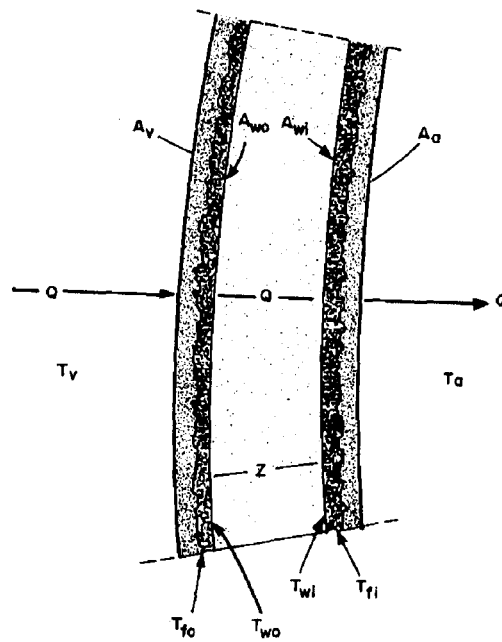


# ENGINEERING PRINCIPLES APPLIED IN FOODS PRINCIPIOS DE INGENIERÍA APLICADOS A ALIMENTOS

## SUMMARY - RESUMEN



**Juan de Dios Alvarado**

INGENIERO EN ALIMENTOS, M. en C.  
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO - ECUADOR

SECRETARIA GENERAL DE LA ORGANIZACIÓN DE LOS ESTADOS AMERICANOS  
PROGRAMA REGIONAL DE DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLÓGICO  
PROYECTO MULTINACIONAL DE BIOTECNOLOGIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

# Principios de Ingeniería Aplicados a Alimentos

## RESUMEN

La mayor producción científica, en términos de artículos técnicos publicados y de libros de texto de Ingeniería de Alimentos, está en idioma inglés. El aporte de los países de habla española es limitado. Con el propósito de llenar este vacío, siquiera en parte, se realizó el presente trabajo.

Su contenido está orientado a servir como guía, o posiblemente como texto, a estudiantes de pregrado de las carreras de Ingeniería y Tecnología de Alimentos. La información contenida, en especial la relacionada con las propiedades físicas de numerosos alimentos, hace que sirva como documento de consulta. Además, el tratamiento de determinados temas, como el cálculo de procesos térmicos y la determinación de coeficientes de transferencia de calor, posibilita su uso como documento de apoyo en estudios de postgrado.

El libro está constituido por nueve capítulos y treinta y ocho temas. La característica relevante de todos los temas es la presentación de resultados experimentales, obtenidos con muy pocas disponibilidades de equipos y reactivos de laboratorio, se ha tratado, por lo mismo, de agudizar el ingenio para utilizar lo disponible de la mejor manera. Se ha aprovechado igualmente de la gran diversidad de alimentos, que convierte en ilimitado el número de posibilidades de aplicación de los principios científicos.

El orden de los capítulos responde a la experiencia de quince años de docencia universitaria. Se advertirá que empiezan ellos con los conceptos básicos, continúan con el estudio de las propiedades físicas de los alimentos, y tratan al final los procesos que requieren conocimientos adquiridos previamente. Para facilitar su uso, se presenta la nomenclatura de cada capítulo.

Todos los temas están estructurados para que puedan ser utilizados como unidades experimentales independientes. Incluyen: Introducción y Bibliografía, que consideran los aspectos cognoscitivos de la enseñanza. Materiales y Métodos, y Resultados Experimentales, que explican los aspectos de procedimiento. Objetivos y Cuestionario, en los que se intenta llegar a los aspectos formativos, propósito principal de toda labor educativa.

Los capítulos y temas considerados son:

**Capítulo 1. Balances de materia y de energía.** Se parte de la consideración de que el uso de estos balances es fundamental para la cimentación y desarrollo de numerosas ingenierías. Desde un punto de vista didáctico, en este capítulo se indican los conceptos básicos. Se realizan determinaciones y cálculos para demostrar el cumplimiento de los balances. Por último, se destaca la importancia y el constante uso de los balances en muchas situaciones prácticas que se presentan en el estudio y procesamiento de alimentos.

El Tema 1.1. se refiere al uso de balances de materiales durante la elaboración de jaleas. Luego de indicar la ecuación fundamental y los límites para identificar las corrientes de ingreso y salida de materiales, se utilizan medidas refractométricas para cuantificar los cambios en el contenido de sólidos solubles durante la cocción. Luego se comparan aquellos con los valores establecidos

en el balance de sólidos y se demuestra que existe concordancia en los resultados.

La elaboración de jaleas, mermeladas y compotas es muy común en la fabricación de alimentos; sin embargo, en ciertas ocasiones no hay refractómetros disponibles. El poder seguir mediante balances, el aumento de la concentración que ocurre por evaporación del agua durante la cocción, hace que el técnico que controla el proceso, pueda orientar criterios con relación al tiempo y las condiciones de cocción, para elaborar estos productos u otros similares.

El Tema 1.2. ejemplifica el uso de los balances de energía en la determinación del calor específico. Se define al calor específico y se desarrolla una ecuación para su cálculo en frutas y vegetales frescos. Se reportan las ecuaciones y modelos más utilizados para calcular esta propiedad térmica en alimentos. En forma detallada se desarrollan los balances de energía, que sustentan el método de Hwang y Hayakawa para la determinación experimental de la propiedad, en el cual no existe contacto directo entre el producto y el medio de intercambio de calor.

Se presentan los resultados experimentales conseguidos en muestras de leche de vaca, utilizando calorímetros adaptados con termos comerciales. Los valores obtenidos fueron muy próximos a los reportados en la literatura especializada, y a los que se calculan con las ecuaciones y modelos previamente indicados.

Además de comprobar la validez del método experimental, se destaca la facilidad de aplicación y la posibilidad de usarlo en numerosos alimentos líquidos, como jugos. El tema es un ejemplo claro de las múltiples alternativas de aplicación de los balances de energía.

Posiblemente el gráfico más utilizado por los ingenieros, es la carta psicrométrica o carta de humedad. Como esta carta es un medio gráfico para presentar las relaciones entre los balances de materia y de energía de las mezclas de aire y vapor de agua, en el Tema 1.3. se presenta el cálculo y la graficación de la carta de humedad.

Luego de recopilar las ecuaciones fundamentales para el cálculo de las distintas propiedades, se incluyen el diagrama de flujo y el programa de computación, desarrollado en lenguaje Fortran. La característica principal del programa es su versatilidad para el uso, que se aprovecha para introducir en los cálculos el efecto de los cambios en las propiedades, debidos a la diferencia de presión por la altura sobre el nivel del mar.

Se presentan los resultados obtenidos para Ambato, ciudad que se encuentra a 2540 [m] sobre el nivel del mar. Es una herramienta muy útil para localidades montañosas, pues el programa de computación es fácilmente modificable, y se obtienen los datos de una carta de humedad a cualquier altura en la que estén ubicadas.

**Capítulo 2. Principios básicos de fenómenos de transporte.** En los tiempos actuales hay una necesidad que crece en forma rápida, de un mejor entendimiento de los mecanismos y fenómenos fundamentales relacionados con el procesamiento de alimentos. Se acepta que únicamente a través de un conocimiento profundo de estos mecanismos pueden diseñarse procesos con mayor seguridad y confianza, o mejorárselos. Para interpretar un mecanismo se requiere conocer los principios fundamentales de transporte; los termodinámicos; los cinéticos, y cualquier fenómeno que se halle involucrado. En el capítulo se analizan tres de los múltiples casos existentes en fenómenos de transporte, dos de transferencia de calor y uno de transferencia de masa.

Se busca que el estudiante conozca con profundidad las bases y ecuaciones que explican estos mecanismos. También, proporcionar métodos para determinar los parámetros involucrados. Y, de manera fundamental, concientizar en el dicente la imperiosa necesidad de un conocimiento cabal de estos fenómenos, para el desarrollo de la Ingeniería de Alimentos.

En el Tema 2.1. se considera la ley de Fourier, la cual define la cantidad de energía térmica que pasa en dirección normal a superficies isotérmicas de materiales inmóviles e isotrópicos, con densidad constante.

Se presentan las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor por conducción. Se describe

el montaje de un sistema para determinar la conductividad térmica de cuerpos sólidos.

Valores experimentales de la conductividad térmica, obtenidos en madera y copra de coco, sirven para comprobar la validez del método y la aplicación de la ley de Fourier. Se incluye un programa de computación desarrollado en lenguaje Basic, para utilizar los datos correspondientes al caso de formas esféricas, como un ejemplo inicial de las numerosas posibilidades de cálculo que ofrecen los computadores.

Para estudiar uno de los mecanismos básicos de transferencia de masa, en el Tema 2.2. se considera la primera ley de Fick.

Se recopilan varias ecuaciones desarrolladas para el cálculo del coeficiente de difusión o difusividad másica, y la ecuación presentada por Toledo para el caso particular de alimentos con valores altos de la actividad del agua.

Los datos experimentales de la difusividad obtenidos con agua, jugo de una fruta y vino, utilizando tubos de cristal y equipo de laboratorio mínimo, se comparan con los datos calculados según las distintas ecuaciones recopiladas; para lo cual se incluye un programa de computación desarrollado en lenguaje Basic.

Se destaca el hecho de que la comprensión de un fenómeno aparentemente tan simple, cuál la difusión de vapor de agua hacia el aire, permite llegar a aspectos de fondo, como son el efecto de las masas moleculares o los choques que ocurren entre las moléculas.

El Tema 2.3. se refiere al fenómeno conjunto de transferencia de calor por convección y por radiación.

La ley de enfriamiento de Newton sirve de base para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección. Se seleccionan y transcriben varias ecuaciones, entre la más utilizadas para calcular el flujo de calor por convección libre de cilindros en contacto con aire, conformadas por cantidades sin dimensiones o números adimensionales, y otras ecuaciones dimensionales que son específicas para cuerpos en contacto con aire.

Mediante pruebas realizadas con cilindros de hielo en posición vertical y horizontal, y utilizando una de las analogías entre transferencia de calor y transferencia de masa, se determinan los coeficientes de transferencia de calor en convección libre hacia aire, los cuales se comparan con los calculados mediante las ecuaciones seleccionadas.

Se destaca la relación entre los diversos mecanismos de transferencia de calor y masa, para su uso en los casos en que se necesita que se los considere de manera simultánea.

**Capítulo 3. Cinética de reacciones que ocurren en alimentos.** Una de las peculiaridades de los alimentos es su constante transformación: en todo lugar y momento ocurren reacciones químicas y bioquímicas que provocan cambios, benéficos o deletéreos. Este capítulo trata sobre la forma de cuantificar estos cambios.

Se estudian los modelos básicos de cinética química; luego se caracterizan mediante ecuaciones cinéticas algunas reacciones y cambios típicos registrados en alimentos. La parte primordial es inculcar en el estudiante el convencimiento de que, a pesar de lo complejos que son los alimentos, las aproximaciones cinéticas son herramientas valiosas para su comprensión. Y son, a la vez, útiles en situaciones prácticas. Así en la estimación de los tiempos de vida útil.

El Tema 3.1. tiene relación con la estabilidad de aceites comestibles. Se indica la derivación de un modelo general para establecer la cinética de reacciones de cualquier orden.

Se presentan los cambios en el índice de peróxidos, que es una medida de la oxidación de los ácidos grasos, determinados en aceites provenientes de linaza, altramuza o chocho y de la semilla de un tipo de calabaza. Se establecen el orden más adecuado y las ecuaciones cinéticas, con sus correspondientes velocidades de reacción.

Además, se mencionan posibles usos de estos valores para la selección de antioxidantes, y se presenta la composición porcentual de los principales ácidos grasos, determinada en diecisiete

aceites y grasas comestibles.

El empardeamiento es un proceso complejo que ocurre como resultado de reacciones químicas y bioquímicas. El Tema 3.2. está relacionado con el empardeamiento de bananos.

Se desarrolla una ecuación para el cálculo del orden de una reacción cinética, basada en el concepto de vida media. Medidas simples, como son las lecturas espectrofotométricas, hechas en muestras de cuatro variedades de banano, en su estado natural y sometidas a un tratamiento térmico para inactivación de enzimas, y mantenidas a 20° y 30° C, se utilizan para definir el orden de la reacción. En todos los casos los valores son próximos a la unidad, que corresponde a una cinética de primer orden, pero valores ligeramente superiores presentaron las diluciones con tratamiento térmico.

Se introduce el concepto de vida útil, para lo cual se calcula un valor  $Q_{10}$ , que cuantifica la sensibilidad de los cambios con relación a la temperatura. Las muestras que recibieron el blanqueado para inactivar las enzimas presentaron valores más altos; en especial, las variedades comerciales Seda y Cavendish.

Los aspectos nutricionales y el valor nutritivo de los alimentos deben estar siempre presentes cuando se los procesa. En el Tema 3.3. se muestra el caso de la degradación de un compuesto termolábil típico: el ácido ascórbico o vitamina C.

Se citan varios trabajos realizados sobre el tema. Por un método químico se determinó el contenido de ácido ascórbico en jugos de lima, limón, mandarina y toronja, frescos y mantenidos en condiciones aeróbicas, a cuatro temperaturas por diferentes tiempos.

Se comprobó que la degradación sigue una cinética de primer orden. Se presentan las ecuaciones correspondientes y casos de uso práctico. En el intervalo de 20° a 92° C, el efecto de la temperatura sobre la reacción es descrito por la ecuación de Arrhenius, con la cual se calcularon las energías de activación. El valor mayor se registró en el jugo de lima, 58,09 [kJ/mol], y el valor menor en el jugo de limón Sierra, 35,02 [kJ/mol].

Los resultados se utilizan en el cálculo de las pérdidas de vitamina C en jugos de frutas cítricas, cuando son sometidos a tratamientos térmicos.

Capítulo 4. Propiedades mecánicas y ópticas. Es el capítulo más extenso, por dos razones primordiales. Las propiedades físicas son indispensables para todo cálculo de ingeniería. Los laboratorios están generalmente equipados para realizar mediciones básicas, de modo que se adaptan fácilmente para determinar estas propiedades en alimentos.

Además, por la diversidad de productos existente, el número de trabajos prácticos que se pueden hacer en el laboratorio es considerablemente alto.

En los siete temas desarrollados se busca que el estudiante recuerde conocimientos iniciales de Física, en especial los relacionados con la Mecánica. Se indican numerosos métodos y técnicas para medir propiedades básicas. El mensaje final es que, cuando no se dispone de datos reales de las propiedades físicas, o próximos a la realidad, todo cálculo o simulación no pasará de ser un simple ejercicio numérico.

El Tema 4.1. se refiere a una aplicación del principio de Arquímedes. Se indican las bases sobre las fuerzas de empuje y flotación. Se reportan varios trabajos publicados que relacionan la gravedad específica de papas con el contenido de sólidos.

En muestras de cuatro variedades de papas, por registro del peso en el aire y sumergidas en agua, se determinaron los valores de la gravedad específica. Los valores promedios sirven para establecer ecuaciones lineales de correlación, que relacionan la materia seca de los tubérculos con la gravedad específica.

Además, se establece una ecuación similar a las anteriores; pero que incluye los datos de todas las variedades, y a ella se la compara con otras ecuaciones publicadas, encontrándose mucha similitud en los resultados.

Se destaca que el método sirve como un índice de control de materia prima, y para calcular el rendimiento del producto elaborado. Este es el caso de las papas fritas.

Los granos de cereales y leguminosas son la base de la alimentación de amplios sectores de población, ya sea como grano entero o como harina. En el Tema 4.2. se señalan diferentes métodos para determinar la densidad y sus variaciones; el método requiere la ayuda de un microscopio, para caracterizar las partículas y expresar las medidas considerando diversos diámetros medios, en las muestras molidas; en los dos casos hay la determinación del ángulo de reposo. Se presentan numerosos datos de densidad aparente y real, y de espacios vacíos de: chocho; seis variedades de maíz; trigo y arroz. En el caso de harinas se presentan los datos obtenidos en muestras provenientes de maíz, trigo, arroz, cebada, arveja, haba, y en almidones extraídos de papa y de yuca.

Las determinaciones sirven como medidas de control de granos y de harinas.

El Tema 4.3. se refiere a los cambios que ocurren en la densidad de alimentos líquidos por diferentes causas. Contiene numerosos datos experimentales y ecuaciones empíricas obtenidas con ellos.

Se citan varios trabajos publicados para el caso de leches, jugos de frutas y hortalizas, y aceites. En leche de vaca cruda, pasteurizada y suero, se estudia la relación de la densidad con la temperatura, y con el contenido de los componentes principales de la fase sólida: grasa, carbohidratos y proteína.

Para jugos de veinte y seis frutas, a saber: babaco, bananos en cuatro variedades, capulí, claudia, fresa, frutilla, lima, limón, mandarina en dos variedades, manzana en dos variedades, maracuyá, mora, naranja, naranjilla, papaya, pera, piña, taxo, tomate de árbol, tomate, toronja, tuna y uva. Se presentan las ecuaciones polinómicas, que calculan la densidad entre 10° y 80°C con exactitud. Se establece una ecuación general de correlación múltiple, que describe los cambios de la densidad con la temperatura entre 10° y 40°C, y con el contenido de sólidos solubles entre 5° y 25° Brix. En todos estos productos se calculan y presentan los datos del coeficiente volumétrico de expansión térmica.

Para jugos de ají, arveja, caña de azúcar, cebollas, coliflor, fréjol, haba, papa, pepinillo, pimiento, rábano, remolacha, yuca, zanahoria, zapallo, se presentan los datos de la densidad entre 10° y 70°C, a intervalos de 10°C.

En aceites extraídos de aguacate, algodón, chocho o altramuz, girasol, linaza, maíz, maní, maracuyá, oliva, ricino, soja y sésamo, y grasas extraídas de cacao, coco, almendra y pulpa de palma africana, se comprobó la relación lineal inversa que existe entre la densidad y la temperatura, que facilita el cálculo de los coeficientes volumétricos de expansión térmica. Se presentan los datos y los términos de las ecuaciones de regresión lineal, y de una ecuación de regresión múltiple, que muestra a la densidad como función del peso molecular promedio, del índice de yodo y de la temperatura.

El Tema 4.4. está relacionado con la tensión superficial de jugos de frutas.

Se indican aspectos básicos sobre esta propiedad. Se presentan los datos registrados en jugos de veinte y dos frutas entre 10° a 50° C, a intervalos de 10° C, y los términos de las ecuaciones de regresión lineal. Se incluyen los valores de la humedad y del contenido de sólidos solubles, como °Brix.

Se establece una ecuación de regresión múltiple, que relaciona la tensión superficial de los jugos con los °Brix y con la temperatura.

El Tema 4.5. trata sobre una propiedad característica de los cuerpos sólidos: el módulo de Young o de elasticidad.

Luego de un ligero repaso de los conceptos básicos, se describe el método para determinar este módulo en cilindros delgados.

Se presentan los resultados obtenidos en muestras de tallarines con diferente humedad. Sobre la

base de ellos se establece una ecuación de regresión lineal, que describe el efecto inverso de la humedad sobre el módulo de Young.

Los valores determinados son similares a datos publicados. Además, se demuestra la anisotropía de estos fideos.

Un intento para utilizar gráficos de tensión-deformación, que conduzcan a establecer criterios sobre la resistencia de las carnes, se detalla en el Tema 4.6.

Se señalan los fundamentos de resistencia de materiales y la interpretación de los gráficos tensión-deformación.

Se presentan los resultados obtenidos en pruebas de alargamiento, con la adición consecutiva y alternada de pesos, para provocar el alargamiento de cortes cilíndricos de músculo de res y de cerdo.

Mediante los gráficos reales de tensión-deformación, se determinan las propiedades mecánicas siguientes: límite de proporcionalidad, límite elástico, límite de fluencia, límite de rotura, límite de resiliencia, módulo de tenacidad, estricción y alargamiento a la rotura. Existen diferencias notorias, que demuestran que la carne de res es más resistente a la acción de fuerzas que la carne de cerdo.

El índice de refracción es una propiedad óptica de muy fácil medición. Es rápida y requiere poca cantidad de muestra. Los refractómetros actuales ofrecen una buena precisión en las lecturas y permiten explorar aspectos estructurales de compuestos alimenticios.

En el Tema 4.7. se presentan los valores del índice de refracción, medidos en catorce aceites y grasas, entre  $10^{\circ}$  a  $80^{\circ}$  C, para los aceites, y entre  $30^{\circ}$  y  $80^{\circ}$  C, para las grasas. Se presentan las ecuaciones de regresión, establecidas con los datos del índice de refracción y de la temperatura para cada producto. Con los datos registrados a  $40^{\circ}$  C, de todos los productos, se establecen ecuaciones de regresión lineal entre el índice de refracción y el índice de yodo, que es una medida del grado de insaturación de los ácidos grasos. Y entre el índice de refracción y el peso molecular promedio, que es un indicativo de la longitud de las cadenas de ácidos grasos. Adicionalmente, se presenta una ecuación de regresión múltiple, con las tres variables señaladas.

Se reporta la composición de ácidos grasos de los productos analizados.

Capítulo 5. Propiedades reológicas. Los técnicos que trabajan con alimentos encontraron en la Reología una herramienta muy poderosa para dilucidar los múltiples problemas con los que se enfrentan. Para cualquier transformación, los alimentos deben ser transportados, y como la gran mayoría presenta características de fluidos no-newtonianos, el tratamiento reológico es indispensable y explica la inclusión de este capítulo.

Se inicia con el repaso de principios básicos, como la ley de la viscosidad de Newton, los modelos que describen el flujo de los fluidos no-newtonianos. En los dos casos se enfatiza sobre el efecto de la temperatura y de la composición. En la parte de procedimientos se detallan los métodos para medir la viscosidad con viscosímetros de tubo capilar, y los parámetros reológicos con viscosímetros rotacionales o reómetros. En la parte formativa, se insiste en la necesidad de utilizar los valores y ecuaciones específicas, para realizar cálculos relacionados con el flujo de fluidos newtonianos o no-newtonianos, y en las posibilidades de comprender de mejor manera la estructura compleja que tienen los alimentos, a través de su comportamiento reológico.

Los fluidos que cumplen con la ley de la viscosidad de Newton se denominan newtonianos. En alimentos son relativamente pocos. Se destacan las leches, los jugos clarificados o filtrados, y los aceites. El Tema 5.1. se refiere a la viscosidad de estos productos. Se transcriben la derivación de la ecuación de Poiseuille y ecuaciones específicas que describen el efecto de la temperatura y de la composición, sobre la viscosidad de leche de vaca, jugos de frutas y aceites.

Se presentan datos de la viscosidad de leche de vaca, determinados con viscosímetros tipo Ostwald, a diferentes temperaturas y concentraciones de lactosa. Con la ecuación de Arrhenius se

determina un valor promedio de la energía de activación para el flujo de leches, de 18,1 [kJ/mol]. Datos de la viscosidad obtenidos con un viscosímetro rotacional, en jugos filtrados de lima, limón, mandarina, naranja y toronja, a tres temperaturas y cuatro concentraciones de sólidos solubles, sirven para establecer ecuaciones de regresión lineal múltiple, que describen el efecto de estas dos variables sobre la viscosidad. Los valores de la energía de activación están entre 19,5 hasta 22,2 [kJ/mol], para los jugos de estas frutas cítricas.

En nueve aceites obtenidos de aguacate, ajonjolí o sésamo, algodón, chocho o altramuza, ricino o higuera, linaza, maní o cacahuate, semillas de maracuyá y soja, se determinó la viscosidad con un viscosímetro rotacional. Se presentan los valores registrados entre 20° hasta 70 °C, y las ecuaciones que describen el efecto inverso de la temperatura sobre esta propiedad. Los valores de todos los aceites son similares, excepto el del aceite de ricino, que tiene un comportamiento anómalo. Los valores de la energía de activación para el flujo están entre 22,2 hasta 29,0 [kJ/mol]. En el aceite de ricino el valor es 45,0 [kJ/mol].

La mayoría de alimentos procesados presentan un comportamiento no-newtoniano en el momento de ser consumidos. La leche es un caso especial. Se inicia como un fluido newtoniano y los productos elaborados a partir de ella son no-newtonianos, y llegan a la estructura de sólidos como los quesos.

En el Tema 5.2. se indican las bases para el tratamiento reológico de los fluidos no-newtonianos, la influencia que tiene la variable tiempo en determinados casos, y algunas referencias específicas para el caso de la crema, yogurt, mantequilla y dulce de leche.

Con el uso de un viscosímetro rotacional, acoplado al adaptador para muestras pequeñas, que corresponde a la geometría de cilindros concéntricos con abertura estrecha, se comprueba el comportamiento pseudoplástico de la crema batida de leche, y se indica la variación del índice de consistencia y del índice de comportamiento al flujo, según las condiciones de proceso y tiempo de batido de la grasa de la leche.

En tres muestras de yogurt se determinaron los parámetros reológicos, considerando un comportamiento pseudoplástico. Se destaca la influencia de la materia prima y del proceso de elaboración sobre estos parámetros, los cuales pueden ser utilizados como índices de control, durante la fermentación y en el producto final.

En muestras de mantequilla se comprueba el comportamiento tipo Bingham. Se presentan valores del esfuerzo mínimo para deformación o umbral de fluencia. Los cuales sirven como medida de control, para ajustar las condiciones que favorezcan el untamiento del producto.

En muestras de dulce de leche se comprueba su tixotropía, pues existen un debilitamiento de su estructura y cambios en la consistencia, conforme transcurre el tiempo.

En el Tema 5.3. se presentan los datos del índice de consistencia y del índice de comportamiento al flujo, correspondientes al modelo de la ley de la potencia para fluidos pseudoplásticos, determinados en pulpas licuadas de aguacate, babaco, capulí, claudia, durazno, fresa, guanábana, guayaba, mango, manzana, maracuyá, mora, naranjilla, papaya, pera, taxo, tomate y tomate de árbol.

En todos los casos las medidas se hicieron en seis muestras y por duplicado, incrementando y disminuyendo la velocidad de rotación; con un viscosímetro rotacional, acoplado con un cilindro simple, que corresponde a la geometría cilindros concéntricos de abertura ancha. Se explora la existencia de tixotropía, y se establece el efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia con el modelo de Arrhenius.

Con el uso de un reómetro, en muestras de pulpas licuadas de cuatro variedades de banano Variedad o Cavendish, Seda, Orito y Maqueño se determinaron los parámetros reológicos, considerando dos modelos basados en la ley de la potencia. Se asume un comportamiento pseudoplástico, y de tipo mezclado o Bingham-pseudoplástico descrito por el modelo de Herschel-Bulkley (H-B).

Los datos se presentan en el Tema 5.4.; se discuten las diferencias en los valores registrados entre

variedades, se señalan las ventajas del uso de un determinado modelo y se establecen los valores de la energía de activación para el flujo. Se destaca el problema de la heterogeneidad de las muestras y la dificultad para obtener datos exactos.

**Capítulo 6. Propiedades térmicas.** Se justifica la inclusión de este capítulo por los múltiples usos que tienen estos datos. En Ingeniería de Alimentos sirven para calcular cargas de calor y flujos de calor, y para fijar criterios sobre puntos críticos durante un proceso. En Tecnología de Alimentos son útiles para el control y comparación de la eficiencia de equipos y de plantas industriales. Sirven también como índices de control de calidad de materia prima, durante su transformación y en los productos elaborados.

Se revisan los aspectos básicos y los fundamentos de las propiedades térmicas, con orientación hacia los alimentos. Se describen métodos simples para cuantificar las principales propiedades térmicas y se demuestra su validez. En la parte formativa, se busca infundir en los lectores la importancia de disponer de datos técnicos específicos, como base fundamental para estudios, pruebas o aplicaciones de la transferencia de calor.

En el Tema 6.1. se encuentran el desarrollo de una ecuación que relaciona al calor específico con el contenido de azúcares de jarabes, y varias ecuaciones publicadas para el cálculo de esta propiedad en alimentos con alto contenido de agua y de azúcares.

Se presentan los datos del calor específico perteneciente a cuatro contenidos de sólidos solubles, determinados en jarabes preparados con la adición de sacarosa a jugos de aguacate, babaco, banano Orito, banano Variedad, capulí, claudia, fresa, guayaba, lima, mandarina Costa, mandarina Sierra, mango, manzana, maracuyá, melón, mortiño, naranja, naranjilla, papaya, pepino, pera, piña, plátano Limeño, plátano Maqueño, sandía, taxo, tomate, tomate de árbol, tuna y uva. Con todos los datos se establece una ecuación de regresión lineal, que relaciona a los grados Brix con el calor específico, útil para las fábricas que elaboran este tipo de conserva.

En el Tema 6.2. se citan varias publicaciones relacionadas con la difusividad térmica de frutas y ecuaciones para su cálculo. Se describe un método simple, señalado por Charm como una alternativa práctica disponible, para determinar esta propiedad.

Se presentan datos de la humedad, del factor de calentamiento medido en cilindros con geometría finita e infinita, y de la difusividad térmica, determinados en pulpas de manzana, aguacate, babaco, cuatro variedades de banano, pepino, mora, capulí, uva, toronja, guayaba, lima, melón, naranjilla, papaya, pera, durazno, piña, claudia, tuna, fresa, frutilla, mandarina, tomate, tomate de árbol, sandía, abridor y naranja. Se establece que la relación lineal entre la difusividad térmica y la humedad se cumple en un producto particular; sin embargo, esta relación no es satisfactoria cuando se consideran diferentes productos, en el presente caso, frutas.

La conductividad térmica de carnes provenientes de vacunos, cerdos, corderos y pollos, se trata en el Tema 6.3.

Se reportan algunas ecuaciones específicas publicadas para calcular esta propiedad. A base del método que utiliza los datos de los cambios de temperatura, que ocurren con el tiempo bajo condiciones controladas, se determinaron los valores de las constantes de velocidad de calentamiento, y en forma indirecta los valores de la conductividad térmica.

Los resultados se comparan con valores publicados, y con valores calculados mediante las ecuaciones reportadas para productos cárnicos, sin encontrarse mayores diferencias. En todas las muestras el valor de la conductividad térmica es próximo a 0,5 [W/m.K].

Para el caso de alimentos cuya forma se aproxima a una esfera se utiliza la ley de Fourier, en lo que corresponde a transferencia de calor en estado de régimen transitorio, con el propósito de cuantificar su conductividad térmica. Los resultados obtenidos en papas y naranjas, con y sin corteza, se presentan en el Tema 6.4.

Se realiza una revisión de la derivación de la ecuación de Fourier, y se recopilan ecuaciones publicadas para el cálculo de la conductividad térmica de frutas y otros vegetales.

Se presentan ejemplos que incluyen el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en la superficie de las muestras y la cuantificación de la conductividad térmica mediante pruebas de ensayo y error.

Los valores obtenidos son similares a otros publicados por diversos autores. A pesar de la imprecisión del método, se observa que los productos con cáscara presentaron valores ligeramente más altos de esta propiedad térmica.

El calor latente de vaporización es una propiedad térmica extensamente utilizada en procesos en los que ocurre cambio de fase del agua contenida en los alimentos. En el Tema 6.5. se indica un método para su cuantificación por calorimetría, útil para productos con contenidos altos de agua. Se indican los principios termodinámicos y se hace relación a la regla de Trouton. Se presentan los resultados experimentales obtenidos con agua, leche y jugo de zanahoria amarilla, confirmando la validez del método, y que la energía de vaporización en alimentos es ligeramente superior a la del agua pura.

En el caso de alimentos con contenidos bajos de agua, se requiere una mayor cantidad de energía para evaporarla, con relación a la requerida en alimentos con alta humedad. En el Tema 6.6. se presentan datos obtenidos en productos de trigo, por medida de la presión de vapor y la aplicación del principio de Othmer.

Se revisan- los conceptos termodinámicos, que explican a la fugacidad y a la actividad de compuestos, y su relación con el principio de Othmer. Se presentan los datos de la presión de vapor del agua registrados a tres temperaturas, en muestras molidas de galletas, fideos y pan. Se calculan los valores respectivos de la actividad del agua. Mediante técnicas de regresión se determinan los calores latentes de vaporización, que son superiores hasta en un 23% con relación al del agua pura.

**Capítulo 7. Transferencia de calor.** Es uno de los capítulos de mayor importancia, pues, al transformar alimentos, en algún momento ocurren cambios de temperatura. El correcto control de estos cambios define en la mayoría de los casos el éxito o fracaso de las acciones tendientes a obtener productos procesados.

Se revisan con detalle los principios de transferencia de calor en régimen estacionario y no estacionario. En forma particular, las ecuaciones relacionadas con los equipos de transferencia de calor más comunes en las industrias de alimentos. Se detallan los métodos para la cuantificación de los coeficientes de transferencia de calor en equipos específicos, y se indica la forma de utilizar estos datos para control de su funcionamiento. La orientación fundamental es inculcar, a los nuevos profesionales, la necesidad de aplicar estos conocimientos para el dimensionamiento, diseño y construcción de equipos simples de transferencia de calor; adicionalmente, el definir criterios técnicos, que permitan desarrollar sistemas adecuados de almacenamiento, indispensables para disminuir las elevadas pérdidas de alimentos que ocurren luego de la cosecha, matanza de animales o pesca de productos marinos.

El Tema 7.1. trata sobre un tipo de intercambiador de calor, conocido como de carcaza con haz de tubos. Es un equipo tubular en el que se consigue aumentar la superficie de intercambio de calor, con la agrupación de varios tubos en volúmenes pequeños.

Se presenta una visión de las instalaciones con intercambiadores de carcaza, que constituyen un sistema para el calentamiento o enfriamiento de alimentos, en la forma como se observa en las industrias. Se incluyen las ecuaciones básicas para el cálculo del flujo de calor; las ecuaciones para calcular los coeficientes de transferencia de calor en el interior de tubos, y en la superficie exterior de los tubos en contacto con vapor. Se analizan las correcciones desarrolladas para el caso de estos intercambiadores, y el efecto de la resistencia al paso de calor provocada por el ensuciamiento.

Al describir las características del equipo de laboratorio que sirve para realizar las pruebas experimentales, se detallan los accesorios y las características principales de cada uno de ellos.

Se presenta un ejemplo de cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en base a datos experimentales, para determinar el coeficiente global de dicha transferencia, a cuatro presiones de ingreso de vapor como medio de calentamiento, y con cuatro caudales del agua que circula por el interior de los tubos.

Un programa de computación desarrollado para calcular los coeficientes de transferencia de calor, con diferentes ecuaciones, conduce a seleccionar la ecuación de mejor ajuste con los datos experimentales, luego de lo cual se determina la resistencia por ensuciamiento. Se indica la forma para evaluar los cambios de esta resistencia, con el propósito de utilizar la información como criterio de la eficiencia del equipo, y del establecimiento del tiempo de funcionamiento límite, para efectuar labores de limpieza o de mantenimiento.

El Tema 7.2. se relaciona con los intercambiadores de placas, muy comunes en las plantas procesadoras de alimentos, en especial en las industrias lácteas.

Se recopilan las características técnicas principales y las condiciones generales para el uso adecuado de estos equipos. Se describen las secciones que conforman un intercambiador de placas: regeneración, calentamiento, enfriamiento, bomba de alimentación, homogenización, tanque de regulación, retención, enfriamiento final y sistema de control.

Se reportan las relaciones matemáticas publicadas para el análisis de la transferencia de calor en estos intercambiadores, y para el cálculo de la resistencia debida a incrustaciones.

Un intercambiador de placas de laboratorio sirve para ilustrar su manejo y funcionamiento. Se presentan los datos obtenidos en el sistema agua-agua, con el ordenamiento propio de las placas para obtener flujo paralelo, y en contracorriente entre los fluidos frío y caliente. Los datos obtenidos con tres caudales diferentes se usan para calcular los números sin dimensiones de: Reynolds, Prandú, Peclet y Nusselt; este último sirve para calcular los coeficientes reales de transferencia de calor en base a los datos experimentales, y teóricos con el uso de ecuaciones. La determinación de los flujos de calor, y posteriormente el cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor real y teórico, sirven para cuantificar la influencia negativa sobre la transferencia de calor, debida a la sedimentación en el caso de pasteurizar leche.

El Tema 7.3. tiene relación con el funcionamiento de intercambiadores del tipo vasija redonda, conocidos vulgarmente como ollas de cocción.

Se analizan las principales resistencias a la transferencia de calor existentes en la superficie de calentamiento y en contacto con el alimento. Se recopilan las principales ecuaciones, consideradas válidas para calcular el coeficiente de transferencia de calor en el caso de vapor condensado y de líquidos en ebullición. Se incluye información sobre la conductividad térmica de láminas de acero inoxidable.

Pruebas realizadas en dos vasijas, una redonda con varios años de uso y una cilíndrica nueva, utilizando vapor a diferentes presiones de condensación como medio de calentamiento y agua en ebullición en el recipiente, sirven para calcular, por el método de ensayo y error, el coeficiente global de transferencia de calor. La comparación de los valores calculados con los valores obtenidos mediante datos experimentales de la cantidad de vapor condensado y de la cantidad de agua evaporada, sirven para cuantificar la resistencia por ensuciamiento que ocurre en la superficie de condensación del vapor. Se presenta un programa de computación desarrollado en lenguaje BASIC, que facilita el uso del método de ensayo y error, y el cálculo de la resistencia a la transferencia de calor debida a las incrustaciones.

Un análisis de los valores del coeficiente de transferencia de calor en la superficie, en contacto con el vapor que se condensa, y los calculados mediante las ecuaciones propuestas por Brown, Charm, Perry y Green, conduce a sugerir el uso de la última de las nombradas en especial para controlar el funcionamiento de estos equipos y establecer tiempos de limpieza y mantenimiento, cuando la resistencia por incrustaciones supera valores determinados previamente. Los datos del coeficiente de transferencia de calor, en el lado del agua en ebullición, pudieron ser comparados

con los calculados mediante la ecuación de Rohsenow, y reportados por Kreith.

En el tema merece destacarse el desarrollo de la metodología para utilizar los coeficientes de transferencia de calor como herramientas de control y de diseño, en el funcionamiento o construcción de vasijas con camisa de vapor, llamadas comúnmente ollas de cocción.

En el Tema 7.4. se destaca la importancia que tiene en el procesamiento de alimentos la transferencia de calor en estado inestable o variable.

Se presentan las ecuaciones fundamentales, reportadas para los casos de esferas y formas semejantes, considerando los casos de resistencia interna despreciable, resistencia superficial despreciable y cuando las dos resistencias indicadas deben ser consideradas para los cálculos.

Pruebas de calentamiento y enfriamiento de papas en contacto con aire, sin protección y en cajas de cartón, sirven para comprobar el uso de ecuaciones y cartas reportadas, que posibilitan el cálculo de los cambios de temperatura conforme transcurre el tiempo, en condiciones de intercambio de calor fijas.

Se analizan las diferencias que ocurren al variar los datos del coeficiente de transferencia de calor convectivo, en la superficie en contacto con aire. Se demuestra que, mediante aproximaciones sucesivas, los datos experimentales de las historias de temperaturas sirven para determinar el valor de este coeficiente.

Durante el procesamiento de alimentos enlatados, por tratamiento térmico en autoclaves, se presenta el caso de transferencia de calor en estado inestable, a través de cilindros de geometría finita y con temperatura inicial no uniforme. Este caso, un poco más complejo de transferencia de calor, puede ser tratado mediante el método numérico de diferencias finitas, motivo del Tema 7.5.

Se presentan las bases del método y sus ecuaciones. Un caso de aplicación presentado por Charm sirve para desarrollar un programa de computación elaborado en lenguaje BASIC, que calcula los cambios de temperatura conforme transcurre el tiempo de proceso térmico, en puntos localizados a varias distancias radiales en el interior de la lata que contiene al producto. El programa incluye el cálculo de las propiedades térmicas como función de la temperatura, con el modelo de Choi y Okos, con el propósito de utilizar estos datos en forma más exacta a los distintos tiempos.

El programa también calcula la temperatura másica promedio del producto en la lata, para cada intervalo de tiempo. Lo anterior es de especial importancia en el caso de enfriamiento de latas, para determinar el tiempo en el cual el producto alcanza una temperatura adecuada con la mayor estabilidad.

Se incluyen los resultados obtenidos, considerando una lata cilíndrica pequeña, y para un alimento cuya composición proximal es conocida.

**Capítulo 8. Procesos térmicos.** Es un capítulo de especial importancia, pues contiene los conocimientos que dieron inicio; permitieron el desarrollo y proporcionan nuevos horizontes a la Ingeniería de Alimentos, como profesión independiente.

Desde un enfoque didáctico, en la parte cognoscitiva, se revisan, desde los primeros esfuerzos para calcular procesos térmicos, al comienzo de presente siglo, hasta mencionar los programas de computación actuales, que calculan los procesos térmicos con inusitada velocidad, exactitud y versatilidad, pues están basados no únicamente en la destrucción de microorganismos, sino también en la pérdida de nutrientes y/o la inactivación de enzimas. En la parte de adquirir destrezas y procedimientos, los esfuerzos están orientados hacia la forma de realizar los cálculos, y en menor grado hacia la parte experimental de obtención de datos de cinética. En la parte formativa, se pretende que el futuro profesional, Ingeniero de Alimentos, tenga plena conciencia de la enorme responsabilidad que implica el cálculo de procesos térmicos, y la necesidad de hacerlos con la mayor prolijidad, para nunca enfrentar problemas de intoxicaciones o, peor, de envenenamientos, por el consumo de alimentos mal procesados.

Se desarrollan dos temas: el primero considera la pasteurización de leche, a nivel casero, y de un

jugo; el segundo, la esterilización comercial de alimentos enlatados.

En el Tema 8.1. se presenta una forma fácil de aplicar el método llamado general, para calcular tiempos de pasteurización en leche cruda de vaca y en jugo de naranja.

Se indican las bases matemáticas que sustentan al método. Se recopilan datos de los valores D y z publicados por diversos autores, con énfasis en los utilizados para la pasteurización o esterilización comercial de leches. El análisis de un gráfico de tiempo de muerte térmica sirve para despejar la ecuación básica referente al cálculo del tiempo de muerte térmica. Se detalla un procedimiento indicado por Toledo para calcular el tiempo de pasteurización de alimentos líquidos en equipos tubulares de transferencia de calor, muy utilizados en el caso de tratamiento aséptico. Se presentan datos de calentamiento y enfriamiento de muestras de leche de vaca y de jugo de naranja. Considerando datos de destrucción térmica de *Salmonella* spp. y de *Clostridium botulinum* Tipo E, se presenta una forma directa de aplicar el Método General, utilizando los datos experimentales de historias de temperaturas. Igual procedimiento se utiliza para el jugo de naranja, pero considerando datos de *Candida tropicalis* y de *Rodotorula rubra*.

En los dos casos, los tiempos de pasteurización calculados responden a las características propias de cada producto. En las leches, al realizarse las pruebas en forma semejante al tratamiento térmico que reciben en los hogares, los resultados presentados sirven para definir las condiciones adecuadas de pasteurización, y para evitar la práctica generalizada de hervir la leche por cinco minutos o más, con la consecuente pérdida de nutrientes.

En el Tema 8.2. se trata con detalle el Método Matemático desarrollado por Ball, para calcular los tiempos de proceso térmico requeridos para la esterilización comercial de un enlatado de langostinos.

Se presentan las ecuaciones básicas que sirvieron para el desarrollo de este método, con la explicación del significado de los términos utilizados y de los factores relacionados con la descripción de la penetración de calor. Se incluyen ejemplos de la aplicación del método en el caso de considerar las fases de precalentamiento, esterilización y enfriamiento, y también cuando se presenta un cambio en la velocidad de calentamiento. Con el propósito de facilitar los cálculos se reportan los nomogramas para determinar el tiempo de proceso térmico en alimentos cuya historia de temperaturas presentan una y dos secciones. Se indican los pasos para utilizar estos gráficos. Datos experimentales obtenidos durante la esterilización en autoclave, de un enlatado de langostinos en salmuera, sirven para demostrar la aplicación del Método de Ball y el uso del nomograma correspondiente, considerando datos de resistencia térmica de *Clostridium botulinum* y de *Bacillus stearothermophilus*. Los resultados sirven para comentar, sobre la importancia de saber balancear los criterios fundamentales de destrucción de microorganismos, con la destrucción de nutrientes.

**Capítulo 9. Deshidratación.** La deshidratación posiblemente es la forma más extendida de conservar alimentos a nivel general. Es un proceso aparentemente simple, pero que involucra varios mecanismos de transferencia de calor y materia, que operan en forma simultánea. Eso originó el desarrollo de diversos equipos. Varios de ellos se mencionan o describen.

El capítulo contiene los conceptos fundamentales de la actividad del agua, y las ecuaciones que describen la cinética del secado en diferentes condiciones de trabajo. En la parte metodológica se describen los métodos experimentales para estudiar este proceso, en situaciones que se presentan a nivel general e industrial. En la parte formativa se busca orientar el uso de los resultados obtenidos, para el diseño de equipos de secado. Esta es una de las actividades de mayor importancia para el Ingeniero de Alimentos, con una dedicación hacia los métodos más simples, que pueden ser practicados en las zonas rurales de producción.

La actividad del agua es una medida del agua presente en el alimento, y de la forma o estado en que se encuentra. Por ello su conocimiento es muy útil para entender y controlar el proceso de

deshidratación. En el Tema 9.1. se considera la actividad del agua de productos con muy alta humedad y una forma simple de cuantificarla.

Se reportan las ecuaciones básicas, que relacionan a la actividad del agua con los componentes de soluciones binarias de no electrolitos, y ecuaciones específicas válidas para alimentos líquidos.

Determinaciones del punto de congelación realizadas en muestras de suero dulce, provenientes de la fabricación de queso, con la adición de cantidades conocidas de glucosa, fructosa, lactosa y sacarosa, se utilizan para demostrar el uso de ecuaciones y para comprobar la validez de la ecuación de Norrish. Se establecen correlaciones entre el contenido de sólidos solubles expresado como °Brix y la actividad del agua, que permiten diferenciar el efecto de los monosacáridos, que son más efectivos para disminuir la actividad del agua con relación a los disacáridos.

Las ecuaciones de correlación presentadas abren el camino para calcular la actividad del agua de alimentos con muy alta humedad, a partir de una medida refractométrica muy simple, como las de los °Brix.

En el Tema 9.2. se analiza el caso de la deshidratación osmótica de bananos y de uvas. Este último proceso es el utilizado en la fabricación de pasas.

Se reportan ecuaciones para el cálculo de la actividad del agua en sistemas de multicomponentes con alta humedad, y ecuaciones generales que describen los flujos de agua y de soluto, durante el proceso de ósmosis.

Resultados de pruebas de deshidratación osmótica, realizadas en bananos Seda a 35 ° y 45°C, sirven para comparar el proceso, considerando la pérdida de peso y la pérdida de agua en el producto. Se calculan los valores de la actividad del agua conforme avanza el tiempo de deshidratación, para establecer las constantes de permeabilidad, y ellas sirven en la evaluación de la eficiencia del proceso.

Datos obtenidos en una variedad de uva, durante la preconcentración osmótica utilizada para la elaboración de pasas, considerando tres pretratamientos para acelerar el proceso, se utilizan para estudiar éste, en base a los datos de punto de intersección de las curvas de contenido de agua e incremento de sólidos; de pérdida de agua; pérdida de peso; de ganancia de sólidos, y de constantes de permeabilidad a tres temperaturas.

Se presentan los valores de los coeficientes de transferencia de calor y materia, establecidos en pruebas de secado con aire, realizadas luego de la preconcentración osmótica; además, cuatro isoterms de desorción determinadas a 20°C en pasas con diferente contenido de azúcares.

Se establecen las condiciones adecuadas de operación para la tecnología de elaboración de pasas con uvas Moscatel.

El secado solar es el método más ampliamente utilizado en el sector rural para la conservación de alimentos. En el Tema 9.3. se destacan las ventajas comparativas existentes en la zona ecuatorial para utilizar la radiación solar, y la forma de calcular la energía solar que incide en ello. Se mencionan diferentes formas y equipos para el secado solar, y se recopilan varias ecuaciones que describen un proceso; en especial, para granos de cereales.

Pruebas realizadas en equipos simples, contruidos localmente, con muestras de una variedad de maíz, sirven para comparar el secado solar directo con el indirecto, mediante el uso de secadores: El cálculo de la eficiencia estableció una ligera ventaja para el secado solar indirecto (8,1 %), con relación al secado solar directo (7,1 %).

También se incluyen los datos obtenidos con granos de quinua, amarga y lavada, calculándose los valores del coeficiente de difusión efectivo y de las constantes de secado, según los cuales los granos lavados con el propósito de disminuir el contenido de saponinas, responsables del sabor amargo, presentan mayor dificultad para ser secados que los granos sin lavar.

Se puntualiza la conveniencia de profundizar en el estudio del secado solar de alimentos, con el propósito de mejorar las condiciones de trabajo en las zonas rurales de producción.

En el Tema 9.4. se presenta un caso de aplicación de secado a bajas temperaturas, realizado en papas. Se indican las bases que explican el proceso de liofilización atmosférica y las ecuaciones

desarrolladas para su seguimiento y evaluación.

Datos obtenidos en rodajas de 3 [mm] de espesor, mantenidas a  $-2^{\circ}\text{C}$ , con el uso de hidróxido de sodio como agente higroscópico, y con agitación del aire interior de la cámara de secado, sirven para determinar el coeficiente total de transferencia de calor y el número de Heldman y Hohner. Se establece que el proceso de secado, está controlado principalmente por la transferencia de masa de agua desde la superficie del producto hacia el aire.

Para destacar la bondad de este método de secado, se indica la tecnología de preparación de las papas antes de aquel, y el detalle de pruebas realizadas a temperaturas de refrigeración y de congelación, con el uso de tres compuestos químicos de captación del agua proveniente del producto. Los valores de pruebas biológicas y de rehidratación establecen que se mantiene la calidad en la proteína de la papa, y el daño físico mínimo que presenta, en especial el producto obtenido por liofilización atmosférica. Las papas deshidratadas a temperaturas de refrigeración presentaron cambios físicos marcados y crecimiento de microorganismos; sin embargo se señala que, el método con controles adecuados, posiblemente es una alternativa válida para deshidratar alimentos y conservarlos por tiempos prolongados, en regiones montañosas con presencia de nieves perpetuas o con temperaturas próximas a la de congelación del agua.

El Tema 9.5. se refiere a la aplicación de la ley de Fick, para interpretar y controlar los procesos de secado que son comunes en las industrias que procesan vegetales.

En la parte introductoria se incluyen las principales ecuaciones que relacionan la transferencia de calor con la transferencia de agua, en el período de velocidad de secado constante. Se incluye una detallada derivación de la segunda ley de Fick, que conduce a la obtención de ecuaciones que describen los cambios de humedad con el tiempo, durante el proceso de secado, y que consideran que la difusividad es el mecanismo de transferencia de masa predominante durante el período de secado con velocidad decreciente. Se incluyen ecuaciones para establecer el efecto de la temperatura sobre el coeficiente de difusión, y ecuaciones de regresión múltiple que consideran, además, el efecto de la humedad relativa y de la velocidad del aire. También se reportan ecuaciones indicadas por diferentes autores, para analizar el proceso de secado cuando existe más de un período de velocidad de secado decreciente.

Los datos registrados con la utilización de un equipo tipo túnel, para el secado de rodajas de remolacha con dos espesores, sirven para definir los períodos y los términos involucrados en el período de secado a velocidad constante y a velocidad decreciente. Gráficos elaborados según las ecuaciones presentadas en la Introducción, confirman que el mecanismo que controla el proceso de secado es el movimiento del agua en el interior del producto, y conducen a la cuantificación de los coeficientes de difusión. Estos son comparados con los calculados mediante las ecuaciones específicas de regresión múltiple. Para cada espesor de las rodajas, con el modelo de Arrhenius, se determinan los valores de la energía de activación. Se utilizan modelos para calcular tiempos de secado, siempre que se disponga de datos confiables, y en lo posible específicos para el producto y las condiciones de trabajo.

Los datos obtenidos de muestras de yuca, secadas en un gabinete, se utilizan para diseñar y construir un secador casero. Se presenta información sobre la yuca: sus características físicas, su composición química, su toxicidad, y estudios de secado en diferentes condiciones y equipos. Se confirma que prácticamente no existe el período de secado a velocidad constante, y que todo el proceso puede ser analizado como si fuese a velocidad decreciente. Se calculan los coeficientes de difusión, considerando una fase líquida y el coeficiente de difusión efectivo o global. Pruebas realizadas a tres temperaturas y a tres velocidades del aire, en el interior del gabinete, llevaron a establecer su efecto sobre el tiempo de secado, hasta obtener contenidos de agua que aseguran la estabilidad del producto. Y además, a definir las condiciones tecnológicas adecuadas para el trabajo. Se presenta la figura de un secador tipo casero, construido en mampostería, que permite trabajar en las condiciones especificadas previamente. Así mismo, los resultados de análisis químicos y microbiológicos de muestras de yuca secadas en este secador y en una estufa de laboratorio, se utilizan para establecer comparaciones.

También se indican varias recomendaciones para deshidratar yuca en secadores adaptados en

fogones, que pueden ser construidos en regiones sin infraestructura civil, y que llevan a mantener en buena parte la calidad del producto.

Por último, además del Contenido presentado al inicio, se incluye al final el Índice de palabras importantes. En él se destaca el nombre de los alimentos para facilitar la búsqueda de datos técnicos; en especial, de las propiedades físicas.

El libro contiene 524 páginas, y se publica gracias al apoyo del Proyecto Multinacional de Biotecnología y Tecnología de Alimentos (PMBTA), del Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico (PRDCyT), del Departamento de Asuntos Científicos y Tecnológicos de la Secretaría Ejecutiva para la Educación, la Ciencia y la Cultura, pertenecientes a la Organización de los Estados Americanos (OEA).