20% y proceso atmosférico CDA c) leche desnatada con *B. pertussis* avirulento en CDA

Fuente: Wang *et al.* [2006]

En la Figura 16 se observa la diferencia entre las estructuras del polvo obtenido mediante aspersión en liofilización (a) y CDA (b), para el manitol en CDA (b) se tiene una estructura colapsada y poco esférica a diferencia del proceso con liofilización (a), esta diferencia puede ser causada por la exposición del manitol al aire de secado en CDA.

Las partículas de leche desnatada en proceso CDA (c), se observan más sólidas y esféricas en comparación a las partículas de manitol en CDA, las cuales se ven claramente más porosas. En conclusión y tomando las fotografías como soporte, el tipo de matriz deshidratada tiene efectos sobre las características del producto final, en este caso manitol poroso y amorfo contra leche desnatada menos porosa y de forma esférica.

6.3.4 Temperatura de transición vítrea

Un material no cristalino puede existir en el estado vítreo o en el estado líquido sobre-enfriado (“gomoso” o “rubbery”) dependiendo de la temperatura y de la presencia de agua. El cambio entre estos dos estados, se conoce como transición vítrea. El término transición vítrea se refiere a la

temperatura a la cual los vidrios inorgánicos empiezan a ablandarse y fluir. Por debajo de la temperatura de transición vítrea (T_g), que es característica de cada sistema, el material es un sólido amorfo (vidrio) altamente viscoso. Su aspecto es el de un sólido rígido quebradizo caracterizado por una altísima viscosidad alrededor de 10^{12} a 10^{14} Pa.s [Agudelo, 2012].

Las propiedades típicas de la mayor parte de los materiales vítreos (llamados frágiles) son la fragilidad y la transparencia. La movilidad molecular en los vidrios está restringida a vibraciones y movimientos rotacionales de rango corto. Los cambios que ocurren en el estado vítreo, generalmente llamados “envejecimiento físico”, son extremadamente lentos, y, por lo tanto, los sistemas se pueden considerar estables a cambios físicos y químicos. Por lo general, los alimentos vítreos son considerados estables, y el estado vítreo tendría potencialmente gran importancia para las características texturales de los alimentos crocantes tales como papas fritas, galletas y snacks extrudados [Agudelo, 2012].

La transformación de materiales vítreos en líquidos superenfriados viscosos ocurre en el rango de la temperatura de transición vítrea. Es importante notar, que, sobre el rango de la T_g , un cambio de pocos grados de temperatura puede provocar en los materiales frágiles, una disminución significativa en la rigidez. El cambio en la rigidez es particularmente importante para la estructura y estabilidad de alimentos. A temperaturas superiores a T_g , el aspecto del material (en estado sobre-enfriado) es muy distinto al del vidrio, es deformable debido a la flexibilidad de sus moléculas. Ya que en los materiales sobre-enfriados las moléculas tienen mayor movilidad que en el vidrio, son más susceptibles a que en ellos ocurran cambios físicos o químicos. En este sentido la T_g fue considerada como un “punto crítico” o una “barrera” para los cambios en lo que respecta a ciertos aspectos de la estabilidad de sistemas amorfos [Agudelo, 2012].

Cuando se congela un alimento y/o se reduce su contenido de agua es de gran utilidad representar los fenómenos los diagramas de fase suplementados que contienen información sobre los estados de equilibrio termodinámicamente estables y metaestables e incluyen la noción de tiempo completando así la información de los diagramas de fase [Fennema, 2000].

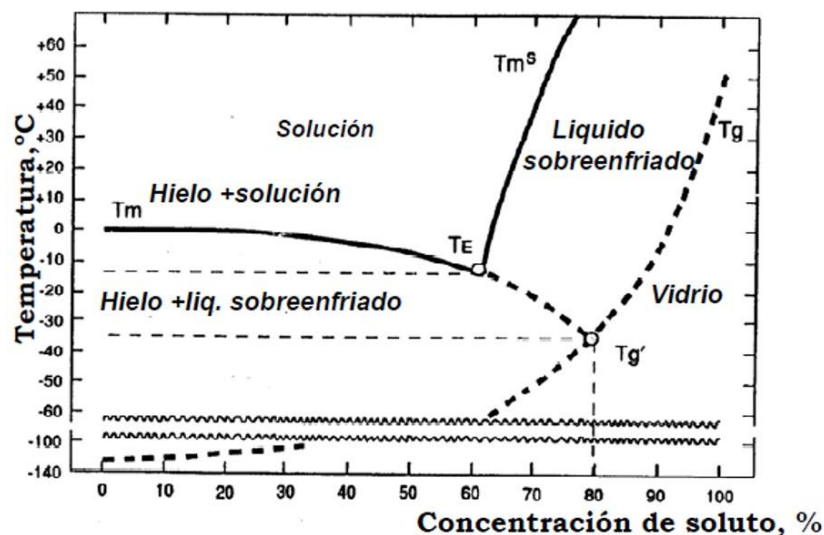


Figura 17. Diagrama de fases temperatura-composición suplementado de una mezcla binaria soluto/agua.

Fuente: Fennema [2000]

La Figura 17 representa a un diagrama de fase temperatura-composición de una mezcla binaria, suplementado (con las líneas discontinuas) delimitantes de los diversos estados metaestables. Cuando el agua se encuentra formando parte de una mezcla binaria con un soluto es importante determinar cuáles son las fases presentes en función de la composición, temperatura o de la presión. Dichas curvas (temperatura de transición vítrea (T_g), fusión de hielo (T_m), Solubilidad (T_{ms})) definen regiones de estabilidad variable. El punto (T_g' , C_g') en el diagrama de estado definido por la intersección de las curvas de fusión (T_m) y de T_g corresponde a una concentración de soluto/temperatura particular a la cual la cristalización de agua está inhibida cinéticamente. C_g' es la concentración correspondiente a la matriz máximamente concentrada por formación de hielo, es decir que a C_g' se alcanza la mínima cantidad de agua asociada a la fase amorfa que se puede alcanzar por crioconcentración. T_g' es la temperatura de transición vítrea correspondiente a esa matriz máximamente concentrada. Este valor es independiente de la concentración inicial, sólo depende de la composición o tipo de soluto [Fennema, 2000].

Por lo tanto, cada sistema tendrá su diagrama de estado característico que diferirá cuantitativamente pero no cualitativamente del diagrama mostrado en la Figura anterior y se determina generalmente por DSC a partir de soluciones que fueron almacenadas en condiciones de máxima formación de hielo. La formación de hielo se favorece congelando muy lentamente, y se hace máximo a temperaturas entre T_E (punto eutéctico) y T_g . A temperaturas mayores de T se produce la fusión de hielo y a inferiores de T_g el sistema es altamente viscoso y la cristalización está impedida. Conocer el valor de T_g' es importante para evaluar la estabilidad de productos congelados (los cuales a T_g' son estables, sin cristalización de agua por largos períodos de tiempo) [Fennema, 2000].

Khalloufi y Ratti [2003] plantearon conocer el punto de transición vítrea de los alimentos para predecir el rango de temperaturas a usar, evitando colapsos en la estructura cuando se sobrepasa dicho punto. Los colapsos en la estructura no sólo representan un problema a nivel textural y organoléptico sino también un problema cuando se pretende rehidratar el producto. Dicha temperatura de transición vítrea, que se define como el paso de un estado vítreo a uno gomoso en un sistema amorfo, puede ser calculada a través de relaciones con la composición del alimento. Así, conociendo la temperatura vítrea de cada compuesto y su ponderado en el alimento se puede obtener una aproximación en el producto completo.

Por otro lado, Oikonomopoulou y Krokida [2012] determinaron que el punto de transición vítrea disminuía con el aumento de la humedad en contraste con otros estudios. Esto se debe a que mayor presencia de agua móvil en la estructura amorfa conlleva a disminución de la viscosidad de la mezcla y mayor plasticidad de la misma. Además, cuando la temperatura está por encima de dicho punto, la viscosidad del material disminuiría y la estructura colapsaría. Entre mayor sea la diferencia entre la temperatura de trabajo y la temperatura de transición vítrea, mayor será el colapso estructural

En los estudios texturales de muestras de manzana tratadas con CDA, Li *et al.* [2008] trataron de modelar el fenómeno a través de la teoría difusional teniendo en cuenta el factor de encogimiento. A diferencia de otros modelos, éste no requiere calcular valores experimentales como difusividad del vapor, tortuosidad entre otras. Sin embargo, se deben tener presente las siguientes suposiciones:

- Se debe considerar un proceso isotérmico
- Proceso mayoritariamente de naturaleza difusiva
- La difusividad efectiva se considera constante
- Estructura isotrópica respecto a la difusión de agua

Finalmente, como recomendación en la obtención de buenas propiedades organolépticas en el proceso previo a la criodesecación, antes de la primera etapa de secado. Chen y Wang [2007] indican el uso de un templado para mejorar hinchamiento del producto. Esto consiste en subir la temperatura por encima del punto de transición vítrea, pero por debajo del punto de derretimiento para permitir que el agua no congelada fluya por los cristales y se ensanchen; de esta manera se puede obtener una estructura final de poros más grandes al final. El manitol se emplea como agente hinchador.

6.3.5 Efecto sobre las propiedades nutricionales

Los principales estudios realizados sobre el impacto del proceso sobre las propiedades nutricionales se centran en los polifenoles totales y la capacidad antioxidante. Un ejemplo de ello se puede observar en los estudios de CDA en cubos de manzana realizados por Stawczyk *et al.* [2006] en

los cuales se comparan los resultados con los obtenidos con el secado convectivo y liofilización. Los investigadores comprobaron en el caso del contenido de polifenoles totales, empleando el método de *Folin Ciocalteau* y para los antioxidantes con el “*scavenging*”, que los valores en CDA fueron bajos en comparación con la liofilización, pero no tan drásticos respecto al proceso convectivo. De esta manera, se observaron decrementos en el orden de 3,2% cuando se usó CDA respecto a la materia fresca para los antioxidantes, mientras que el proceso convectivo exhibió pérdidas de hasta un 70%. En el caso de los polifenoles totales, el rango de pérdidas estuvo entre 12 y 30%.

Reyes *et al.* [2009] en sus estudios de optimización del secado con CDA de Murtilla determinaron la cantidad de polifenoles totales y antioxidantes en el producto final. Analizaron los factores de velocidad de congelado (rápida y lenta), efecto de irradiaciones de infrarrojo y temperatura de secado. Encontraron que en las corridas con mayores cinéticas de secado (congelación rápida, presencia de IR y 15 °C) se experimentaban las mayores pérdidas generales de estos compuestos. En general, existe una pérdida en el contenido de antioxidantes y polifenoles para todos los procesos frente a la fruta fresca pero el proceso CDA permite obtener mejores perfiles que con el método a vacío. Los autores señalan, sin embargo, que con el uso de infrarrojo como método transferencia de calor se obtiene mejores contenidos finales, referidos como menores tiempos de proceso que evitan mayor tiempo de contacto y oxidación de la fruta con el ambiente. Por lo tanto, un proceso con infrarrojo, congelación rápida y temperatura de secado de 5 °C, propusieron como la alternativa más óptima para mayores contenidos de polifenoles y antioxidantes en la fruta.

En un estudio similar, pero llevado a cabo en rodajas de manzana, Reyes *et al.* [2011] estudiaron las variables mencionadas anteriormente más el tamaño de partícula, sobre el contenido final de polifenoles, antioxidantes y vitamina C. A excepción de la cantidad de antioxidantes, el proceso CDA muestra una notable pérdida de estos nutrientes, muy similar a los presentados en el proceso de túnel convectivo, el cual fue llevado a cabo como control y referencia de un proceso regular sobre las características sensoriales y nutricionales. Tan sólo en el contenido de ácido ascórbico se presentaron pérdidas en el orden del 70% frente al método de liofilización, lo que sugiere que la CDA en este caso no es muy llamativo para obtener un buen perfil nutricional en el producto final.

6.4 Modelos matemáticos en CDA

6.4.1 Modelización Matemática

La modelización matemática de procesos constituye una herramienta básica para los nuevos sistemas de producción ya que permite estimar, controlar, predecir y optimizar el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones de operación. Así, para optimizar el funcionamiento de un proceso agroalimentario se requiere del desarrollo de modelos matemáticos que simulen dicho funcionamiento y que permitan formular y establecer las mejores condiciones de operación. El desarrollo de modelos presenta una complejidad adicional cuando se trabaja con productos

biológicos debido a su carácter heterogéneo, complejo y delicado. Los modelos de secado se formulan teniendo en cuenta una serie de simplificaciones de la realidad. La más común es considerar que la transferencia de materia dentro del alimento se produce únicamente por los gradientes de humedad, lo que se conoce como mecanismo difusivo. Así, la modelización de las cinéticas de secado permite obtener parámetros como la difusividad efectiva del producto, parámetro esencial para abordar la optimización del proceso de secado [Santacatalina, 2015].

Por lo tanto, la modelización constituye una herramienta necesaria para analizar el proceso de secado y la influencia de las condiciones de operación sobre el mismo [Santacatalina *et al.*, 2011]. Para ello, se pueden utilizar dos tipos de modelos, los teóricos o los empíricos. Aunque ambos se formulan teniendo en cuenta una serie de simplificaciones de la realidad, presentan importantes diferencias. Los primeros proporcionan información útil sobre los mecanismos que intervienen en el proceso. Estos modelos son desarrollados a partir de principios físicos, basándose en diferentes hipótesis y consideraciones y son capaces de describir cuantitativamente un proceso particular. La opción más empleada para la modelización de los procesos de secado es la teoría difusional [Santacatalina, 2015].

Los modelos empíricos son modelos obtenidos a través del análisis matemático o estadístico de datos experimentales y su único objetivo es describir el proceso de manera precisa. Entre otros, destacan los modelos de Newton, Weibull, Page, Henderson - Pabis y Wang y Singh. A diferencia de los modelos teóricos, éstos carecen de significado físico al no proporcionar ninguna información sobre los mecanismos que intervienen en el proceso [Santacatalina, 2015].

El secado es un proceso complejo en el que se produce una transferencia simultánea de materia y de energía, acompañada de cambios físicos y estructurales en el producto. Por ello, en la modelización de un proceso de secado se puede diferenciar varias etapas. En primer lugar, se debe realizar la identificación de los fenómenos de transporte controlantes y/o de la resistencia a la transferencia que controla el proceso. Así, se debe definir si la velocidad del proceso está controlada por la transferencia de calor, por la de materia, o por ambas [García-Pérez, 2008].

Cuando ambos fenómenos sean significativos, el modelo deberá incluir ecuaciones que consideren la transferencia simultánea. Si se considera la transferencia de materia como factor limitante del proceso de secado, será necesario identificar si es el transporte interno o externo el responsable de controlar la velocidad de secado. Seguidamente, se procede a la selección del mecanismo de transferencia de materia que explique el transporte. Como se ha comentado en operaciones de secado, es la difusión el mecanismo más comúnmente utilizado. Éste considera que la transferencia de materia dentro del alimento se produce únicamente por los gradientes de humedad, es decir por la diferencia de humedad entre la parte interna y externa del sólido. Una vez identificado el mecanismo controlante, se plantea el modelo matemático y se obtiene la ecuación de gobierno del proceso. Para poder abordar su resolución, es necesario considerar ciertas hipótesis simplificadoras y definir una serie de condiciones iniciales y de contorno, una vez formulado el problema, se

procede a la resolución del modelo matemático. En determinados casos, las ecuaciones planteadas posibilitan que la resolución se pueda realizar de manera analítica. En otros, es necesario recurrir a resoluciones de tipo numérico [García-Pérez, 2008].

6.4.2 Modelos utilizados en la CDA

Los modelos difusionales son relativamente fáciles de formular y suelen proporcionar resultados razonables. Su principal inconveniente se encuentra en que las suposiciones consideradas para su resolución se acerquen más o menos a la realidad, lo que puede suponer implementar mayor o menor complejidad al modelo. Una de estas hipótesis simplificadoras que se puede asumir es la relacionada con la resistencia externa a la transferencia de materia. Así, se pueden plantear modelos puramente difusivos que no consideran la resistencia externa a la transferencia de materia. Éstos asumen que el proceso de secado depende únicamente del transporte interno de agua a través del sólido, manteniéndose la superficie del producto en equilibrio con el aire de secado desde el inicio del proceso. La resolución de este modelo permite obtener los valores de la difusividad efectiva (D_e), un parámetro que, en este caso, incluye todos los factores que influyen en la cinética del proceso; estos modelos son adecuados cuando las condiciones de flujo de aire de secado son suficientemente elevadas como para admitir que el proceso está principalmente controlado por la resistencia interna [García-Pérez, 2008].

Por otro lado, se pueden desarrollar modelos difusivos que consideran a ambas resistencias, externa e interna, como factores limitantes de la transferencia de materia durante el proceso de deshidratación. Su resolución proporciona los valores de las dos variables cinéticas que intervienen en el proceso, la difusividad efectiva (D_e) y el coeficiente de transferencia de materia (k). Constituyen una aproximación más cercana a la realidad que los modelos puramente difusionales, especialmente cuando la cinética de secado es dependiente de la velocidad del aire.

Ambos tipos de modelo, el puramente difusivo y el difusivo considerando la resistencia externa, han sido utilizados para describir cinéticas de secado a baja temperatura (-14°C) de diferentes productos como manzana, berenjena y zanahoria [García-Pérez *et al.*, 2012].

En el caso de las operaciones de secado que tienen lugar a temperaturas por debajo del punto de congelación, el modelo difusivo se convierte en un modelo empírico. En estas condiciones, durante el secado, se pueden distinguir dos zonas diferenciadas en el producto, una capa externa deshidratada y una interna totalmente congelada. Por lo tanto, una de las principales suposiciones del modelo difusivo, que es la isotropía del material, no se cumple [Santacatalina, 2015].

El modelo más utilizado para describir el proceso de CDA es el denominado modelo URIF (*Uniformly Retreating Ice Front*) [Claussen *et al.*, 2007c] publicado por primera vez por [Wolff y Gibert, 1990a, b]. Estos autores obtuvieron una solución al modelo combinando la teoría URIF y las leyes de la transferencia de materia y energía. Dicho modelo considera que durante el secado el

producto presenta dos capas: una capa externa seca y una interna congelada. Así, en la muestra congelada el frente de sublimación avanza de forma uniforme desde la superficie hacia el centro de la misma a medida que transcurre el secado. Por el contrario, el vapor de agua difunde hacia la superficie a través de la capa seca que se va generando. Por tanto, el proceso de secado está controlado por la difusión interna [Santacatalina, 2015].

6.4.3 Modelos difusionales

Los modelos fenomenológicos describen el movimiento de la humedad dentro de partículas y están usualmente basados en mecanismos difusionales. Generalmente son usados para representar procesos de secado convencional, donde agua líquida difunde a través de los poros del material y luego pasa a un estado gaseoso. No obstante, ha sido utilizado también en criodesecación, donde está presente el fenómeno de la sublimación [García-Pérez, 2008].

El coeficiente de difusividad efectiva es un parámetro práctico y conveniente para describir el movimiento de la humedad y la Ley de Fick (Ecuación 1) ha sido utilizada para describir matemáticamente la velocidad de secado decreciente en una partícula sólida.

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \nabla(D_e \cdot \nabla X) \quad (9)$$

Donde X representa el contenido de humedad (bs) en función del tiempo y de la posición dentro de la partícula y D_e es el coeficiente de difusividad efectiva de la humedad.

Es importante señalar que en general durante el secado de alimentos no se presenta un periodo de velocidad de secado constante, o bien éste es poco significativo, por lo tanto, dependiendo del caso, la Ecuación 9 permitiría describir el proceso de secado completo [García-Pérez, 2008].

La Ecuación 9 se puede resolver para diferentes geometrías y condiciones iniciales de frontera. Generalmente, esta solución se realiza en términos del contenido de humedad promedio. Para integrar la Ecuación 9 se consideran los siguientes supuestos:

- El alimento se considera como unidimensional y posee una humedad inicial uniforme
- Sólo existe resistencia interna para la transferencia de materia
- No hay encogimiento del producto durante el secado y se pueden despreciar los efectos internos y externos para la transferencia de calor

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, la solución general de la Ecuación 9 será:

$$\frac{X(t) - X}{X_o - X} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \nu}{\lambda_n^2} \cdot \exp\left(\frac{-\lambda_n^2}{a^2} \cdot D_e \cdot t\right) \quad (10)$$

Donde los parámetros v , λ_n y a para las distintas geometrías se encuentran especificados en la Tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de la Ecuación 2 para distintas geometrías

Geometría	v	λ_n	a
Placa	1	$(2n-1)\pi/2$	Semiespesor
Cilindro	2	$J_0(\lambda_n)=0$	radio, r
Esfera	3	$N\pi$	radio, r

Fuente: Pérez [2010]

6.4.4 Modelo fenomenológico URIF

El modelo URIF (por sus siglas en inglés, *Uniformly Retreating Ice Front Model*) considera que una partícula congelada que se somete a un proceso de criodesecación o secado a bajas temperaturas presenta un frente de sublimación en retroceso a medida que el proceso avanza como lo muestra la Figura 18.

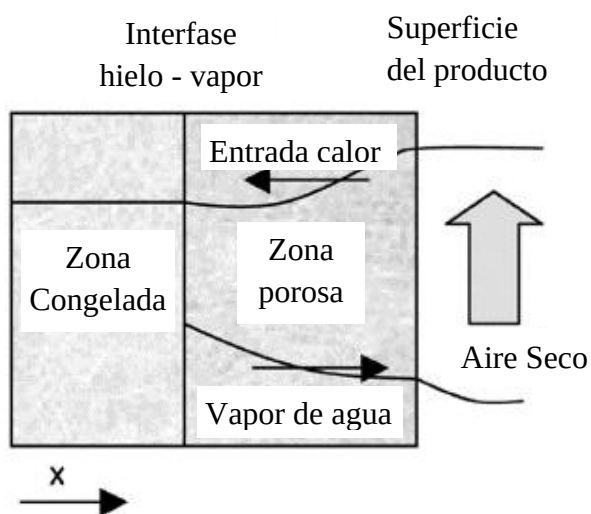


Figura 18. Esquema del frente de sublimación en retroceso con el tiempo

Fuente: Bórquez et al. [2013].

Los factores que interactúan para regular la velocidad de secado en la criodesecación se muestran en la Figura 18. En la criodesecación para producir la sublimación del agua, la energía debe suministrarse desde una fuente de calor. También es necesario que el vapor de agua generado sea removido por algún captador de humedad. El calor se desplaza desde la fuente de calor hacia el frente de sublimación debido a la diferencia de temperatura existente, y el vapor de agua se mueve

desde el frente de sublimación hacia el captador de humedad a causa de la diferencia de presión parcial de vapor de agua [García-Pérez, 2008].

Para CDA, Wolff y Gibert [1990b] tomaron como referencia este modelo, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para una partícula simétrica existe más de un frente de sublimación, dependiendo si la partícula es simétrica en el plano horizontal, vertical o ambos. Se distinguen dos áreas: el núcleo congelado y la capa seca.
- La sublimación toma lugar en este frente, el que se retrae uniformemente, existiendo un equilibrio entre el vapor y el hielo.
- El proceso ocurre en estado pseudo-estacionario.
- La energía entregada en cada cara de la partícula es utilizada para sublimar el hielo en el frente correspondiente.
- El producto se asume como homogéneo e isotrópico. El borde lateral no es tomado en cuenta y el producto no cambia su forma durante la sublimación.

Las velocidades de transferencia de calor y masa en respuesta a una fuerza motriz dada, se determinan por medio de coeficientes de transferencia de calor y coeficientes de transferencia de masa. El flujo de calor que va al material que se seca está dado por las Ecuaciones 11 y 12 [García-Pérez, 2008].

$$Q = S_p \cdot \alpha \cdot (T_c - T_{frente}) \quad (11)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{ext}} + \frac{\Delta L}{k_{ss}} \quad (12)$$

Dónde: Q: flujo de calor, S_p : superficie de intercambio de calor de las partículas, α : coeficiente de transferencia de calor general, α_{ext} : coeficiente de transferencia de calor exterior, T_c : temperatura de la fuente de calor, T_{frente} : temperatura del frente de sublimación, ΔL : espesor de la capa seca, k_{ss} : conductividad térmica del sólido seco

Para CDA se considera que existe una transferencia de calor por convección forzada y luego por conducción en la capa porosa, (Figura 19). La Ecuación 12 se transformará en la Ecuación 13 [García-Pérez, 2008].

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{h_{ext}} + \frac{\Delta L}{k_{ss}} \quad (13)$$

Donde h_{ext} es el coeficiente de transferencia de calor por convección externo.

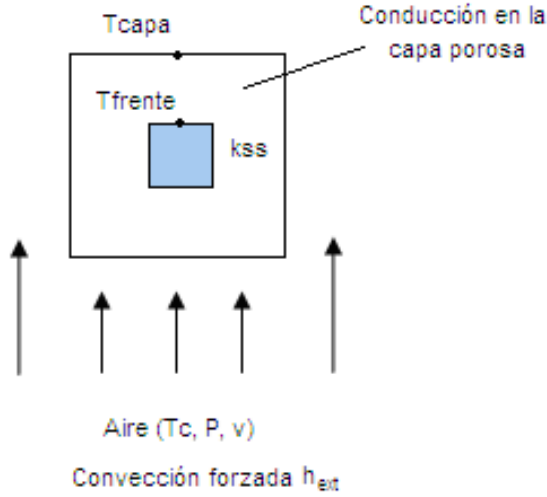


Figura 19. Transferencia de calor en criodesecación atmosférica

Fuente: Santacatalina et al. [2011]

Por otro lado, el calor necesario para la sublimación del hielo está dado por la Ecuación 14. También puede expresarse en función de la humedad relativa, $Y=m/m_0$, como se indica en la Ecuación 15 [García-Pérez, 2008].

$$Q = -\frac{dm}{dt} \cdot \Delta H_s \quad (14)$$

$$Q = m_0 \cdot \frac{d(1-Y)}{dt} \cdot \Delta H_s \quad (15)$$

Donde: ΔH_s es el calor de sublimación.

Al igualar las Ecuaciones 11 y 15 se obtiene la cinética de criodesecación en función del gradiente de temperatura (Ecuación 16):

$$m_0 \cdot \frac{d(1-Y)}{dt} = \frac{S_p}{\Delta H_s} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ext}} + \frac{\Delta L}{k_{ss}}} \cdot (T_c - T_{frente}) \quad (16)$$

De manera similar, se puede representar el flujo másico de vapor de agua usando las ecuaciones de transferencia de masa como sigue:

$$m_0 \cdot \frac{d(1-Y)}{dt} = S_p \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_{ge}} + \frac{D_w M_w}{RT \Delta L}} \cdot (P_{w,frente} - P_{w,c}) \quad (17)$$

Dónde: K_{ge} : coeficiente de transferencia de masa externo, D_w : difusividad del vapor de agua en la capa seca, M_w : masa molar del agua, $p_{w, frente}$: presión parcial de vapor de agua en el frente de sublimación. $p_{w, c}$: presión parcial de vapor de agua en el captador de humedad

Las últimas dos ecuaciones son la base del modelo URIF. Debido a que generalmente las condiciones en el frente de sublimación no son conocidas, se relacionan los valores de la presión de saturación, p^s , y la temperatura del frente, T_{frente} , a través de la ley de Clausius-Clapeyron [García-Pérez, 2008].

$$\frac{dP_w^s}{dT} = \frac{P_w^s - P_{w,frente}}{T_c - T_{frente}} = \frac{\Delta H_s \cdot P_w^s}{T^2 \cdot R/M} \quad (18)$$

En esta expresión, p^s es la presión de vapor de agua saturada en el frente de sublimación a la temperatura T_c del aire captador de humedad. La ecuación 18 puede escribirse como sigue:

$$P_w^s - P_{w,frente} = \frac{\Delta H_s \cdot P_w^s}{T^2 \cdot R/M} \cdot (T_c - T_{frente}) + (P_{w,frente} - P_{w,c}) \quad (19)$$

Varios autores han estudiado y aplicado modelos difusivos y URIF para comparar y modelar sus experimentos. Lombraña y Villarán [1997] adaptaron la URIF a partículas de forma esférica y la aplicaron conjuntamente a otra correlación con datos experimentales que determinan los parámetros del modelo.

Asumiendo el estado casi estable durante criodesecación atmosférica en lecho fluidizado, [Di Matteo *et al.*, 2003] obtuvieron relaciones de transferencia de calor y masa entre las partículas de papa cilíndricas y la mezcla circundante compuesta de adsorbentes como harina de trigo, salvados, zeolita, almidón y aire, los adsorbentes utilizados fueron salvados, harina de trigo, almidón y zeolitas. Estas ecuaciones relacionan la fuerza motriz que puede definirse como la diferencia de temperatura o diferencia de presión parcial de agua entre el frente congelado y la emulsión, permitiendo obtener propiedades de producto y proceso tales como difusión efectiva del vapor el agua o el intercambio de calor.

Stawczyk *et al.* [2006] simularon con CFD la CDA de un cubo de manzana en 2D aplicando una película como modelo de sublimación y el modelo URIF subdividiendo el cubo en cuatro zonas: una placa de hielo pura (el frente congelado), una interfaz, una zona porosa (el frente seco) y una fase gaseosa. El frente de hielo se supuso como una pared de la cual el hielo se sublima y la tasa de sublimación se calculó mediante una función definida por el usuario. El efecto del vapor de agua generado en la distribución de especies de la fase gaseosa se introdujo en los cálculos de flujo a través de un término fuente aplicado a las paredes adyacentes. Además, los autores asumieron la capa seca como un medio poroso que simula el flujo a través de ella mediante la aplicación del

modelo correspondiente incluido en el software CFD y reprodujo el frente de hielo en retirada mediante el uso de 13 mallas separadas para diferentes posiciones de frente de hielo. A pesar de que los autores obtuvieron un acuerdo razonable con los resultados experimentales, sólo simularon el proceso de una pieza de producto, pero no todo el proceso de CDA.

También Alves-Filho [2010] aplicó un modelo para CDA en lecho considerando la partícula como un medio poroso, pero en este caso se usaron partículas prácticamente esféricas de material proteico del músculo de pez. Se resolvió la ecuación de transporte de masa para una sola partícula por medio de un método de barrido.

Ustad [2011] planteó un marco informático para simular el proceso de CDA se usó el modelo URIF y a su vez consideraron geometrías tridimensionales para simular el proceso. Se comprobó que la ecuación matemática fue bien planteada y se usó un método espectral para resolverla numéricamente. Para probar el marco informático, llevaron a cabo simulaciones sobre trozos de filetes de bacalao a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ las curvas de secado calculadas se mostraron de acuerdo con resultados experimentales.

La CDA en lecho fluidizado de “murtilla” (una fruta alimenticia chilena) fue simulada por Reyes *et al.* [2009] utilizando el modelo URIF para el secado primario y el modelo empírico Page, para la etapa de secado secundario. La URIF fue adaptada para partículas semi-esféricas para el secado primario, mientras que los parámetros n y k del modelo Page se obtuvieron mediante datos experimentales. A pesar que este último modelo bien describe los tiempos de secado, es válido sólo para el caso específico presentado y no se ocupa de la cinética de transferencia de masa y calor. Aunque los autores utilizan la radiación infrarroja en algunos de sus experimentos, aplicaron el URIF, un modelo que no considera las radiaciones de energía para predecir la primera etapa de secado, concordando apreciablemente con parte de sus resultados experimentales.

Reyes *et al.* [2011] evaluaron los parámetros del Modelo de difusión constante simplificado (SCDM) y el modelo Page para el primer y segundo secado de rodajas de manzana. Dado que los modelos SCDM y Page son empíricos, permiten predecir los tiempos de secado y el contenido de humedad de los productos específicos en los que fueron aplicados. Sin embargo, los valores de efectividad difusiva obtenidos con el modelo SCDM pueden utilizarse en otros modelos de criodesecación atmosférica.

Bantle y Eikevik [2011] y Eikevik *et al.* [2012] utilizaron un modelo Weibull modificado (Ecuación 12) para describir el comportamiento de secado de la criodesecación atmosférica en lecho fluidizado y de CDA asistida con microondas, respectivamente. Este modelo tiene en cuenta las dimensiones físicas de la partícula del producto (L , longitud o longitud característica), una difusividad calculada y consideran como factor matemático la forma de la partícula (β). De forma similar a los modelos Page y SCDM, al aplicar la ecuación a datos experimentales es posible no sólo evaluar la evolución temporal del proceso de secado, sino también la difusividad.

$$\frac{Z - Z_{eq}}{Z_0 - Z_{eq}} = \exp\left(-\left(\frac{D_{calc} t}{L^2}\right)^\beta\right) \quad (20)$$

Un modelo basado en URIF fue aplicado por Pérez [2010] para simular la criodesecación atmosférica en lecho fluidizado y criodesecación al vacío de cubos y placas "loco" (un molusco nativo de las costas de Chile y Perú) con y sin microondas. Además, ajustaron sus resultados experimentales con dos modelos basados en la ley de Fick, el SCDM anteriormente mencionado y el VDM (Modelo de Difusión Variable), aplicando este último como se muestra en la Ecuación 21:

$$\frac{X}{X_0} \approx \exp(-\lambda_1^2 F_o (1 + \frac{b}{2} F_o)) \quad (21)$$

Donde λ_1 y b son parámetros del modelo y F_o es el número de Fourier, $F_o = D_0 t / a^2$, con D_0 como la difusividad en $t = 0$.

Obtuvo que el modelo URIF es mejor para las tajadas bajo criodesecación atmosférica sin microondas. Respecto a los modelos basados en la ley de Fick, ellos encontraron el mejor ajuste particularmente en casos de criodesecación al vacío sin microondas.

Dado lo anterior, existen muchos modos de simular el proceso CDA, ya sea para casos específicos o aplicables a más de un caso. No obstante, ninguno de estos experimentos considera la totalidad del lecho fluidizado y las posibles interacciones entre el producto alimenticio y el adsorbente cuando se usa, sin embargo, los modelos matemáticos.

7 TIPOS DE CDA

7.1 CDA asistido con bomba de calor

El uso de un equipo de bomba de calor tiene como finalidad bajar la temperatura del aire húmedo por debajo del punto de rocío para así retirar humedad del alimento hacia el mismo aire. Dicha bomba de calor está compuesta por un compresor refrigerante, un condensador de aire frío, evaporador, tanque líquido, válvulas de tres vías que controlan temperatura en evaporador y la profundidad del gas secante. Una vez que el gas ha dejado la cámara, es llevado al evaporador donde es enfriado y la humedad es retirada; luego, el gas seco es llevado a un quemador eléctrico donde se reduce su humedad relativa para regresar así a la cámara de secado [Stawczyk *et al.*, 2006]. Las bombas de calor basan novedosa eficiencia en el reciclaje de la energía térmica acumulada en la humedad retirada del aire en el evaporador que es luego usada para calentar nuevamente el aire.

Los procesos de secado exigen hoy en día un ahorro energético considerable. Las bombas de calor que se ajustan a los secadores proporcionan ahorros energéticos considerables por las relativas bajas temperaturas, además que emplean refrigerantes no contaminantes para la capa de ozono como el N₂ o el CO₂ [García-Pascual *et al.*, 2004]. Dichos consumos energéticos están en el orden de 60-80% menos respecto a otros secadores. Secadores adiabáticos y no adiabáticos de este tipo se comercializan en Noruega e información en este tema ha sido investigada desde hace 20 años [Eikevik *et al.*, 2003].

Diversos estudios se han planteado con el uso de bombas de calor. Bantle *et al.* [2009] estudiaron la combinación de un proceso de criodesecación atmosférica con bombas de calor, corroborando las ventajas económicas que ofrecen. Llevaron a cabo, por tanto, el secado de una variedad de plancton y para ello efectuaron tres pruebas: un proceso de liofilización a -5 °C, otro a -10 °C y finalmente un proceso combinado a -5 °C con posterior deshidratación a 20 °C. Este último manifestó una reducción de la actividad proteolítica en el producto seco a diferencia de los procesos meramente refrigerativos. Actividades de agua entre 0,4 a 0,6 aseguran una reducción en la oxidación lipídica, mientras que en el rango de 0,6 a 0,8 se reduce la actividad enzimática.

Casos similares al anterior, donde se presenta al factor temperatura de aire, modificado por la bomba de calor, como la unidad controlante en el proceso son mencionados en variedad.

Strømmen *et al.* [2005] recopilan las bondades de implementar bombas de calor en el proceso CDA para el secado de bacalao. De esta manera, utilizaron una primera etapa con temperaturas de -5°C seguido de una segunda etapa a 30 °C. El análisis de la eficiencia energética es sugerido desde el cálculo de la cantidad de kg de agua retirada en el proceso por kW de energía en un tiempo de residencia estimado, el estudio concluyó que la eficiencia energética en el proceso CDA es menor

que un proceso de secado a 30°C, sin embargo, las características de calidad de producto deshidratado son mejores en el proceso CDA.

En otro caso de secado de bacalao, el uso de bombas de calor en el proceso CDA generó mejores rendimientos cuando se combinaron temperaturas bajas (-10 °C y -5 °C) y temperaturas intermedias. Las propiedades texturales como rehidratación y el color se impactaron positivamente cuando se trabajó a -5 °C [Eikevik *et al.*, 2003].

En general se sugiere un incremento gradual de la temperatura a través de una rampa en el tiempo para obtener un periodo de secado constante más largo el cual reflejará ventajas económicas por rendimiento energético. Sin embargo, en temperaturas mucho más altas es posible presenciar derretimiento del hielo lo que puede causar problemas en el producto final, en cuanto a sus atributos de calidad textura y a encogimiento final [Stawczyk *et al.*, 2006].

La deshidratación de arvejas verdes se llevó a cabo mediante CDA en lecho fluidizado con bomba de calor [García-Pascual *et al.*, 2004]; en este estudio se planteó criodesecación atmosférica operando con diferentes rampas de temperatura y a temperatura constante, se evaluaron características de calidad como actividad de agua, color y rehidratación. El objetivo de la investigación estuvo encaminado a la preservación de los parámetros de calidad de las arvejas verdes, dado lo anterior, obtuvieron que las muestras tratadas mediante CDA presentan mejores cualidades respecto a las muestras evaluadas a temperaturas por encima del punto de congelación (25°C). La rampa de temperatura de -5°C/+25°C presentó una mayor reducción de humedad (aproximadamente 73%) en comparación con las otras temperaturas propuestas, lo anterior muestra que debe haber un equilibrio entre la reducción de humedad y la calidad del producto.

Alves-Filho *et al.* [2007] muestran el bosquejo usado en la deshidratación de pimientos rojos bajo un sistema de lecho fluidizado con bomba de calor en la Figura 20.

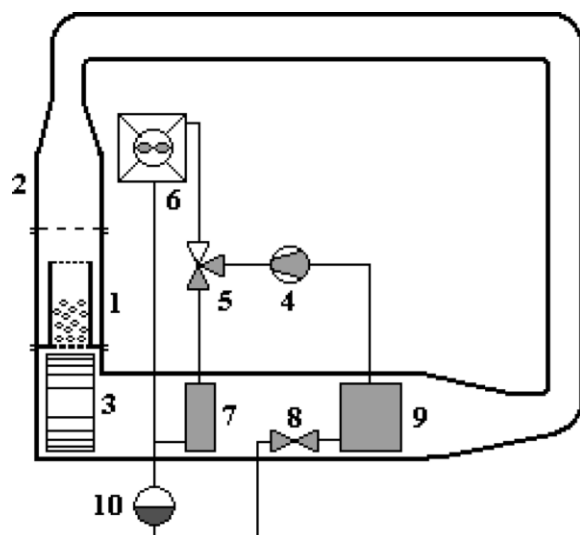


Figura 20 . Bosquejo de equipo de lecho fluidizado con bomba de calor.

1: cámara de secado transparente, 2: cámara de secado externa, 3: soplador, 4: compresor, 5: válvula de tres vías, 6: condensador externo, 7: condensador interno, 8: válvula de regulación, 9: evaporador, 10: colector de líquidos

Fuente: Alves-Filho et al. [2007]

De manera análoga al sistema con bomba de calor Xia *et al.* [2014] evaluaron un sistema de refrigeración convencional ligado a un proceso CDA. Para ello usaron un sistema secundario (subsidiario) que reutiliza el trabajo de un expansor, obteniendo energía de trabajo en el compresor secundario. Las bajas temperaturas del lecho son tomadas a través de un envolvimiento sobre el mismo y así enfriar el aire a la salida del proceso. En esta etapa se hace uso de un intercambiador de calor y así no se necesita emplear un refrigerante. Finalmente, se considera el aire como gas ideal que sigue la relación directa temperatura/presión. La proporción de presión debe mantenerse a 10 de tal manera que no se necesiten equipos más robustos y que a su vez requieran de inversiones más altas. Si esta proporción se aumenta el coeficiente de rendimiento COP (*coefficient of performance*) se reduciría, reduciendo la eficiencia energética del sistema. Así mismo, el descenso de la temperatura en la salida del lecho reduce el COP [Stawczyk *et al.*, 2004].

7.2 CDA asistido con lecho fluidizado

Otro método que se ha investigado es la CDA fluidizada. Esta es una operación que usa un lecho de partículas adsorbentes. El ahorro de energía usando este método es de aproximadamente 34% comparado con la liofilización. Sin embargo, los tiempos de secado son entre 1 a 3 veces mayores a los del proceso al vacío ya que la presión atmosférica controla la transferencia de calor y masa, lo que hace que sea muy lento [Wolff y Gibert, 1990a].

No obstante, para que el proceso tenga su aplicación viable se deben cumplir ciertos requerimientos [Eikevik *et al.*, 2003]:

- El proceso debe ser continuo
- El lecho tiene que tener una altura adecuada para la liberación de agua

- Fluidización estable
- Tener la temperatura en la entrada lo más alta posible por eficiencia térmica

Di Matteo *et al.* [2003] emplearon cilindros de papa para predecir los coeficientes de transferencia de masa y energía entre el producto a deshidratar y el lecho fluidizado y así estudiar los fenómenos que se presentan. Dichos coeficientes, comparados con los del proceso a vacío, son mayores por órdenes de magnitud. La transferencia de calor en este proceso se realizó por conducción a través de la capa absorbente en contacto con el alimento, la cual también capta la humedad de sublimación del ambiente. A medida que aumenta dicha humedad, la transferencia se hace menos eficiente porque se reduce el coeficiente de difusividad. Efectos sobre la calidad del producto no fueron estudiados.

Claussen *et al.* [2007c] señalan que la mayoría de ensayos de CDA se realizan con lecho fluidizado ya que la transferencia de calor y masa se ve aumentada por el contacto directo del lecho con las partículas granuladas. Esto sucede porque las ventajas del lecho fluidizado parten de su gran área superficial que permite una simultánea transferencia de calor y masa [Tomova *et al.*, 2004]. Además, la fluidización permite a partículas húmedas con <8 mm una mayor exposición y contacto con el fluido secante, lo que acelera los procesos de secado debido a la baja resistencia externa que se presenta [Alves-Filho, 2010]. Además, se puede ajustar el tiempo de residencia de las partículas para tener estados de secado variables.

No obstante, el adsorbente muestra una eficiencia en cierta etapa. Tomova *et al.* [2004] no observaron en la primera hora absorción de humedad por parte del lecho mientras la humedad del aire a la salida aumentó. Sin embargo, este proceso decayó con el paso de las horas hasta hacerse constante, en lo que nombraron la etapa dos, la cual a su vez terminaba cuando la carga higroscópica del adsorbente fue alcanzada.

La CDA con adsorción utiliza un desecante (sílica gel, por ejemplo) para crear una diferencia en la presión de vapor de agua a bajas temperaturas [Mellor, 1978]. El adsorbente reemplaza el condensador y proporciona una reducción del 50% en los costos totales comparado con la criodesecación tradicional. Existen dos formas de atrapar el agua en estos procesos que puede ser con los absorbentes o con los ya mencionados adsorbentes. Los primeros hacen referencia a materiales que atrapan el agua en su estructura – cloruro de litio y ácido fosfórico anhidro, glicerol–mientras que los adsorbentes se basan en propiedades de superficie, por lo que cuentan con un área mayor y con alta porosidad –sílica gel, alúmina, carbón activado [Boeh-Ocansey, 1988]. El uso de absorbente ofrece un rol dual en la transferencia de masa y calor en el proceso ya que es fuente de calor y absorbe la humedad [Lombrana y Villarán, 1997].

Donsi *et al.* [2001] en sus estudios comparativos entre liofilización y CDA aportan datos experimentales sobre el efecto del adsorbente (temperatura y tipo) en el tiempo de proceso tal como lo muestra la Figura 21.

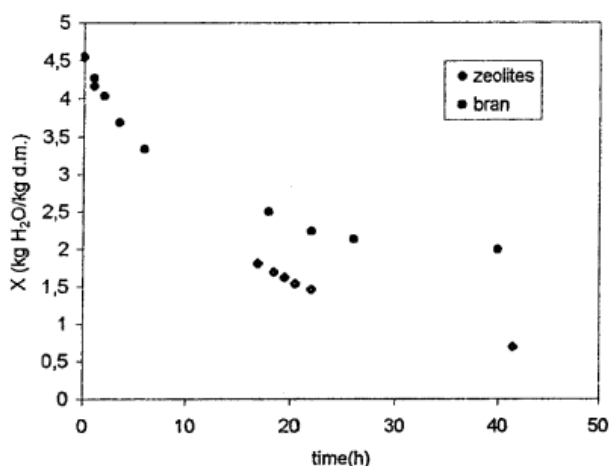


Figura 21. Influencia del tipo de adsorbente en el proceso CDA de camarones.

Rombos para zeolita (zeolita); círculos para salvado (bran). Temperatura lecho: -14 °C

Fuente: Donsi *et al.* [2001]

En la Figura 21 se destaca la alta influencia que tiene el tipo de adsorbente en el proceso de CDA, el uso de zeolita en la deshidratación de camarones redujo en mayor proporción la humedad respecto al uso de salvado, dado lo anterior, el tipo de adsorbente en un parámetro de proceso crítico para el desarrollo de CDA.

Al evaluar el uso de adsorbente se demostró que su presencia mejora el proceso de secado respecto a aquellos que no lo tenían [Rahman y Mujumdar, 2008]. Los autores de este estudio sugieren adsorbentes con granulometrías grandes para mayor adsorción. Éstos transmiten el calor de sublimación de manera más efectiva cuando se hace presente la vibración debido al mayor contacto que se genera entre el alimento y las fuentes de calor. En los adsorbentes no es necesario una fuente de energía adicional dado que la entalpía de sublimación necesaria es de igual magnitud al calor de adsorción requerido [Wolff y Gibert, 1990a]. Si la proporción de peso entre el adsorbente a usar y el agua a recolectar es adecuada (10:1) se podría procurar durante todo el proceso una presión de vapor de agua parcial constante que genere la fuerza motriz necesaria del proceso.

De esta manera algunos casos con fluidización son reportados de la literatura actual. Ramírez-Navas *et al.* [2012] ajustaron un congelador comercial como cámara de secado, le instalaron termómetro y mantuvieron la temperatura de proceso en 1,1 °C. Secaron dos variedades de papa (Gabriela y Chaucha) empleando un lecho compuesto de dos adsorbentes: sílica gel y cloruro de calcio. Para todas las muestras, los tiempos de secado se extendieron hasta las 200 horas y en ellas se pudo identificar tres etapas de proceso, ya que, según los autores, se rigen los mismos fenómenos de secado presentes en la convección: una etapa corta de secado constante, luego una aceleración

de la cinética por acción del adsorbente y finalmente un periodo de velocidad decreciente. El mejor desecante fue el cloruro de calcio y la papa chaucha se secó más rápido. La limitante del proceso descrito es el largo tiempo de secado, el cual es superior a las expuestas anteriormente.

En otro estudio, se efectuó el secado de Murtilla usando CDA con un lecho a pulsos de sílica gel [Reyes *et al.*, 2009]. En este proceso la sílica fue cambiada cada dos horas para asegurar constantemente aire seco y se emplearon dos temperaturas: -5 °C para las primeras siete horas de proceso y se finalizaron entre 5-15 °C. Las frutas fueron congeladas en equipos caseros y luego cortadas en rodajas.

Tomova *et al.* [2004] emplearon Al_2O_3 y evaluaron la masa del lecho obteniendo una relación directa del mismo con el tiempo de secado. Esto se atribuye a que un aumento de la masa del alimento significa una mayor carga de hielo, el cual necesitaría más tiempo para sublimarse. Por tal motivo, para muestras con igual contenido de humedad y temperaturas de entrada y velocidades de aire constantes se recomienda menores masas del lecho. Rahman y Mujumdar [2008] usaron cubos de papa y zanahoria en la CDA con lecho vibratorio para analizar la influencia de parámetros y como éstos afectaron el color, la estructura y demás atributos de calidad. Wolff y Gibert [1990b] estudiaron la CDA en porciones de papa y se estudió el efecto del proceso en la forma. Los resultados avalan a la forma esférica como la más conveniente para realizar secados rápidos. Una vez que el adsorbente es saturado la velocidad de secado cae abruptamente. Di Matteo *et al.* [2003] en sus estudios de fluidización usaron bentonita, bran y almidón de maíz. De éste último también se tuvo información con Wolff y Gibert [1990a].

El uso de absorbentes presenta diferentes inconvenientes: dicho material debe ser compatible con el consumo humano, problemas de separación con el analito y se necesita una proporción elevada de absorbente frente al producto [Bubnovich *et al.*, 2009]. Como mejoras al proceso se puede mencionar el uso de vibraciones que ayuda sustancialmente en las primeras etapas del secado a aumentar la velocidad del mismo debido a la disgregación de partículas y al mayor contacto que se genera con el aire de secado. Así pues, con el aumento de la frecuencia en las vibraciones se obtiene mayores velocidades. Este sistema no requiere grandes inversiones de energía por lo que los autores concluyen que es altamente viable para mejorar el proceso de CDA [Wolff y Gibert, 1990a].

7.3 CDA asistido con ultrasonido

La implementación de ultrasonido en la entrada de aire demostró ser un método eficaz para aumentar la cinética difusiva del proceso de secado ya que en el mismo se generan ondas de compresión y expansión que crean canales microscópicos [Santacatalina *et al.*, 2015]. Este efecto llamado “esponja” permite que el agua presente en la capa límite se libere más fácilmente, acelerando el proceso o como lo menciona Gallego-Juárez *et al.* [2007], el agua fluye tratando de buscar salida por los canales, lo que facilita el proceso de secado. Incluso se puede considerar que, hasta cierto punto, las ondas transmiten una energía considerable para propiciar el cambio de estado

del agua. La menor intensidad aplicada (45 W) resultó ser la más beneficiosa desde el punto de vista calidad/rendimiento energético.

El proceso de ultrasonido es muy dependiente del medio de irradiación. Este proceso interactúa sinérgicamente con otras formas de energía en orden de promover o acelerar otros fenómenos. No obstante, pueden presenciarse efectos adversos si no se tiene en cuenta la naturaleza de la matriz y las intensidades a usar [Gallego-Juárez *et al.*, 2007]. Este proceso puede resultar muy útil en alimentos sensibles al calor. Igualmente, para que el proceso sea llevado a cabo, el fluido deberá tener una baja impedancia acústica específica pero una alta absorción acústica para tener un buen rendimiento junto con las ondas de ultrasonido. Por esta razón, el problema que se presenta para su implementación en alimentos es el mal emparejamiento de impedancia entre el medio y el alimento [Gallego-Juarez, 2010]. Además, la efectividad de este tratamiento mejora con el descenso de la temperatura.

Siucińska y Konopacka [2014] presentaron en su revisión del mejoramiento de procesos térmicos con ultrasonido descensos del consumo energético hasta del 20% y descensos del tiempo de secado de hasta el 11%. Esta tecnología, en muchos de sus estudios, indujo a la mejora de la transferencia de masa interna y externa, aumento de las cinéticas de secado, disminución del tiempo total de secado, aceleración de la CDA, menor contenido final de humedad. Sin embargo, señalan que debe tenerse en cuenta problemas por degradación en estructura.

Teniendo en cuenta lo anterior, varios casos sobre el empleo de ultrasonido en la literatura se han reportado. Ozuna *et al.* [2014] aplicaron ultrasonido en el secado a bajas temperaturas bacalao, observando disminución de las cinéticas de secado debido a aumentos de hasta el 74% de la difusividad efectiva. Los autores atribuyen esto al descenso de la resistencia interna a la transferencia de masa que propicia las ondas ya que estas introducen cambios presiones y velocidades oscilantes disminuyendo el grosor de la capa límite y mejorando la transferencia de masa entre material y ambiente.

Bantle y Eikevik [2011] asistieron el proceso de CDA con campos de ultrasonido para mejorar la cinética de secado en arverjas verdes. En estos experimentos se evaluó tanto las temperaturas de secado como la influencia de diferentes intensidades de ultrasonido y se concluyó que la presencia de este tratamiento aumentó la difusión efectiva hasta 14,8%. Como en el caso anterior, estos autores señalan que aumento de la turbulencia en las capas límites de secado propician el aumento de las tasas de transferencia de masa entre el sólido y el líquido. Sin embargo, este efecto fue sólo significativo a temperaturas bajo cero mientras que en ensayos a 10 y 20 °C no se observó ninguna ventaja.

Santacatalina *et al.* [2015] en su estudio de CDA en cubos de manzana evaluaron el efecto del proceso con ultrasonido y sin él, en la reducción del tiempo total de proceso. En la Figura 22 se representan los valores experimentales.

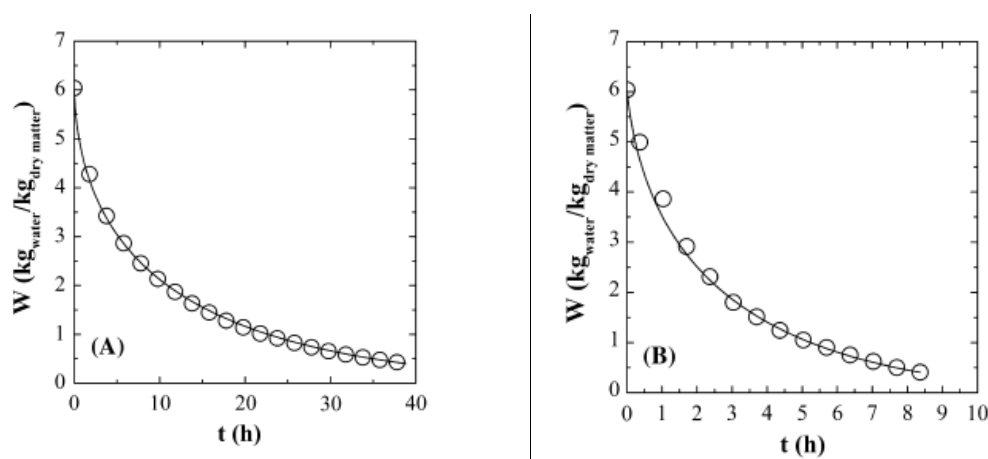


Figura 22. Comparativo de las cinéticas de secado (agua remanente vs tiempo) en el proceso CDA de muestras de manzana.

(Temperatura y velocidad aire: -10°C y 2 m/s): Izquierda, sin ultrasonido. Derecha, con ultrasonido (50 W)

Fuente: Santacatalina *et al.* [2015]

Santacatalina *et al.* [2015] implementaron ultrasonido en procesos de CDA de manzanas, berenjena y zanahorias para estudiar su efecto sobre las cinéticas de secado. Se modelaron estas últimas con la teoría difusional, suponiendo el grosor de la capa límite como despreciable. En el caso de las berenjenas, la implementación del proceso acústico redujo considerablemente el tiempo de proceso desde veinte horas hasta siete horas.

Garcia-Perez *et al.* [2012] también han demostrado la viabilidad de emplear ultrasonidos de potencia para acelerar la cinética de secado de frutas verduras y pescado a bajas temperaturas. Estos últimos han logrado una reducción en el tiempo de secado en un 77% con la aplicación de ultrasonidos durante el secado de manzana a -10°C .

En la revisión de Bhaskaracharya *et al.* [2009] indican que el uso de ultrasonido en la congelación de alimentos tiene como finalidad mejorar la transmisión de calor, ya que el principal impedimento son las malas propiedades térmicas de los mismos. Sin embargo, señalan que una alta o larga sonicación puede contrarrestar los efectos positivos por el traslado de calor a las muestras. Varios de los autores mencionados [Gallego-Juarez, 2010; Gallego-Juárez *et al.*, 2007; Siucińska y Konopacka, 2014], consideran que para cada alimento se debe estudiar individualmente los efectos sinérgicos que presenta el ultrasonido con los procesos de transferencia de calor presentes ya que son únicos en cada caso por la compleja naturaleza de estas ondas acústicas.

Finalmente, para llevar a cabo montajes con ultrasonido, se debe tener en cuenta la impedancia conjunta, la cual se logra con transductores de gran superficie que generan grandes vibraciones [Gallego-Juarez, 2010]. Además, los radiadores pueden tener configuraciones circulares o rectangulares y poseer modificaciones como ranuras que permitan focalizar las ondas o generar

patrones. Transductores piezoeléctricos en cámara de aluminio pueden alcanzar frecuencias de hasta 21,8 KHz. Gallego-Juárez *et al.* [2007] recopilan información sobre un modelo de irradiador de ultrasonido empleado en el generador de placa escalonada (*stepped plate generator*), una placa perpendicular al último y la placa de la muestra sobre el cual fluye el aire también perpendicular a la irradiación del ultrasonido. Esta placa consiste en una pieza rectangular con un vibrador piezoeléctrico entre el primero y un amplificador mecánico. Esta disposición permite eficiencias del 80%, potencias de 2 kW e intensidades en el aire de 175 dB.

7.4 CDA asistido con microondas

Las microondas se caracterizan por imprimir energía de forma rápida y con buenas penetraciones en el alimento a calentar [Xu *et al.*, 2015a]. Se basa en que las moléculas de agua del alimento experimentan fricción, de esta manera el calor se forma por el cambio en las propiedades dieléctricas [Eikevik *et al.*, 2012]. Igualmente, las microondas acelera el secado debido al aumento de temperatura y la capacidad que tiene para impartir calor de manera uniforme [Zielinska *et al.*, 2013b].

Se reporta el uso de microondas en el proceso de CDA de arándanos y se obtuvo una textura más suave y mejor conservación de color [Fernandes *et al.*, 2011]. Los autores proponen el uso de tecnologías de secado en la comercialización de frutas exóticas, mencionando el caso particular de la CDA como la de mejor perfil. Las frutas propuestas van de guayaba, carambolo, mamoncillo, mango.

En un caso más específico, Eikevik *et al.* [2012] implementaron microondas en el proceso de CDA de arverjas verdes para aumentar la sublimación del agua y mejorar la cinética de secado. De esta manera, se logró una reducción del tiempo de secado en un 50% cuando se llevó a 280 W de potencia. Se analizó, a su vez, tres temperaturas de lecho (-6 °C, -3 °C y 0 °) y se confirmó mayor eficiencia en lecho fijo sobre el fluidizado. A las temperaturas más bajas de lecho y microondas se observaron las mejores propiedades fisicoquímicas del producto seco.

Adicionalmente a estas acotaciones, Reyes *et al.* [2010a] usaron radiación infrarroja en la CDA de murtilla. Observaron que la irradiación como método de transferencia de calor ayudaba a conservar mejor las propiedades nutricionales y permitía mayor resistencia a la ruptura en comparación con otros tipos de secado. Dicha irradiación tiene la capacidad de hacer una alta entrada de energía. En relación a lo anterior, cuando el medio de transmisión es la radiación, se ha comprobado que la mayor resistencia en la CDA es ofrecida por la transferencia de calor interna que la misma transferencia de masa [Jafar y Farid, 2003]. En este caso, la transmisión de calor por microondas llega a la zona seca y de ahí comienza a secar todo el producto. En este estudio se analizó donde empezaba el secado dependiendo del tipo de transferencia de calor: o por secado o por conducción. En ambos casos se evidenció que el secado inició en la superficie más cercana a la fuente de calor.

Hay que tener en cuenta que este experimento se realizó con base a los dos supuestos que existen sobre cómo se transfiere el calor para obtener una capa seca creciente:

- Uno afirma que la capa seca está inmediatamente cercana a la fuente de calor por conducción
- Mientras en la otra, el calor atraviesa toda la superficie congelada para comenzar a secarse en la a parte superior.

El calentamiento con microondas se ha probado para reducir el tiempo de CDA, aunque diversos problemas técnicos encontrados con este tipo de fuente de energía hacen que su uso esté limitado, a la fecha, sólo a pruebas de laboratorio [Ratti, 2009]. Además, el aumento de temperatura en el proceso de criodesecación puede ayudar a reducir los costos asociados al consumo de energía, pero puede conducir al deterioro del producto [Khalloufi y Ratti, 2003]. Se han efectuado estudios donde se evidencia que este pretratamiento puede llegar a ser más eficiente en el proceso de secado que el convectivo y es viable siempre y cuando no se afecte las características organolépticas del alimento [Eikevik *et al.*, 2012].

7.5 CDA en proceso Aspersión con Frío (*Spray Freezing*)

El secado de polvos en la criodesecación es un proceso poco eficiente debido a la alta presencia de poros que impiden una buena transferencia de calor [Leuenberger *et al.*, 2006]. En este proceso el parámetro a controlar es el flujo de aire. La reducción del flujo de aire conduce a reducción de la velocidad de secado porque se satura más rápido. Por otra parte, la reducción en tamaño de partícula provoca el mismo efecto ya que se necesita recorrer menor distancia para extraer el agua en proceso que se controla por difusividad al interior de la misma partícula.

Rogers *et al.* [2003] estudiaron el efecto de CDA por aspersión para obtener partículas de medicamentos con dificultades típicas para disolverse. Se obtuvieron a través de este método estructuras amorfas, con altas porosidades y áreas superficiales típicas de este proceso lo que permitió mejores solubilidades de estas fracciones en agua. El contenido de agua del producto final estuvo alrededor de 4% a 6%, valores muy cercanos al proceso con vacío, el cual una vez más, fue rectificado como más costoso por los rubros que incurren en cada lote y escalamiento.

Menshutina *et al.* [2004] secaron manitol líquido atomizándolo en una cámara a -60 °C obteniendo dos etapas: la primera, que controla el 80% del proceso, a -20 °C y la segunda en donde se debe controlar las propiedades aerodinámicas del aire para que no se genere colapso del lecho y no haya arrastre de las partículas. En otro estudio con manitol, las partículas fueron atomizadas en una cámara a -50°C y luego sublimadas a temperatura de 20 °C. Las evaluaciones confirmaron que la mayor parte del secado se realizó en la primera etapa, entre el minuto 20 y 120. Este proceso, en comparación con el que usa vacío, tan sólo necesitó tres horas y no generó disminución significativa de los tamaños de partícula ya que éstas conservan su estructura conformada por

poros. Los modelos que se emplean para la CDA en spray fueron propuestos a través de cálculos hidrodinámicos y teniendo en cuenta los fenómenos de transferencia de masa y calor.

Respecto a los montajes, Wang *et al.* [2006] recomiendan el diseño de un aspersor que usa aire en contracorriente y en donde las partículas a secar son introducidas contra un lecho adsorbente. La velocidad del aire de fluidización es mayor a la velocidad terminal de la partícula por lo que el secado se realiza casi en su totalidad en la superficie del filtro de partículas. Se sugieren tamaños pequeños de partícula ya que los grandes pueden contener suficiente humedad como para pegarse en el fondo de la cámara. Se indica una re-fluidización de estas partículas mientras otros señalan la posibilidad de usar vibraciones en el lecho mientras se aumenta la temperatura para terminar de eliminar el agua que resta.

Otro problema que se presenta en la segunda etapa en el proceso de CDA consistió en la adherencia de las partículas con las paredes de la cámara por acción de las propiedades dieléctricas y electrostáticas. Leuenberger *et al.* [2006] agregaron excipientes para evitar este problema. Para obtener un proceso sin pérdidas significativas se debe evitar que el producto que todavía no se ha congelado no haga contacto con ningún material. Para esto se puede implementar un cojín de gas en las paredes y, por otro lado, el proceso sólo puede acabar cuando se ha formado una capa de grosor constante al final del lecho. Adicionalmente, el sistema emplea nitrógeno líquido en un intercambiador de calor para enfriar el aire. Otros parámetros a tener en cuenta son las velocidades del aire en la cámara, las cuales deben encontrar un óptimo donde no desvíen partículas hacia la boquilla y se congelen allí y evitar contacto con las paredes. De esta manera, diferentes estudios se han efectuado sobre la CDA por aspersión, usando boquillas ultrasónicas que congelan el producto con nitrógeno líquido. De igual manera, para solucionar este inconvenientes, algunos autores han previsto la agitación del lecho [Leuenberger *et al.*, 2006].

En la Tabla 2 de los anexos, se muestra un comparativo de los diferentes tipos de CDA, con el fin de observar las ventajas y desventajas de cada tipo.

8 CONSIDERACIONES FINALES

8.1 Comparación entre métodos convencionales de criodesecación

La gran ventaja de la CDA es su bajo costo inicial en comparación con la liofilización y la posibilidad de ser llevado a cabo como una operación en continuo [Boeh-Ocansey, 1984], a diferencia del proceso a vacío que por el uso de presiones negativas debe recurrir a detener el proceso para cargarlo [Bantle *et al.*, 2011]. El método atmosférico, además, resulta más conveniente cuando el producto tiene mayor área, tamaño de partícula menor o su espesor sea menor a un cuarto de pulgada [Claussen *et al.*, 2007c].

Diferentes estudios han puesto en evidencia las diferencias entre ambos métodos compararon los efectos de tres tratamientos térmicos sobre la liofilización de berenjenas. Para alcanzar la temperatura de equilibrio, la muestra en aire caliente tomó tan sólo 5 horas en comparación con la muestra en CDA que necesitó más de 20 horas; por esta razón, el proceso atmosférico exhibe valores de difusividad ordenes de magnitud más bajos. Sin embargo, las características organolépticas como textura y capacidad de rehidratación son semejantes a aquellas exhibidas en el proceso al vacío [Santacatalina *et al.*, 2011].

Bantle *et al.* [2009] en la CDA de *Calanus finmarchicus* (una especie de zooplancton), realizaron un comparativo con liofilización, la CDA se realizó con tres condiciones diferentes de temperatura, dos fijas (-5°C y -10°C) y una combinación de (-5°C / 20°C). Obtuvieron un mejor comportamiento del producto deshidratado con CDA tanto en características de calidad como en tiempo empleado en el proceso. En la Figura 23 se muestra la curva de secado obtenida.

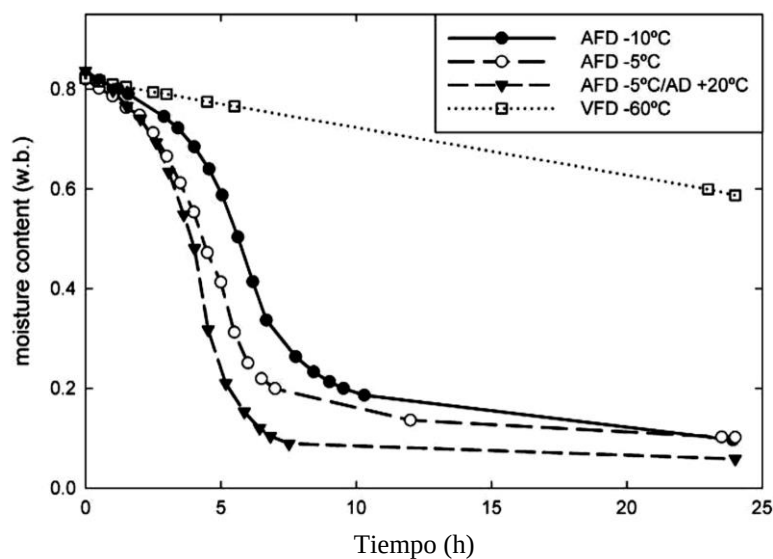


Figura 23. Curva de secado de *Calanus finmarchicus* obtenida mediante CDA y liofilización

Fuente: Bantle *et al.* [2009]

Se comparó el proceso CDA, la liofilización y el secado por aspersión para obtener concentrados de proteína de papa. Se evaluaron propiedades fisicoquímicas como color, contenido de agua, densidad aparente, rehidratación, actividad de agua y desnaturalización de proteínas. En todos los casos, a excepción del color, la CDA resulta como la alternativa más indicada para llevar a cabo un secado suave [Claussen *et al.*, 2007a].

No obstante, los resultados no siempre son los mejores en el proceso CDA. Bravo Mendoza [2005] efectuaron una evaluación comparativa de la etapa de sublimación entre CDA y liofilización de pimientos verdes *Capsicum annuum* variaron la temperatura de la cámara de criodesecación durante la primera etapa del proceso y determinaron su efecto en los parámetros físicos y fisicoquímicos del producto. Para cada tipo de criodesecación se modificó la velocidad de congelación de forma lenta y rápida y el área del producto de 1 cm² y 4 cm², obtuvieron la velocidad de sublimación, el coeficiente de rehidratación, densidad y color. De acuerdo a los resultados obtenidos concluyen que la liofilización es más conveniente que la CDA en este alimento, ya que desde el punto de vista de transferencia de masa se obtienen mayores velocidades de sublimación y se logran pimientos con mejor apariencia.

En otros casos, el proceso CDA se posiciona en puestos intermedios entre tratamiento. Se evaluó la influencia del secado a baja temperatura en la calidad de berenjenas y la zanahorias deshidratadas [Santacatalina *et al.*, 2013]. Las muestras se deshidrataron utilizando tres técnicas diferentes: secado por aire caliente a una temperatura de 50 °C y velocidad de aire de 2 m/s, CDA a una temperatura de -14 °C y velocidad de aire de 2 m/s y liofilización. Encontraron que el método de secado influyó significativamente tanto en el comportamiento de rehidratación como en las propiedades texturales de berenjena y zanahoria. Las muestras tratadas por CDA mostraron propiedades intermedias entre las muestras sometidas a liofilización y secado por aire caliente. Así, la CDA puede representar una alternativa interesante para obtener productos deshidratados de elevada calidad a menor coste que la liofilización.

Aunque los resultados pueden ser variados para la CDA, cuando se combina con otras tecnologías ya mencionadas los resultados pueden ser similares a los valores del vacío. Stawczyk *et al.* [2006] investigaron la cinética de la CDA y la calidad de producto de cubos de manzana en un sistema de secado con bomba de calor. Sus resultados mostraron que la cinética de la rehidratación y las propiedades higroscópicas del producto fueron similares a los obtenidos mediante liofilización. Estos resultados concordaron con el trabajo de Claussen *et al.* [2007b], que se llevó a cabo usando un secador de lecho fluidizado y un secador de túnel.

Donsi *et al.* [2001] presenta en la Figura 24 las curvas de secado para el proceso CDA y liofilización para el secado de camarones en un lecho de salvado, a una temperatura de lecho fija de -14 °C. En ella se ve claramente que la liofilización es más rápida que el proceso CDA.

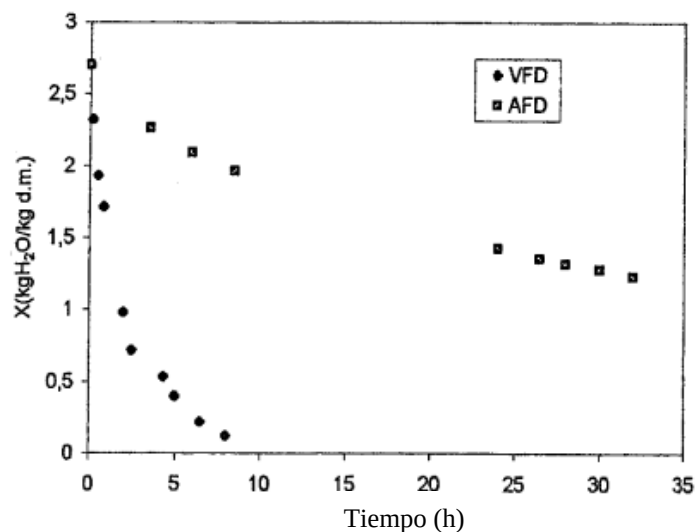


Figura 24. Cinéticas de secado (pérdida de agua en el tiempo) para la CDA (AFD) y la liofilización (VFD) de camarones.

Adsorbente Salvado, Temperatura lecho -14 °C

Fuente: Donsi *et al.* [2001]

Por su parte, algunos autores recomiendan el uso de microondas para potencializar los efectos de CDA. Así pues Zielinska *et al.* [2013b] propusieron la implementación de CDA con bomba de calor en la primera etapa de un proceso de secado de chícharos verdes seguido de una aceleración en la parte final con liofilización y microondas. De este modo, en la primera parte, la mayor cantidad de agua libre es retirada por el calor de la bomba de calor a presión atmosférica, sin causar daño alguno en la estructura. En la segunda parte, el microondas acelera el secado debido al aumento de temperatura y la capacidad que tiene para impartir calor de manera uniforme. A diferencia de otros métodos, el microondas combinado con vacío genera el efecto contrario al encogimiento conocido como “puffing” (soplado).

Estos mismos autores, en otro estudio Zielinska *et al.* [2013a] sugirieron la combinación de bomba de calor con lecho fluidizado y microondas al vacío como el método más eficiente y a la vez el que mejor producto obtiene desde el punto de vista textural (poco encogimiento y excelente estructura de poros para rehidratación). Además, cuando se realizaron las cinéticas de los procesos combinados y se compararon con el proceso de aire caliente se observó que la difusividad efectiva del vapor de agua aumentaba hasta dos órdenes de magnitud con la presencia de microondas. Éste último ofrece ventajas comparativas en cuanto a calidad pero mayores costos [Huang y Zhang, 2012].

Finalmente, como cita que apoya la perspectiva anterior, se comparó la liofilización, CDA y CDA con microondas en el secado de champiñones [Xu *et al.*, 2015a]. Los tiempos para cada uno fueron de 15 min, 25 min y 8 min respectivamente, lo que indica que la transmisión de calor por radiación fue más efectiva. CDA permitió mejor retención de vitamina C en comparación con los demás

tratamientos, pero exhibió mayor pardeamiento, menor capacidad regenerativa y densidad aparente.

8.2 Ventajas y desventajas de CDA. Problemas y mejoras del proceso

El proceso de liofilización consta de cuatro principales etapas, que son la congelación, vacío, sublimación y condensación, cada una de estas aporta al consumo total de energía como se muestra en la Figura 25.

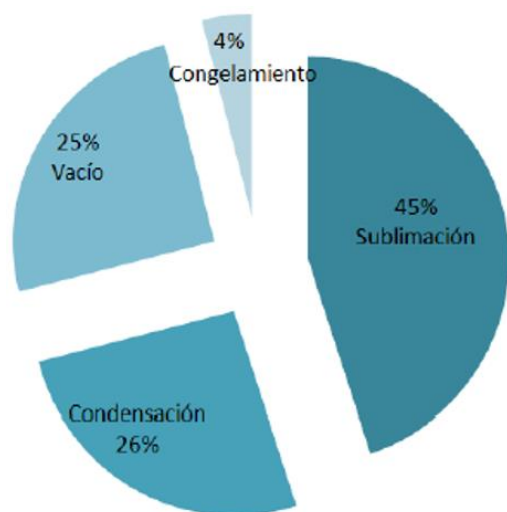


Figura 25. Descomposición del costo de energía para el proceso de liofilización

Fuente: Ratti [2001]

Una de las principales desventajas que tienen los alimentos liofilizados es su alto costo, debido al alto consumo energético en sus diferentes etapas de procesamiento. El costo de generación del vacío en la criodesecación tradicional es del 25% del costo total energético, una cifra nada despreciable para los costos actuales de la energía eléctrica. De lo anterior, surge la alternativa de realizar CDA lo cual implica ahorro de energía y menores costos de producción, lo que se traduce en alimentos criodesecados a menor costo.

Rahman y Mujumdar [2008] mostraron las principales ventajas de la CDA, las cuales se enuncian a continuación:

- Poco o ningún daño térmico (para la mayoría de los productos)
- Buena retención de sabores volátiles
- Buena retención de vitaminas
- Rápida rehidratación de los productos
- Baja humedad final

- Sin merma del producto
- Buena retención de la actividad biológica (con el uso de crioprotectores)
- Por tratarse de un proceso continuo con un tiempo de secado largo, lo que significa una mayor productividad y menores costes de operación
- Reducción significativa de los costes de energía debido a la ausencia de una cámara de vacío y el equipo auxiliar
- Disminución del consumo de energía
- La degradación del producto se reduce al mínimo mediante el uso de un entorno de secado de gas inerte
- Alto coeficiente de transferencia de calor: cerca de 20 a 40 veces mayor que en el secado al vacío

Sin embargo, también existen algunas limitaciones; Rahman y Mujumdar [2008] destacan las siguientes:

- Largo tiempo de secado: difusividad inferior de vapor de agua con el aumento de presión en la cámara
- Sistema de voluminosos: requiere más espacio
- Se requieren dos agentes mecánicos: no es económico desde el punto de vista energético
- La estructura del producto congelado es difícil de controlar.

En la Figura 26, García-Pascual *et al.* [2004] muestran la ubicación de la CDA en un diagrama costo-beneficio, la CDA combina las ventajas del secado por congelación (alta calidad del producto) y el secado convectivo (bajos costos de proceso), con algunas limitaciones.

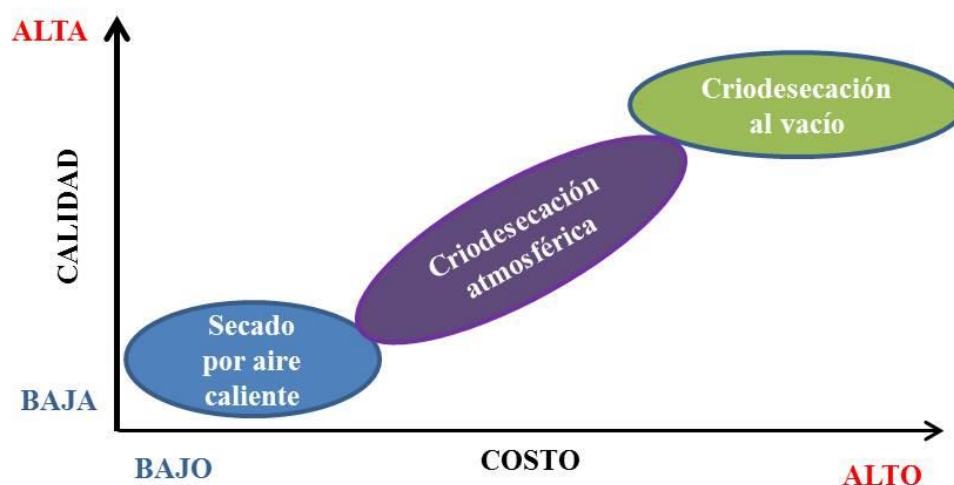


Figura 26. Relación costo-beneficio de tres métodos de deshidratación

Fuente: García *et al.* [2004]

Sin embargo, a pesar de las premisas de bajo consumo de energía y una mejor calidad de producto, ciertos problemas aún existen en la CDA lo que limita su aplicación práctica. La CDA es controlada por la resistencia interna al calor y la transferencia de masa; debido a la baja difusividad de vapor a presión atmosférica el proceso de secado es más prolongado [Rahman y Mujumdar, 2008]. No obstante, esta consideración se puede resolver cuando se articulan procesos de agitación o fluidización que permiten aumentar las tasas de transferencia de masa y calor [Alves-Filho *et al.*, 2007]. La CDA mediante este tipo de sistema, reúne la experiencia de otros métodos de deshidratación y tecnologías en transformación de calor, en este caso se une la oportunidad que brinda la fluidización en el intercambio de calor y adsorción entre partículas sólidas y un gas, y el uso de la bomba de calor puede proporcionar la facilidad de trabajar a bajas y altas temperaturas. De acuerdo a la bibliografía consultada, esta tecnología es la más usada por los investigadores debido a su versatilidad y diseño simple del proceso [Alves-Filho, 2010].

Bantle *et al.* [2009] muestran un diagrama general de un equipo de tecnologías combinadas en la Figura 27. Es importante recalcar que este tipo de arreglo es similar a otros estudios de CDA en lecho fluidizado con bombas de calor.

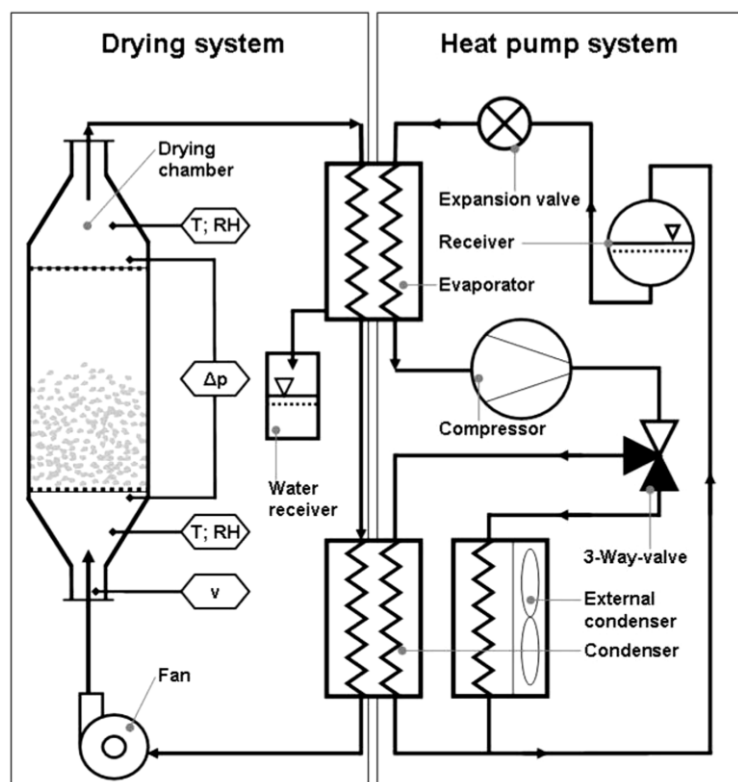


Figura 27. Configuración del equipo de lecho fluidizado con bomba de calor

Fuente: Bantle *et al.* [2009]

En esta configuración, el aire de secado es modificado por la bomba de calor, la humedad y la temperatura disminuyen por contacto con las superficies frías del evaporador, el aire

deshumidificado es recalentado en el condensador de la bomba de calor, todo esto se logra debido a una unidad de control de temperaturas en la bomba de calor. Un ventilador controla el flujo de aire permitiendo tener un lecho fluidizado constante. Dentro de las variables de proceso se pueden mencionar la temperatura del aire de secado, las dimensiones del alimento a deshidratar y el volumen de la cámara de fluidización.

Por otro lado, se investigó la influencia de la radiación infrarroja en el proceso de optimización de secado de bayas de Murtilla con CDA [Reyes *et al.*, 2009]. Se determinó que estas radiaciones aumentaban las cinéticas de proceso debido a que se comportan como una fuente de calor adicional para sublimar a mayores cinéticas el agua en el alimento. Así lo confirmaron también Bubnovich *et al.* [2009] en sus estudios de CDA de zanahorias.

Como mejora adicional al proceso CDA fue empleado vórtex en la cámara de secado para generar mayor transferencia de calor en la sublimación del agua a través de la formación de remolinos [Rahman y Saidur, 2016]. En este proceso, el aire presurizado entra por el vórtex y se inyecta tangencialmente en la cámara de secado. Múltiples opciones pueden ser tenidas en cuenta, como variar la presión del aire y el uso de diferentes boquillas para generar turbulencias [Ratti, 2001].

Otra alternativa muy empleada para disminuir los costos del proceso manteniendo parte de la calidad es la combinación de la liofilización con la CDA [Stawczyk *et al.*, 2004]. Para reducir el tiempo de proceso de liofilización combinada en camarones Donsi *et al.* [2001] en la primera etapa usaron liofilización, en el periodo intermedio CDA y en la etapa final del proceso se volvía a liofilización. Los costos energéticos se redujeron en un 30% aproximadamente con respecto a los costos asociados a un proceso de sólo una etapa de liofilización. Además, analizaron el efecto del secado al vacío y la deshidratación osmótica como tratamientos previos a CDA. Lombraña y Villarán [1997] alternaron de igual manera procesos de vacío junto con presión atmosférica para tener un balance económico y de calidad justo sin necesidad de efectuar el mismo sobre el adsorbente.

En las Figuras 28 a 34 de los anexos, se muestran esquemas de las diferentes configuraciones de equipos usados en procesos de CDA.

Como mejora en el proceso de simulación total del proceso y como herramienta de predicción, Claussen *et al.* [2007b] emplean lenguaje de programación C y FRONT END con Excel junto a una recopilación de las propiedades fisicoquímicas de los alimentos (conductividad térmica y calor específico) para calcular el coeficiente de transferencia de masa de manera experimental en procesos de criodesecación en túnel.

Finalmente, en la Tabla 2 de los anexos se presenta una recopilación de los resultados obtenidos de diferentes investigaciones referenciadas a lo largo del texto, donde se muestran los alimentos usados, parámetros de proceso y tipos de CDA.

9 CONCLUSIONES

- El proceso de CDA representa una alternativa de alta calidad a los secados convencionales en cuanto a las características organolépticas y nutricionales del producto final. En ella, los alimentos obtenidos presentan una estructura porosa deseada por sus efectos positivos en rehidratación y conservan la estructura del producto en todo el proceso, lo que se traduce en un mayor atractivo organoléptico.
- En el proceso CDA los resultados son similares a los procesos de liofilización con mayor ahorro energético, pero con tiempos más largos de procesos que requieren de actividades adicionales para mejorar las cinéticas de secado. Entre estas actividades se recomienda el uso de sistemas de bombas de calor, lechos fluidizados y ultrasonidos o microondas que permitan a través de diferentes fenómenos (aumento transferencia de calor, mayor adsorción, sonicación en la estructura respectivamente) el aumento de los procesos generales de transferencia de masa.
- El proceso CDA es reproducible a través de modelos matemáticos complejos o sencillos según el tipo de exactitud que se requiera, a partir de suposiciones que surgen de la misma interpretación de los fenómenos de transferencia de calor y masa involucrados. Los modelos difusionales y de capa de hielo uniformemente reducida son los más empleados para tal fin.
- El efecto de la temperatura a lo largo del proceso ha conducido a desarrollar sistemas de cambio de temperatura que permitan un rango adecuado según las etapas del proceso, evitando problemas típicos como el colapso de estructura por aumento de la temperatura de transición vítrea o simplemente para acelerar la etapa final de evaporación de agua.
- De acuerdo a toda la información recolectada en el campo y de la ya presencia industrial de esta tecnología en algunas plantas del mundo, se sugiere seguir en la profundización en técnicas adicionales que se incorporen a CDA y que permitan reducir los tiempos finales de proceso, como principal inconveniente de la metodología para su aplicación masiva en la industria.
- Finalmente, es importante que los autores que trabajen en la actualidad con CDA, suministren mayor información respecto a los aspectos nutricionales de los productos criodesecados, debido a la poca la información analizada sobre este factor.

10 BIBLIOGRAFÍA

- AGUDELO, L.M. Interacciones agua-sólido en frutas liofilizadas y sus consecuencias sobre aspectos estructurales, atributos cromáticos y distribución espacial de la luz. Tesis. Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2012.
- ALVARADO, J.D.D. *Principios de Ingeniería Aplicados a Alimentos*. Ambato, Ecuador: Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos, Universidad Técnica de Ambato, 1996. 157 p.
- ALVES-FILHO, O. Sweep numerical method and mass transport analysis in atmospheric freeze drying of protein particles. *Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 46, no. 8-9, p. 923-928.
- ALVES-FILHO, O., EIKEVIK, T., MULET, A., GARAU, C. Y ROSSELLO, C. Kinetics and mass transfer during atmospheric freeze drying of red pepper. *Drying Technology*, 2007, vol. 25, no. 7-8, p. 1155-1161.
- BANTLE, M. Y EIKEVIK, T.M. Parametric study of high-intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas. *Drying Technology*, 2011, vol. 29, no. 10, p. 1230-1239.
- BANTLE, M., EIKEVIK, T.M. Y RUSTAD, T. Atmospheric freeze-drying of *Calanus finmarchicus* and its effects on proteolytic and lipolytic activities. En: IV Conferencia Nórdica de Secado. Reykjavik, Iceland, 2009, p. 1-9.
- BANTLE, M., KOLSAKER, K. Y EIKEVIK, T.M. Modification of the Weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food. *Drying Technology*, 2011, vol. 29, no. 10, p. 1161-1169.
- BHASKARACHARYA, R.K., KENTISH, S. Y ASHOKKUMAR, M. Selected applications of ultrasonics in food processing. *Food Engineering Reviews*, 2009, vol. 1, no. 1, p. 31-49.
- BOEH-OCANSEY, O. A study of the freeze drying of some liquid foods in vacuo and at atmospheric pressure. *Drying Technology*, 1983, vol. 2, no. 3, p. 389-405.
- BOEH-OCANSEY, O. Effects of Vacuum and Atmospheric Freeze-Drying on Quality of Shrimp, Turkey Flesh and Carrot Samples. *Journal of Food Science*, 1984, vol. 49, no. 6, p. 1457-1461.
- BOEH-OCANSEY, O. Freeze-drying in a fluidized-bed atmospheric dryer and in a vacuum dryer: Evaluation of external transfer coefficients. *Journal of Food Engineering*, 1988, vol. 7, no. 2, p. 127-146.
- BÓRQUEZ, R., BUSTOS, P., CARO, F. Y FERRER, J. Atmospheric Freeze-Impingement Drying of an Autochthonous Microencapsulated Probiotic Strain. *Drying Technology*, 2013/04/04 2013, vol. 31, no. 5, p. 535-548.
- BRAVO MENDOZA, M.I. Liofilización a presión atmosférica ya vacío de pimientos verdes *Capsicum annuum L.* Tesis. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, 2005. 86 p.
- BRENNAN, J.G. *Las operaciones de la ingeniería de los alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acribia, 1980. 714 p.
- BUBNOVICH, V., QUIJADA, E. Y REYES, A. Computer simulation of atmospheric freeze drying of carrot slices in a fluidized bed. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2009, vol. 56, no. 2, p. 170-191.
- BUBNOVICH, V., REYES, A., QUIJADA, E. Y MAHN, A. Numerical simulation of lyophilization of carrot slices at atmospheric pressure in a fluidized bed. *Journal of Food Engineering*, 2012, vol. 109, no. 4, p. 659-667.
- BURKE, R.F. Y DECAREAU, R.V. Recent advances in the freeze-drying of food products. *Advances in Food Research*, 1964, vol. 13, p. 1-88.

- CLAUSSEN, I., STRØMMEN, I., EGELANDSDAL, B. Y STRAETKVERN, K. Effects of drying methods on functionality of a native potato protein concentrate. *Drying Technology*, 2007a, vol. 25, no. 6, p. 1091-1098.
- CLAUSSEN, I.C., ANDRESEN, T., EIKEVIK, T.M. Y STRØMMEN, I. Atmospheric freeze drying—Modeling and simulation of a tunnel dryer. *Drying Technology*, 2007b, vol. 25, no. 12, p. 1959-1965.
- CLAUSSEN, I.C., STRØMMEN, I., HEMMINGSEN, A.K.T. Y RUSTAD, T. Relationship of product structure, sorption characteristics, and freezing point of atmospheric freeze-dried foods. *Drying Technology*, 2007c, vol. 25, no. 5, p. 853-865.
- CHARM, S.E. *The fundamentals of food engineering*. Westport, Connecticut, USA: AVI Publishing Co., Inc., 1981.
- CHEN, G. Y WANG, W. Role of freeze drying in nanotechnology. *Drying Technology*, 2007, vol. 25, no. 1, p. 29-35.
- DI MATTEO, P., DONSI, G. Y FERRARI, G. The role of heat and mass transfer phenomena in atmospheric freeze-drying of foods in a fluidised bed. *Journal of Food Engineering*, 2003, vol. 59, no. 2, p. 267-275.
- DONSI, G., FERRARI, G. Y MATTEO, D. Utilization of combined processes in freeze-drying of shrimps. *Food and Bioproducts Processing*, 2001, vol. 79, no. 3, p. 152-159.
- DUAN, X., DING, L., REN, G.-Y., LIU, L.-L. Y KONG, Q.-Z. The drying strategy of atmospheric freeze drying apple cubes based on glass transition. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, vol. 91, no. 4, p. 534-538.
- EIKEVIK, T.M., ALVES-FILHO, O. Y BANTLE, M. Microwave-assisted atmospheric freeze drying of green peas: A case study. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, no. 14, p. 1592-1599.
- EIKEVIK, T.M., ALVES-FILHO, O. Y STRØMMEN, I. Heat pump drying-new technologies and operational modes for production of a new generation of high quality dried products. *En: 21st International Congress of Refrigeration, ICR0068*. Washington, DC, USA, 2003, p. 519-550.
- FELLOWS, M. *Tecnología del Procesado de Alimentos*. Zaragoza, España: Editorial Acibria, 1994.
- FENNEMA, O. *Química de los Alimentos*. 2 ed. Zaragoza, España: Editorial Acibria, 2000.
- FEPEX. Importaciones de frutas y hortalizas por parte de la UE de terceros países aumentó 6% en volumen el 2016. 2017, [Fecha de consulta: 21 Mayo 2017]. Disponible en: <http://agraria.pe/noticias/importaciones-de-frutas-y-hortalizas-por-parte-de-la-ue-de-13783>.
- FERNANDES, F.A., RODRIGUES, S., LAW, C.L. Y MUJUMDAR, A.S. Drying of exotic tropical fruits: a comprehensive review. *Food and Bioprocess Technology*, 2011, vol. 4, no. 2, p. 163-185.
- FLOSDORF, E. Y KIMBALL, A. Studies with *H. Pertussis*: Maintenance of Cultures in Phase I. *Journal of Bacteriology*, 1939, vol. 35, p. 696-704.
- FLOSDORF, E.W. Y MUDD, S. Procedure and apparatus for preservation in “lyophile” form of serum and other biological substances. *The Journal of Immunology*, 1935, vol. 29, no. 5, p. 389-425.
- GALLEGO-JUAREZ, J.A. High-power ultrasonic processing: recent developments and prospective advances. *Physics Procedia*, 2010, vol. 3, no. 1, p. 35-47.
- GALLEGO-JUÁREZ, J.A., RIERA, E., DE LA FUENTE BLANCO, S., RODRÍGUEZ-CORRAL, G., ACOSTA-APARICIO, V.M. Y BLANCO, A. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. *Drying Technology*, 2007, vol. 25, no. 11, p. 1893-1901.

- GARCÍA-PASCUAL, P., EIKEVIK, T.M., ALVES-FILHO, O. Y STRØMMEN, I. Dehydration of green peas under atmospheric freeze-drying conditions. *En: XIV Simposio Internacional de Secado*. São Paulo, Brasil, 2004, p. 1521-1528.
- GARCÍA-PÉREZ, J.V. Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. Tesis., 2008.
- GARCIA-PEREZ, J.V., CARCEL, J.A., RIERA, E., ROSSELLÓ, C. Y MULET, A. Intensification of low-temperature drying by using ultrasound. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, no. 11-12, p. 1199-1208.
- GARCÍA, P.P., ALVES-FILHO, O., STROMMEN, I. Y EIKEVIK, T. Liofilización de guisantes a presión atmosférica. *ALIMENTACION EQUIPOS Y TECHNOLOGIA*, 2004, p. 74-79.
- GEANKOPLIS, C.J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Compañía Editorial Continental, 1998.
- HAMMAMI, C. Y RENÉ, F. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. *Journal of Food Engineering*, 1997, vol. 32, no. 2, p. 133-154.
- HELDMAN, D. Y HOHNER, G. An analysis of atmospheric freeze drying. *Journal of Food Science*, 1974, vol. 39, no. 1, p. 147-155.
- HELLER, G. A quantitative study of environmental factors involved in survival and death of bacteria in the desiccated state. *Journal of Bacteriology*, 1941, vol. 41, no. 2, p. 109.
- HUANG, L.-L. Y ZHANG, M. Trends in development of dried vegetable products as snacks. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, no. 5, p. 448-461.
- IBARZ, A. Y BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Technomic, 2005.
- JAFAR, F. Y FARID, M. Analysis of heat and mass transfer in freeze drying. *Drying Technology*, 2003, vol. 21, no. 2, p. 249-263.
- JENNINGS, T.A. *Seminario de liofilización*. USA: Sociedad Internacional de Liofilización, 1993.
- KHALLOUFI, S. Y RATTI, C. Quality deterioration of freeze-dried foods as explained by their glass transition temperature and internal structure. *Journal of Food Science*, 2003, vol. 68, no. 3, p. 892-903.
- KOC, B., EREN, I. Y ERTEKIN, F.K. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 85, no. 3, p. 340-349.
- LEUENBERGER, H., PLITZKO, M. Y PUCHKOV, M. Spray freeze drying in a fluidized bed at normal and low pressure. *Drying Technology*, 2006, vol. 24, no. 6, p. 711-719.
- LI, S., ZBICINSKI, I., WANG, H., STAWCZYK, J. Y ZHANG, Z. Diffusion model for apple cubes atmospheric freeze-drying with the effect of shrinkage. *International Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 6, p. 1-7.
- LINK, G.K., EGGERS, V. Y MOULTON, J.E. Use of frozen vacuum-dried material in auxin and other chemical analyses of plant organs: its extraction with dry ether. *Botanical Gazette*, 1941, vol. 102, no. 3, p. 590-601.
- LIU, Y., ZHAO, Y. Y FENG, X. Exergy analysis for a freeze-drying process. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28, no. 7, p. 675-690.
- LOMBRAÑA, J. Y VILLARÁN, M.C. The influence of pressure and temperature on freeze-drying in an adsorbent medium and establishment of drying strategies. *Food Research International*, 1997, vol. 30, no. 3, p. 213-222.
- MELLOR, J.D. *Fundamentals of freeze-drying*. London, UK: Academic Press Inc. Ltd., 1978.
- MENSHUTINA, N., KORNEEVA, A., GONCHAROVA, S. Y LEUENBERGER, H. Modeling of freeze drying in fluidized bed. *Drying*, 2004, vol. 4, p. 680-686.

- MERYMAN, H. Sublimation freeze-drying without vacuum. *Science*, 1959, vol. 130, no. 3376, p. 628-629.
- MUMENTHALER, M. Y LEUENBERGER, H. Atmospheric spray-freeze drying: a suitable alternative in freeze-drying technology. *International Journal of Pharmaceutics*, 1991, vol. 72, no. 2, p. 97-110.
- NIELSEN. Hábitos de los consumidores en la tendencia saludable. Bogotá, Colombia: Nielsen, 2015, [Fecha de consulta: 25 Agosto 2016]. Disponible en: <<http://www.nielsen.com/co/es/insights/news/20151/habitos-consumidores-colombianos.html>>.
- NIREESHA, G., DIVYA, L., SOWMYA, C., VENKATESHAN, N., BABU, M.N. Y LAVAKUMAR, V. Lyophilization/freezing drying—an review. *International Journal of Novel Trends in Pharmaceutical Sciences*, 2013, vol. 3, no. 4, p. 87-98.
- OIKONOMOPOULOU, V.P. Y KROKIDA, M.K. Structural properties of dried potatoes, mushrooms, and strawberries as a function of freeze-drying pressure. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, no. 4, p. 351-361.
- ORREGO, C.E. *Congelación y liofilización de alimentos*. Colombia: Gobernación de Caldas, 2008.
- OZUNA, C., CÁRCEL, J.A., WALDE, P.M. Y GARCIA-PEREZ, J.V. Low-temperature drying of salted cod (*Gadus morhua*) assisted by high power ultrasound: Kinetics and physical properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, vol. 23, p. 146-155.
- PÉREZ, C.N. Estudio teórico y experimental de la liofilización de locos (concholepas concholepas). Tesis. Santiago, Chile: Universidad de Santiago de Chile, Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería Química, 2010.
- PROCOLOMBIA. Acuerdo Comercial con la Unión Europea. Bogotá, Colombia: Proexport Colombia, 2012, [Fecha de consulta: 26 Agosto 2016]. Disponible en: <http://www.procolombia.co/sites/default/files/cartilla_2_-_agroindustria.pdf>.
- RAHMAN, S. Y MUJUMDAR, A. A novel atmospheric freeze-drying system using a vibro-fluidized bed with adsorbent. *Drying Technology*, 2008, vol. 26, no. 4, p. 393-403.
- RAHMAN, S. Y SAIDUR, R. A novel atmospheric freeze dryer using simultaneous application of subzero and hot air streams using a vortex chiller. *Drying Technology*, 2016, vol. 34, no. 12, p. 1406-1413.
- RAMÍREZ-NAVAS, J.S. Liofilización de Alimentos. *Reciteia Revista: Revisiones de la Ciencia, Tecnología e Ingeniería de los Alimentos*, 2006, vol. 6, p. 1-60.
- RAMÍREZ-NAVAS, J.S., CAÑIZARES, J.E. Y ACEVEDO, D. Criodesecación atmosférica de papa (*Solanum tuberosum*). *Revista Facultad de Ingeniería*, 2012, no. 61, p. 74-82.
- RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 2001, vol. 49, no. 4, p. 311-319.
- RATTI, C. Freeze and vacuum drying of foods. En: CHEN Y MUJUMDAR. *Drying Technologies in Food Processing*. Oxford: Blackwell Publishing Ltda., 2009, p. 225-251.
- REYES, A., BUBNOVICH, V., BUSTOS, R., VÁSQUEZ, M., VEGA, R. Y SCHEUERMANN, E. Comparative study of different process conditions of freeze drying of ‘Murtilla’ berry. *Drying Technology*, 2010a, vol. 28, no. 12, p. 1416-1425.
- REYES, A., BUSTOS, R., VÁSQUEZ, M.B. Y SCHEUERMANN, E. Optimization of “murtilla” berry drying in an atmospheric freeze dryer”. *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, p. 183.
- REYES, A., MAHN, A. Y HUENULAF, P. Drying of apple slices in atmospheric and vacuum freeze dryer. *Drying Technology*, 2011, vol. 29, no. 9, p. 1076-1089.

- REYES, A., VEGA, R.V. Y BRUNA, R.D. Effect of operating conditions in atmospheric freeze drying of carrot particles in a pulsed fluidized bed. *Drying Technology*, 2010b, vol. 28, no. 10, p. 1185-1192.
- ROGERS, T.L., NELSEN, A.C., SARKARI, M., YOUNG, T.J., JOHNSTON, K.P. Y WILLIAMS, R.O. Enhanced aqueous dissolution of a poorly water soluble drug by novel particle engineering technology: spray-freezing into liquid with atmospheric freeze-drying. *Pharmaceutical Research*, 2003, vol. 20, no. 3, p. 485-493.
- SANTACATALINA, J., FISSORE, D., CARCEL, J., MULET, A. Y GARCIA-PEREZ, J. Model-based investigation into atmospheric freeze drying assisted by power ultrasound. *Journal of Food Engineering*, 2015, vol. 151, p. 7-15.
- SANTACATALINA, J., OZUNA, C., CARCEL, J., GARCIA-PEREZ, J. Y MULET, A. Quality assessment of dried eggplant using different drying methods: hot air drying, vacuum freeze drying and atmospheric freeze drying. En: 11th International Congress on Engineering and Food. 2011.
- SANTACATALINA, J.V. Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en procesos de secado a baja temperatura. Tesis de PhD. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Tecnología de Alimentos, 2015. 228 p.
- SANTACATALINA, J.V., CÁRCEL, J.A. Y GARCÍA, J.V. Estudio de la influencia del secado a baja temperatura en la capacidad de rehidratación y en la textura de berenjena y zanahoria. Tesis de Máster Universitario en Ciencia e Ingeniería de los Alimentos. Valencia, España: Universitat Politècnica de València, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, 2013. 19 p.
- SCHMIDT, F., CHEN, Y., KIRBY-SMITH, M. Y MACNELL, J. Low temperature air drying of carrot cubes. *Journal of Food Science*, 1977, vol. 42, no. 5, p. 1294-1298.
- SIUCIŃSKA, K. Y KONOPACKA, D. Application of ultrasound to modify and improve dried fruit and vegetable tissue: A review. *Drying Technology*, 2014, vol. 32, no. 11, p. 1360-1368.
- STAWCZYK, J., LI, S. Y MODRZEJEWSKA, Z. Chitosan stuffs atmospheric freeze-drying kinetics. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2007, vol. 2, no. 2, p. 124-129.
- STAWCZYK, J., LI, S., WITROWA-RAJCHERT, D. Y FABISIAK, A. Kinetics of atmospheric freeze-drying of apple. En: Drying of Porous Materials. Springer, 2006, p. 159-172.
- STAWCZYK, J., LI, S. Y ZYLLA, R. Freeze drying of food products in a closed system. En: 14th International Drying Symposium (IDS 2004). São Paulo, Brazil, 2004, p. 949-954.
- STRØMMEN, I., ALVES-FILHO, O. Y EIKEVIK, T. Atmospheric freeze drying with heat pumps—A new alternative for high quality dried food products. En: III Conferencia Nórdica de Secado. Karlstad, Sweden, 2005, p. 1-12.
- SUNDERLAND, J.E. Microwave freeze drying. *Journal of Food Process Engineering*, 1980, vol. 4, no. 4, p. 195-212.
- TOMOVA, P., BEHNS, W., HAIDA, H., IHLOW, M. Y MÖRL, L. Experimental analysis of fluidized bed freeze drying. En: SILVA. 4th International Drying Symposium. Sao Paulo, Brazil, 2004, p. 526-532.
- USTAD, T.S. A framework for modeling internal mass transfer in atmospheric freeze drying. Tesis de PhD. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology
Department of Energy and Process Engineering, 2011. 135 p.
- WANG, Z., FINLAY, W., PEPPLER, M. Y SWEENEY, L. Powder formation by atmospheric spray-freeze-drying. *Powder Technology*, 2006, vol. 170, no. 1, p. 45-52.

- WOLFF, E., DELISLE, B., CORRIEU, G. Y GIBERT, H. Freeze-drying of *Streptococcus thermophilus*: a comparison between the vacuum and the atmospheric method. *Cryobiology*, 1990, vol. 27, no. 5, p. 569-575.
- WOLFF, E. Y GIBERT, H. Atmospheric freeze-drying part 1: Design, experimental investigation and energy-saving advantages. *Drying Technology*, 1990a, vol. 8, no. 2, p. 385-404.
- WOLFF, E. Y GIBERT, H. Atmospheric freeze-drying part 2: Modelling drying kinetics using adsorption isotherms. *Drying Technology*, 1990b, vol. 8, no. 2, p. 405-428.
- XIA, P., TIAN, K., MA, X.L., TAO, L.R. Y CAI, Y.L. Study of an atmospheric freeze drying refrigeration system. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 860, p. 1674-1678.
- XU, D., WEI, L., GUANGYUE, R., WENCHAO, L. Y YUNHONG, L. Comparative study on the effects and efficiencies of three sublimation drying methods for mushrooms. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015a, vol. 8, no. 1, p. 91.
- XU, D., WENCHAO, L., GUANGYUE, R., XIAOTONG, Y. Y YUNHONG, L. Atmospheric freeze drying of garlic slices based on freezing point depression. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015b, vol. 8, no. 4, p. 133.
- ZIELINSKA, M., ZAPOTOCZNY, P., ALVES-FILHO, O., EIKEVIK, T. Y BLASZCZAK, W. Microwave vacuum-assisted drying of green peas using heat pump and fluidized bed: A comparative study between atmospheric freeze drying and hot air convective drying. *Drying Technology*, 2013a, vol. 31, no. 6, p. 633-642.
- ZIELINSKA, M., ZAPOTOCZNY, P., ALVES-FILHO, O., EIKEVIK, T. Y BLASZCZAK, W. A multi-stage combined heat pump and microwave vacuum drying of green peas. *Journal of Food Engineering*, 2013b, vol. 115, no. 3, p. 347-356.

11 ANEXOS

11.1 Anexo 1

Tabla 2. Condiciones del proceso y resultados en CDA reportados en los últimos años

Tecnología CDA	Producto	Dimensiones producto	Tiempo secado h	Temperatura operación °C	% Reducción de humedad	Referencia
LF BC	Arvejas verdes	Diámetro 8 y 10 mm	12	-5	73	[García-Pascual <i>et al.</i> , 2004]
			12	-10	69	
LF BC	Pimientos rojos	Cubos 5 mm	18	-3	97	[Alves-Filho <i>et al.</i> , 2007]
			24	-5	99	
			25	-10	98	
LF BC	Partículas de Proteína	Fluidizado, diámetro menor a 8 micras	4	-5 CDA * 25 BC	85	[Alves-Filho, 2010]
			5	-5 CDA * 25 BC	93	
			8	-5 CDA * 25 BC	94	
			8	-5 CDA	58	
LF BC	Calanus finmarchicus	1 mm	24	-5	88	[Bantle <i>et al.</i> , 2009]
	Zooplankton		24	-10	88	
LF US	Arvejas verdes	8.45 mm	24	-3	Incremento en difusión efectiva en un 14.8%	[Bantle y Eikevik, 2011]
				-6		
				0		
LF	Leche	1 mm	4	-20	95	[Boeh-Ocansey, 1983]
		3mm	4	-20	72	
	Solución de Café	1 mm	3	-23	83	
		3 mm	3	-25	42	
LF	Camarones	10 mm diámetro	16	-10 a 20	96	[Boeh-Ocansey, 1984]
	Carne de pavo	6 mm	18	-10 a 20	93	
	Zanahorias	4 mm	10	-10 a 20	97	

Tecnología CDA	Producto	Dimensiones producto	Tiempo secado h	Temperatura operación °C	% Reducción de humedad	Referencia
LF BC	Proteína de papa	NI	NI	-10	90	[Claussen <i>et al.</i> , 2007a]
LF	Bacalao	20 x 20 x 5 mm	50	-5	88	[Claussen <i>et al.</i> , 2007c]
	Repollo	20 x 20 x 5 mm	75	-5	74	
	Manzana	20 x 20 x 5 mm	75	-5	74	
LF AB	Papa	6 mm diámetro	29	-8	96	[Di Matteo <i>et al.</i> , 2003]
		8 mm diámetro			95	
		11 mm diámetro			94	
LF AB	Camarones	4 mm	16	-14	26	[Donsi <i>et al.</i> , 2001]
		6 mm			18	
		8 mm			13	
LF BC	Hongos	NI	32	-10 CDA * 40 BC	89	[Xu <i>et al.</i> , 2015a]
LF MO	Arvejas verdes	8.45 mm diámetro	6.5	0 - 0 W	71	[Eikevik <i>et al.</i> , 2012]
			6.5	0 - 140 W	76	
			5	0 - 280 W	80	
VLF	Papa	cubos 2 mm	8	- 6 y -11°C	97	[Rahman y Mujumdar, 2008]
LF	Fresas	Disco 25mm x 2 mm	6	-5	89	[Rahman y Saidur, 2016]
			6	-10	80	
			6	- 10 y -5°C	49	
AB	Papa	0.5 mm espesor	200	1.1	99	[Ramírez-Navas <i>et al.</i> , 2012]
LF AB - IR	Murtilla	NI	13	- 5 y 15°C	90	[Reyes <i>et al.</i> , 2009]
LF AB - IR	Zanahorias	6 x 6 x 1.5 mm	11.5	-5°C	99	[Reyes <i>et al.</i> , 2010b]
LF AB - IR	Manzana	4 x 12 x 40 mm	16	- 5 y 15°C	91	[Reyes <i>et al.</i> , 2011]
LF	Berenjena	cubos 10 mm	22	-14°C	46	[Santacatalina <i>et al.</i> , 2013]
	Manzana		139		82	
	Zanahoria		167		81	

Tecnología CDA	Producto	Dimensiones producto	Tiempo secado h	Temperatura operación °C	% Reducción de humedad	Referencia
LF US	Manzana	cubos 8.8 mm	39	-10°C	61	[Santacatalina <i>et al.</i> , 2015]
			8.5	-10°C + 50 W	61	
LF BC	Quitosano	150 x 100 x 1 mm	NI	NI	NI	[Stawczyk <i>et al.</i> , 2007]
LF BC	Manzana	10 x 10 x 10 mm	190	-4	68	[Stawczyk <i>et al.</i> , 2006]
			190	-8	68	
LF BC	Arvejas verdes	NI	200 min	-5	12	[Zielinska <i>et al.</i> , 2013b]
LF BC	Manzana	10 x 10 x 10 mm	56	-5	92	[Duan <i>et al.</i> , 2013]
			64	-10	92	
LF BC	Ajo	rodajas 5 mm espesor	36	-5	91	[Xu <i>et al.</i> , 2015b]
			44	-10	91	
LF AB	Papa	Paralelepípedos 3x10x10 mm	7.5	-5	89	[Wolff y Gibert, 1990b]
			8	-10	61	
			8	-15	44	

CONVENCIONES TABLA 2:

CDA	Criodesecación a presión atmosférica
LF	Lecho fluidizado
BC	Bomba de Calor
AB	Material absorbente
MO	Microondas
VLF	Lecho fluidizado y vibración
IR	Infrarrojo

11.2 Anexo 2.

Tabla 3. Comparativo de los tipos de asistencia en el proceso CDA

Tipo CDA	Tipo de Alimento	Principio o Descripción	Ventajas	Desventajas
Bomba de Calor	Frutas y hortalizas, productos de alto valor añadido	Sistema que permite la obtención de calor o frío por medio de la utilización de un ciclo de refrigeración	Combinación de temperaturas, corto tiempo de secado	Alta inversión inicial
Lecho Fluidizado	Frutas y hortalizas, productos de alto valor añadido (tamaño reducido)	El material se seca mientras está suspendido en un flujo ascendente (aire frío)	Alta eficiencia térmica, altas tasas de secado debido al buen contacto con partículas, bajo costo	Interacciones con el adsorbente, tamaño del alimento
Ultrasonido	Frutas y hortalizas, productos de alto valor añadido	Alimentos tratados con intensidades de sonido 20 kHz-100 kHz	Uniformidad de secado, cortos tiempos de secado, mejor control del proceso	Impacto sonoro
Microondas	Frutas y hortalizas, productos de alto valor añadido, pastas	Alimentos tratados con frecuencias de secado de 300 a 3000 MHz	Uniformidad de secado, cortos tiempos de secado, mejor control del proceso	Alto costo de instalación
Aspersión	Alimentos Líquidos y suspensiones, productos farmacéuticos	Líquido atomizado (pulverizado) en una cámara de secado, en contacto con aire frío	Pequeños tamaños de partículas, secado rápido y uniforme	Agglomeración del alimento

11.3 Anexo 3. Diferentes configuraciones de equipos usados en CDA

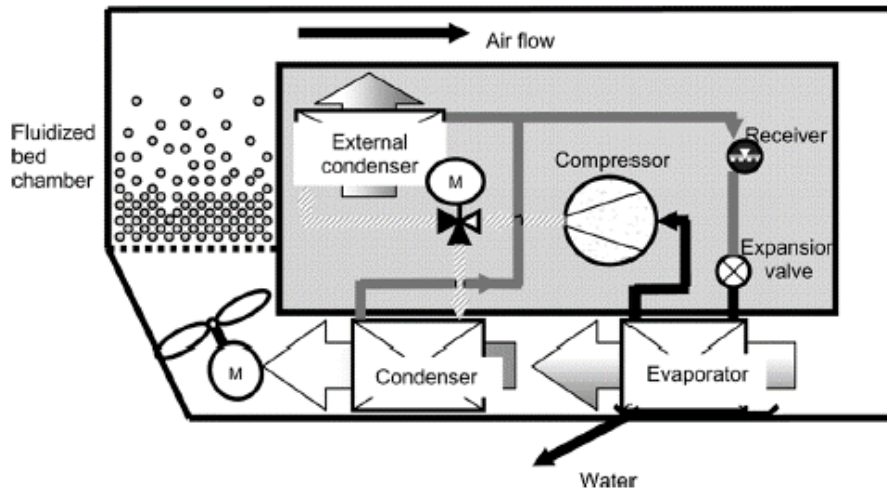


Figura 28. Esquema del equipo usado en CDA de proteína de tomate

Fuente: Claussen et al. [2007a]

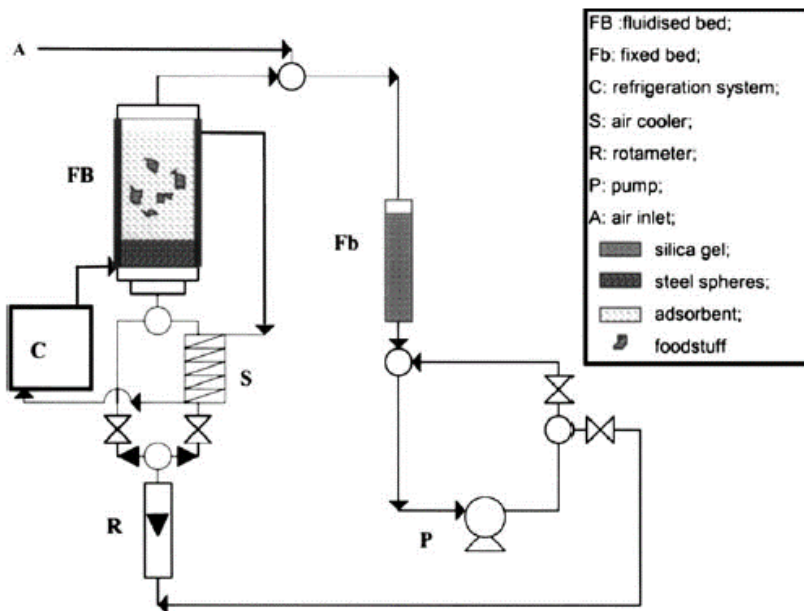


Figura 29. Esquema del equipo usado en CDA de papa

Fuente: Di Matteo et al. [2003]

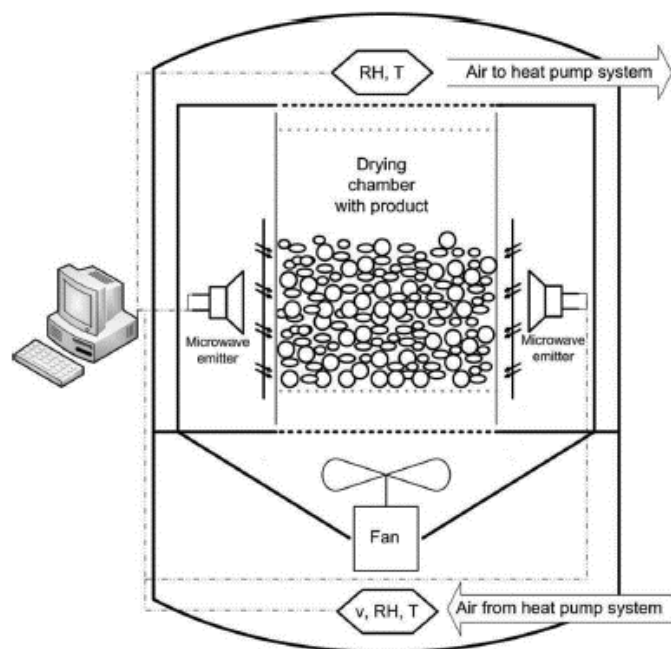
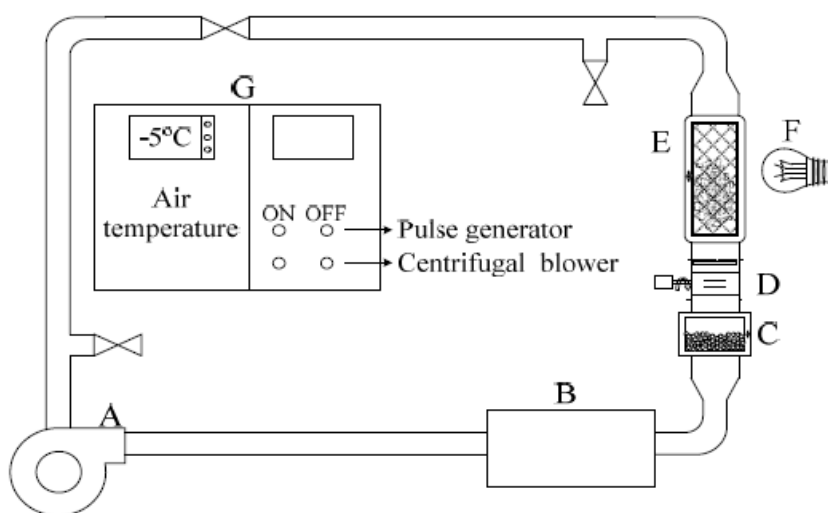


Figura 30. Esquema del equipo usado en CDA de papa

Fuente: Eikevik et al. [2012]



Atmospheric Freeze Dryer. A: centrifugal blower, B: air cooling system, C: silica gel, D: pulse generator, E: freeze drying chamber, F: IR lamp, G: control panel.

Figura 31. Esquema del equipo usado en CDA de murtila berry

Fuente: Reyes et al. [2009]

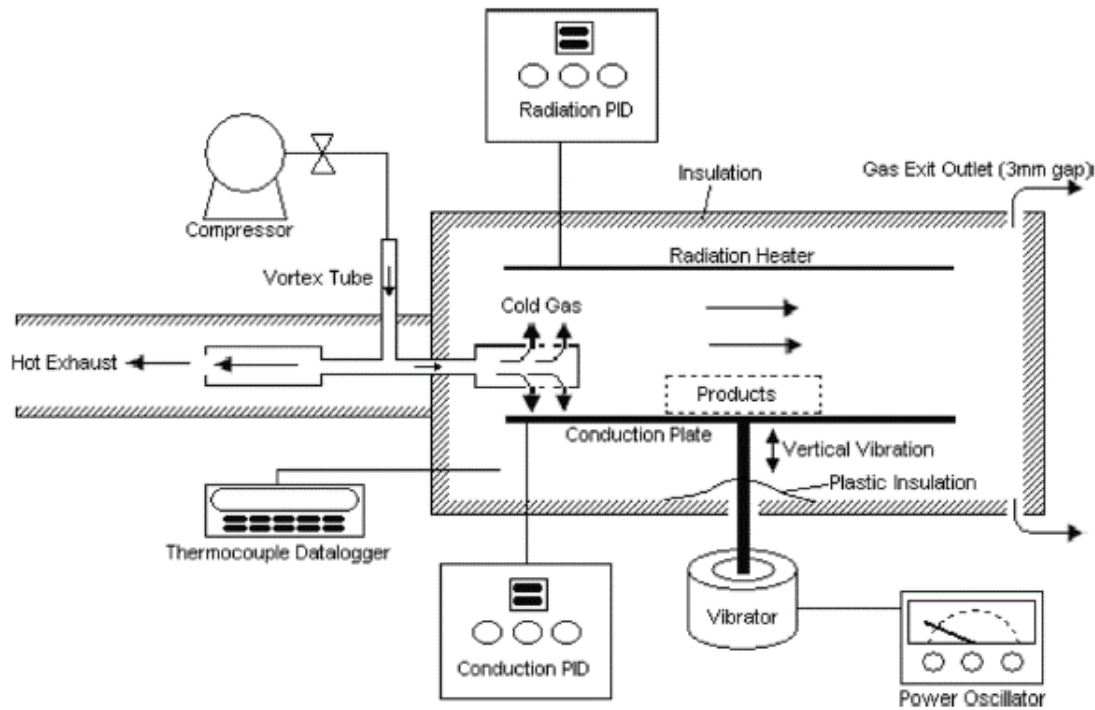


Figura 32. Esquema del equipo usado en CDA de papa

Fuente: [Rahman y Mujumdar, 2008]

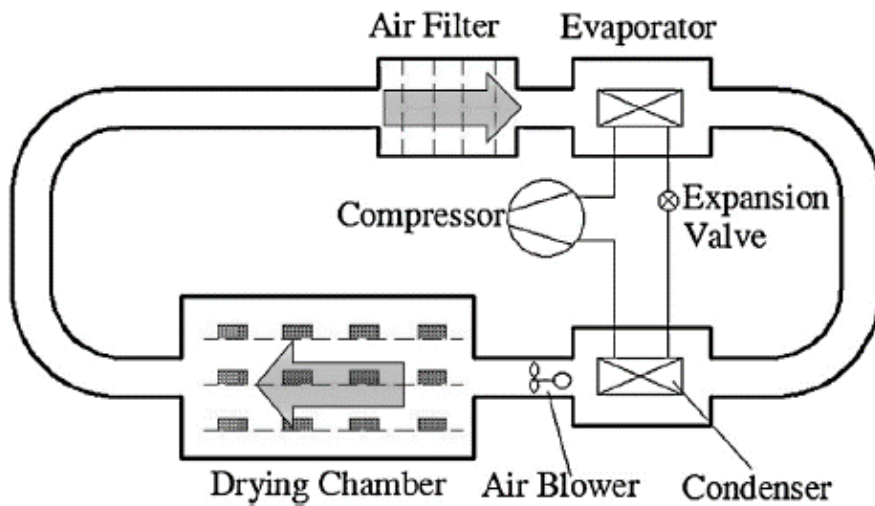


Figura 33. Esquema del equipo usado en CDA de manzana

Fuente: [Duan et al., 2013]

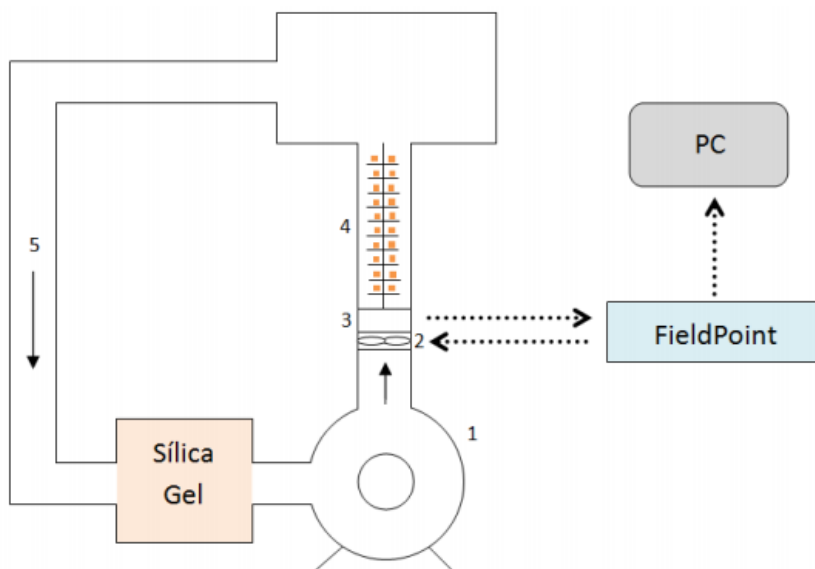


Diagrama del secadero LPA con recirculación de aire. 1. Soplane. 2. Anemómetro. 3. Sondas de temperatura y humedad relativa. 4. Cámara de secado. 5. Sentido del flujo de aire.

Figura 35. Equipo de CDA.

Fuente: [Santacatalina, 2015]

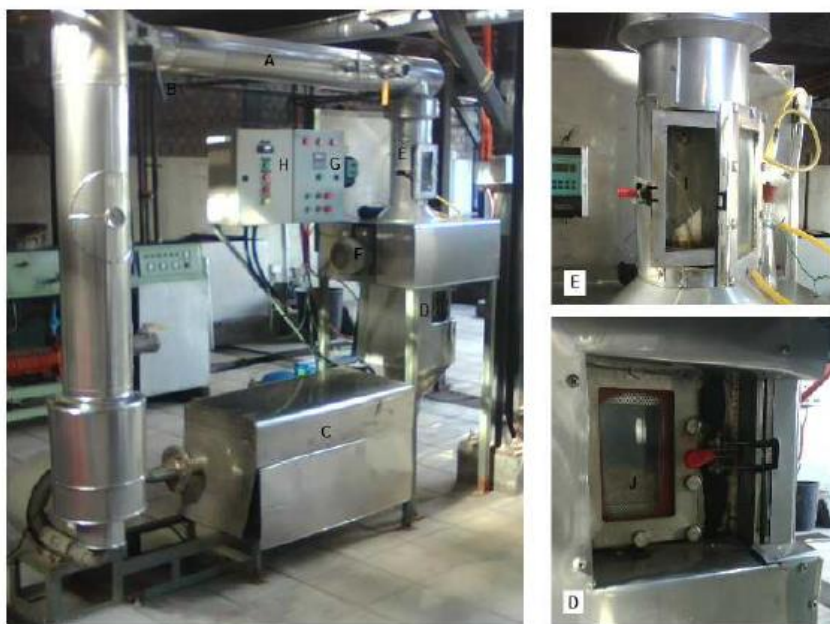


Figura 36. Equipo de CDA ubicado en el laboratorio de operaciones unitarias del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Santiago de Chile.

Fuente: [Pérez, 2010]