

ANEXO DESARROLLO TÉCNICO DE LA INVESTIGACIÓN: DESHIDRATACIÓN DE PULPA DE FRESA EN LECHO POR FUENTE-FLUIDIZADO CON TUBO CENTRAL SUMERGIDO EN SÓLIDOS INERTES

RESUMEN

Se ha reportado que durante el secado de pulpa de frutas en lecho por fuente con sólidos inertes, las partículas inertes al igual que las paredes del secador quedan adheridas de restos de pulpa; esto conduce a un bajo rendimiento y problemas de operación limitando su aplicabilidad. Por tal motivo, el presente trabajo se enfocó a la evaluación del efecto de las condiciones de operación y de la temperatura de transición vítrea (T_g) sobre el problema de pegajosidad y la eficiencia de recuperación del polvo durante el secado de pulpa de fresa libre de aditivos en un secador de lecho por fuente fluidizado (spouted bed) sobre sólidos inertes.

La temperatura de transición vítrea (T_g) obtenida para el polvo de fresa fue de 43°C, por lo que la temperatura de pegajosidad se localizó en el intervalo de 53-63°C (10-20°C por arriba de la T_g). Con base en esto, se llevó a cabo el secado de la pulpa de fresa a 60 y 70°C con una alimentación por pulsos de 30 g de pulpa con un tiempo de secado de 15 y 25 min y una velocidad de alimentación de 5 y 10 mL/min. Los resultados mostraron que no existe diferencia significativa en la adhesión del polvo de fresa a los sólidos inertes del lecho y a las paredes del secador para cualquiera de las dos temperaturas de secado utilizadas. Esto puede deberse a que la temperatura de pegajosidad se encuentra aun por debajo de la temperatura mas baja utilizada (60°C). Las eficiencias de recuperación del producto se incrementaron ligeramente (13-19%) conforme la temperatura de secado disminuyó. En lo que respecta a la velocidad de alimentación, ninguna de las utilizadas en este trabajo tuvo influencia en la eficiencia de recuperación del producto. El porcentaje de humedad final del producto para todos los experimentos de secado fue de 2.42-2.85%. El porcentaje de retención de ácido ascórbico y de fenoles totales presentado por el polvo de fresa obtenido no se vio afectado por las temperaturas pero sí por el tiempo de secado disminuyendo con el aumento de éste. El color de la pulpa rehidratada presentó un poco de oscurecimiento respecto a la pulpa comercial original de acuerdo al valor de ΔE y ΔL .

Se realizaron pruebas adicionales de secado a 50°C con un pulso menor (15 g) para utilizar temperaturas de secado por debajo del punto de pegajosidad. Los resultados mostraron una

disminución considerable de la adhesión del producto a las partículas inertes del lecho lo que favoreció el aumento en el porcentaje de recuperación del polvo (19 al 33%). Al igual que en las condiciones de operación anteriores, el porcentaje de retención de ácido ascórbico y de fenoles totales del polvo de fresa obtenido no se vió afectado. El cambio de color del polvo presentó una menor disminución en luminosidad (ΔL) respecto al polvo de fresa obtenido a 60 y 70°C.

Se analizó el efecto de la adición de maltodextrina a la pulpa de fresa sobre el incremento de la T_g . Obteniendo que es necesaria la adición de maltodextrina en una relación maltodextrina:sólidos de pulpa de 50:50 para incrementar la T_g por arriba de 60°C. La pulpa de fresa adicionada con la relación 20 maltodextrina:80 sólidos de pulpa no modificó la T_g , sin embargo, durante el secado a 50°C mostró una disminución en la cantidad de producto seco retenido en los sólidos inertes del lecho respecto al secado a la misma temperatura con la pulpa de fresa sin aditivos. Con esta baja concentración de maltodextrina adicionada, se obtuvo un porcentaje de recuperación de 39% comparada con el 33% de la pulpa de fresa sin maltodextrina.

I. INTRODUCCIÓN

Entre los procesos para la conservación de pulpa de frutas se encuentra la deshidratación, que produce cambios físicos, químicos y sensoriales en los alimentos. Entre los cambios físicos que genera la deshidratación están el encogimiento, endurecimiento y la termoplasticidad. Los cambios químicos afectan a la calidad final, tanto de los productos deshidratados como de sus equivalentes reconstituidos, ya que puede provocar cambios en color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento (Geankoplis, 1998). Con frecuencia estos cambios tienen lugar en casi todos los alimentos sometidos a la deshidratación y el grado en que ocurren depende de la composición del alimento y la severidad del método de secado. Recientemente se ha reportado el secado de pulpas de frutas en equipos de secado de lecho por fuente (spouted bed) con sólidos inertes (Hufenüssler, 1992; Kachan, 1992; Lima, 1992; Alsina, 1996 y Medeiros *et al.*, 2002). El secado de pastas y suspensiones de frutas en “spouted bed” es una alternativa de bajo costo comparado con el secado por aspersión obteniéndose una calidad del producto final muy similar (Strumillo y Kundra, 1987). Sin embargo, durante el proceso se ha observado que las partículas inertes al igual que las paredes del secador quedan adheridas de restos de pasta; esto conduce a un bajo rendimiento y problemas de operación. Los productos deshidratados no solo presentan problemas durante el proceso de secado sino que también son susceptibles a alteraciones durante su almacenamiento.

Por otro lado, México se reconoce por su extensa producción de frutas, entre ellas la de fresa, sin embargo, la conservación de éstas en estado fresco es poco eficiente, ya que resulta costoso su almacenamiento y comercialización. Consecuentemente esto implica grandes pérdidas, por lo que hoy en día se aplica el secado como método tendiente a la conservación de las frutas con el objetivo primordial de disminuir este problema; así como evitar la escasez pasada la época estacional del fruto y en algunos casos el aprovechamiento integral de la cosecha (Bernal, 1995).

El presente proyecto se enfoca al estudio de la potencialidad de aplicación del secador de lecho por fuente (spouted bed) para el secado de pulpa de frutas, analizando la influencia de las condiciones de operación del secador y la temperatura de transición vítrea (T_g) del producto, sobre el problema de pegajosidad que se presenta en el secado de pulpa de frutas en lecho por fuente y observar su efecto sobre la eficiencia de recuperación del producto, utilizando pulpa de fresa como material de estudio.

II. ANTECEDENTES

II.1. LECHO POR FUENTE O “SPOUTED BED” (SB)

La técnica de lecho por fuente o “spouted bed” fue reportada por primera vez en 1955 por Mathur y Gishler en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Al principio se desarrolló como un método para secar granos a temperaturas superiores a las que generalmente se utilizan, con la ventaja de no provocarles daño térmico.

Sobre la base de estudios posteriores, Mathur y Epstein (1974) establecieron la hidrodinámica del sistema, así como los de la cinética del secado, flujo del fluido utilizado para formar la fuente y el fenómeno de formación de la fuente o “spouting” que se define como el fenómeno que ocurre cuando un chorro de fluido penetra en forma ascendente a un lecho de partículas produciendo con esto una fuente de las mismas en la parte superior del lecho.

El “spouted bed” convencional ha sido modificado mediante la inserción en la región del “spout” de un tubo central logrando así, disminuir la amplia distribución de tiempos de ciclo de las partículas a lo largo del canal central debido al flujo cruzado del fluido y a los sólidos entre el “spout” y el espacio anular. Además, se ha incluido la posibilidad de alimentación de aire de secado por el espacio anular para contrarrestar la disminución del aire en esta zona ocasionada por la inserción del tubo central. Esta modificación a la cual se le ha denominado secador de lecho por fuente fluidizado con tubo central, permite la entrada de aire adicional por la zona anular y la reducción en la caída de presión necesaria para iniciar la formación de la fuente (Chaterjee, 1970).

Muchos productos secos se han obtenido a partir de soluciones y suspensiones con cualquiera de las diferentes variantes del lecho por fuente usando sólidos inertes como lecho en el secador. La mayoría de estos productos son para consumo humano ya sea en forma de productos farmacéuticos como tabletas cubiertas o “laqueladas” por este método (Oliveira y Silva, 1997), extractos secos de plantas utilizados en la fabricación de productos farmacéuticos (Oliveira, 1999), productos alimenticios en polvo como la leche, tanto de vaca como de soya, pasta de tomate, harina de arroz, (Ochoa-Martínez *et al.*, 1993; Boonyai, 1999, Dumronglaohapun, 1994) y colorantes de productos alimenticios (Passos *et al.*, 1992) entre otros.

II.2. SECADO DE PULPA DE FRUTAS EN “SPOUTED BED”

La mayoría de los procesos en la industria química, farmacéutica y alimentaria requieren del secado de pulpas y pastas. Una pulpa es un material definido como un sistema sólido-líquido compuesto por partículas microscópicas o coloidales dispersas en una fase acuosa (Passos *et al.*, 1997). Sus propiedades dependen del tamaño, forma de las partículas, concentración del sólido además de las interacciones partícula-partícula y partícula-líquido. Strumillo y Kundra (1987) clasificaron a las pastas dependiendo de la concentración de sólidos en 4 grupos diferentes: suspensión diluida, suspensión densa, pasta suave y pasta dura. Esta es una guía para seleccionar el método de secado adecuado dependiendo de la aplicación del producto.

El secado de pastas y suspensiones en lecho por fuente o “spouted bed” (SB) sobre un lecho de inertes se ha reportado como una alternativa de bajo costo comparado con el secado por aspersión obteniendo la misma calidad del producto final (Strumillo y Kundra, 1987). El secado de diferentes líquidos, pastas y suspensiones en “spouted bed” ha sido tema de estudio en años anteriores. Por citar algunos ejemplos: Lima *et al.*, (1992) analizaron el secado de pulpa de umbu en “spouted bed” y Reyes deshidrató leche, jugo de naranja y zanahoria en 1996. Estas investigaciones reportan que la estabilidad de la fuente disminuye conforme aumentan la cantidad y viscosidad del líquido en el lecho. Osorio (1990) y Spitzner-Neto y Freire (1998) estudiaron la variación del comportamiento hidrodinámico del “spouted bed” durante una alimentación continua de agua y soluciones de maltodextrina sobre el lecho. Estos autores verificaron que la presencia de líquido, pasta o suspensión en el lecho de sólidos compromete la estabilidad y puede causar el colapso de la fuente. Schneider y Bridgwater (1989) reportaron que el colapso de la fuente sucede cuando el aire de salida contiene una humedad relativa de aproximadamente 70-80%.

II.3. ESTADO DEL ARTE

En el Cuadro II.1 se muestra una compilación de los resultados obtenidos por diversos autores, con respecto al secado de pulpas de frutas en “spouted bed” con sólidos inertes. Como puede observarse la calidad de pulpa de fruta en polvo obtenido a través de un “spouted bed” reúne todos los requerimientos para su uso comercial; sin embargo, si bien diferentes estudios del secado de pulpa de frutas tropicales en “spouted bed” han mostrado ventajas en la calidad del producto final, la inestabilidad de la fuente, la aglomeración de las partículas y los depósitos del

producto dentro de la cámara son problemas reportados durante la operación de secado, debido principalmente al alto grado de pegajosidad del producto.

Medeiros *et al*, (2002) analizaron la influencia de la composición química de la pulpa de mango durante su secado en “spouted bed”. Los resultados mostraron que la presencia de altos contenidos de azúcares en la pulpa causa problemas de inestabilidad en la fuente, mientras que la presencia de altas concentraciones de pectina y almidón promueven condiciones de mayor estabilidad en el lecho. Todos los componentes químicos de la pulpa de mango interfieren en la eficiencia de la producción del polvo. Los altos contenidos de lípidos, almidón y pectina presentan efectos positivos en la eficiencia de recuperación del producto mientras que los altos contenidos de azúcares reductores promueven efectos negativos.

Cuadro II.1 Compilación de resultados del secado de pastas en secadores “spouted bed”

<i>SECADOR</i>	<i>MATERIAL INERTE</i>	<i>PASTA</i>	<i>PRODUCTO</i>	<i>REFERENCIA</i>
SB convencional	<ul style="list-style-type: none"> • Perlas de vidrio 	<ul style="list-style-type: none"> • Plátano • Pulpa de tomate 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad: Mejor que un polvo obtenido de un secador de tambor 	Hufenüssler (1992) Kachan (1992)
SB convencional	<ul style="list-style-type: none"> • Polietileno de alta densidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Umbu • Cereza • Mango 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad: Apropiado para la producción de jugo 	Lima (1992) Alsina (1996) Medeiros <i>et al</i> (2002)

Abadio *et al*, (2003) estudiaron la influencia de la concentración de maltodextrina adicionada y la velocidad de rotación del disco aspensor sobre las propiedades físicas del polvo de piña obtenido mediante un secado por aspersión. Las propiedades físicas del polvo analizadas fueron: densidad aparente y verdadera, color, contenido de humedad del polvo y solubilidad. Los resultados obtenidos mostraron que el uso de bajas velocidades rotación del disco aspensor (< 25,000 rpm) y una concentración del 10% de maltodextrina en la solución alimentada son las condiciones más recomendables para la obtención de un producto de libre flujo y alta solubilidad.

Lopes *et al*, (2006) evaluaron la influencia de la temperatura del proceso, la velocidad de flujo de alimentación y la velocidad del aire en la zona anular y en el spout en el proceso de secado de

pulpa de mango en lecho por fuente fluidizado. Concluyeron que el secado de pulpa de mango en spouted bed no puede realizarse mediante una alimentación continua, debido a que su alto contenido de azúcares provoca el colapso de la fuente, sin embargo, una alimentación intermitente, bajas temperaturas de proceso y altos flujos de aire en la zona anular y del spout son variables que brindan las condiciones más viables para el proceso logrando un incremento en la eficiencia de la producción del polvo y una alta retención de carotenos, así como una disminución en el oscurecimiento del producto y en su contenido de humedad contribuyendo a un mejoramiento en la calidad del producto final. Lopes *et al*, (2006) operaron su equipo, alimentando la pulpa de mango hasta el punto en el que la disminución del movimiento de los sólidos inertes en la zona anular fuera visible y pudiera provocar el colapso de la fuente. La alimentación era reiniciada después de la eliminación de la mayor parte del material retenido en las partículas inertes. El tiempo de alimentación disminuyó conforme el número de pulsos aumentó, probablemente debido a la acumulación del material retenido en los sólidos de cada ciclo. El proceso de secado se detuvo cuando el tiempo de alimentación alcanzaba un 25% del tiempo inicial de alimentación.

Roustapour *et al*, (2006) establecieron que los mayores problemas del secado por aspersion de los jugos de frutas como el jugo de lima son la pegajosidad y la termoplasticidad que presentan debido a sus componentes. El jugo de lima esta constituido en mayor proporción por azúcares invertidos y ácido cítrico, los cuales poseen bajas temperaturas de transición vítrea. Debido a estas características, presentan problemas de pegajosidad de las partículas del polvo sobre las paredes del secador provocando su colisión y que el secado de este tipo de materiales sea un proceso muy difícil. Para tratar de resolver estos problemas, Roustapour *et al*, (2006) propusieron analizar la influencia de diferentes porcentajes de adición de dióxido de silicio y maltodextrina (DE5) sobre el secado por aspersion de jugo de lima. La investigación reveló que para realizar un secado exitoso del jugo es necesaria la adición de un 10% de dióxido de silicio y 20% de maltodextrina (DE5) al jugo alimentado. El muestreo de las partículas a diferentes longitudes de la pared del secador indicó que existe un rápido decremento del contenido de humedad del polvo al inicio de la pared mientras que a longitudes mayores la disminución de la humedad del producto es más lenta.

Papadakis *et al*, (2006) propusieron reducir el problema de pegajosidad del polvo de jugo de uva en las paredes del secador mediante la adición de maltodextrina con diferentes grados de dextrosa

equivalente (21, 12 y 6) como agente auxiliar de secado. Para cada tipo de maltodextrina, las condiciones de operación de secado y la concentración mínima de maltodextrina adicionada fueron determinadas. Los resultados mostraron que bajos grados de dextrosa equivalente (6), bajas temperaturas de entrada (110°C) y salida del secador (77°C) y proporciones de sólidos de jugo/ maltodextrina adicionadas a la alimentación en una porción de 67/33 son variables que determinan un proceso de secado exitoso de jugo de uva.

Young *et al*, (2007) analizaron las propiedades fisicoquímicas del polvo de sandía obtenido mediante un secado por aspersión. Las propiedades analizadas del polvo fueron el contenido de licopeno, β -caroteno, humedad, actividad acuosa, disolución y color. Los resultados mostraron que la adición de maltodextrina facilita el secado por aspersión del jugo de sandía, pero altera las propiedades fisicoquímicas del polvo. Sin embargo, la variable que afecta directamente estas propiedades es la temperatura de entrada, ya que si el secado se realiza por arriba de 165°C se obtiene un producto con una pérdida de nutrientes y cambios drásticos en el color mientras que si el secado se realiza a temperaturas de entrada menores a 155°C el polvo obtenido presenta menor pérdida de color, bajos contenidos de humedad así como baja actividad acuosa y altos porcentajes de retención de licopeno y β -carotenos.

Como puede observarse en las investigaciones antes mencionadas, los problemas que se presentan durante el secado de pulpa de frutas tanto en el lecho por fuente (“spouted bed”) como en el secador por aspersión son principalmente la cohesión y la adhesión del polvo a las paredes del secador, lo que provoca una disminución en el porcentaje de eficiencia de recuperación del producto. Esto hace necesario la adición de una alta concentración de ayuda de secado (maltodextrina) para eliminar o reducir este problema, lo que trae como consecuencia un detrimento en la calidad del producto seco obtenido (Young *et al*, 2007).

Por lo anterior se hace evidente la necesidad de realizar estudios de secado de jugos y pulpas de frutas en condiciones de operación por debajo o muy cercanas al punto de pegajosidad con el fin de evitar el uso de este tipo de aditivos, para obtener un producto mejor calidad, lo cual es el objetivo del presente trabajo.

II.4. PROBLEMAS ASOCIADOS CON EL SECADO DE ALIMENTOS RICOS EN AZÚCARES

El secado por aspersión es un método estable y ampliamente usado para la transformación de alimentos líquidos en polvo. Los productos deshidratados por este proceso pueden ser catalogados en dos grupos: productos pegajosos y no-pegajosos (Boonyai *et al.*, 2004). Esta categorización es relativa ya que algunos productos no pegajosos se comportan de manera contraria dependiendo de las condiciones del proceso. Los productos no pegajosos pueden ser tratados a través de un secador simple. Los productos secos obtenidos son de baja higroscopicidad y de libre flujo. Algunos ejemplos de estos productos son la leche, proteínas y algunas gomas en polvo. Los productos pegajosos son generalmente de tratamiento más difícil (Masters, 1991).

La pegajosidad de un alimento en polvo puede ser descrita en términos de su cohesión (pegajosidad entre partículas) y su adhesión (pegajosidad entre partículas y paredes del secador) (Boonyai *et al.*, 2004). Esto puede conducir a un bajo rendimiento y problemas de operación. Para el secado exitoso de estos materiales, cualquiera de ellos deberá de ser modificado mediante adición de algunos aditivos como maltodextrinas (Brennan *et al.*, 1971). Estos productos no solo poseen problemas durante el proceso sino que también son susceptibles de alteraciones durante su almacenamiento. Algunos de estos materiales son jugos de frutas y vegetales, mieles y lactosa en polvo.

Específicamente, el problema de pegajosidad en los polvos está asociado con la presencia de una alta concentración de azúcares en el producto. En la liofilización también se presenta este problema durante el secado. Las dificultades técnicas están asociadas directamente a las características físicas de la mezcla de azúcares de bajo peso molecular presentes en el material, especialmente la sacarosa, maltosa, glucosa y fructosa (Bhandari *et al.*, 1993). La remoción rápida de la humedad durante el secado da como resultado productos completamente amorfos y con regiones microcristalinas dispersas en una masa amorfa (Senoussi *et al.*, 1995). La forma amorfa es inestable y con una alta higroscopicidad (Audu *et al.*, 1978).

II.5. RELACIÓN ENTRE PEGAJOSIDAD Y TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA (T_g)

Recientemente, la temperatura de transición vítrea (T_g) ha sido relacionada con los problemas de cohesión y adhesión que presentan los alimentos en polvo, entre ellos polvo de frutas (Bhandari *et*

al., 1997), mezcla de azúcares (Downton *et al.*, 1982), café en polvo (Wallack y King, 1998) y derivados lácteos (Bronlund, 1997). Es utilizada como indicador fundamental para conocer el comportamiento de pegajosidad de cualquier alimento rico en azúcares (Slade *et al.*, 1993, Ross y Karen, 1991). La T_g es así, un estado intermediario entre un estado vítreo a uno gomoso o viceversa del material. (Bhandari *et al.*, 1997). La transición vítrea en un sistema amorfo es dependiente de la composición del material y de la temperatura de operación. Se pueden presentar problemas de pegajosidad cuando el alimento en polvo es rico en carbohidratos y es expuesto a temperaturas por arriba de su T_g , la cual también esta en función del contenido de humedad y de la actividad acuosa del producto (Bhandari *et al.*, 1997).

En realidad el comportamiento de pegajosidad de un producto amorfo es solamente observado en temperaturas por encima de la T_g . La dimensión de pegajosidad o las consecuencias de los cambios estructurales del polvo depende de la diferencia entre la temperatura del producto y la de transición vítrea como se muestra en el Cuadro II. 2 (Labuza, 1995).

Se ha planteado que el problema de la pegajosidad puede ser evitado si el secado se realiza a no más de 20°C arriba de la temperatura de transición vítrea (Bhandari *et al.*, 1997). El polvo podría ser enfriado inmediatamente por debajo de la T_g y así disminuir la pegajosidad y aumentar la cantidad colectada. Roos y Karen (1991) sugirieron que la leche en polvo debe ser almacenada 20°C por debajo de su T_g para evitar problemas de cohesión en el producto. En ambos casos la determinación de la T_g es fundamental para identificar los parámetros de procesamiento y almacenamiento.

Bhandari *et al.*, (1993) establecieron que la temperatura de pegajosidad de los productos con altos contenidos de azúcares se encuentra generalmente 10-20°C por arriba de la T_g mientras que el apelmazamiento se presenta cuando el producto es almacenado por arriba de la temperatura de pegajosidad. A pesar de las investigaciones cuyos resultados relacionan la temperatura de transición vítrea y la temperatura de pegajosidad, la correlación que existe entre ellas aun no es precisa; por lo que la utilización de este parámetro, presenta algunos inconvenientes. Primeramente la temperatura de pegajosidad puede encontrarse 20°C por arriba de la T_g , por lo que para estimaciones precisas donde se requiere un control exacto de temperatura no es aplicable ya que tan solo realizar el proceso unos grados alrededor de la temperatura de pegajosidad puede provocar cohesión y adhesión en el producto. Otro inconveniente es que la determinación de la

temperatura de transición vítrea puede variar dependiendo de la técnica usada o de la preparación de la muestra analizada, ocasionando variaciones en la determinación de la temperatura de pegajosidad. Otra desventaja de este método es que los alimentos en polvo cuyos componentes principales poseen una baja temperatura de transición vítrea pueden influenciar la determinación de la T_g del alimento en general.

Es importante resaltar que a pesar de los problemas que representa el uso de la temperatura de transición vítrea, es el indicador más utilizado y aplicado en las investigaciones acerca de la determinación de la temperatura de pegajosidad de diferentes polvos alimenticios.

Cuadro II.2 Influencia del incremento de la temperatura del producto por arriba de la T_g (Labuza, 1995)

Temperatura por arriba de la T_g (°C)	Características
10	Comienza la adhesión
20	Pegajosidad
30-50	Cristalización a temperatura ambiental
>50	Colapso del proceso (fuente o aspersión)

El presente trabajo pretende contribuir a un aspecto de enorme importancia para secadores tipo “spouted bed”, el estudio del efecto de las condiciones de operación y de la temperatura de transición vítrea (T_g) sobre el grado de pegajosidad que se observa en el secado de pulpa de fresa además de analizar el efecto que se tiene sobre la eficiencia de producción de polvo.

II.6. GENERALIDADES SOBRE LA FRESA

Dado que en este trabajo se utiliza como fluido de trabajo pulpa de fresa, a continuación se describen brevemente las características principales de la fresa.

II.6.1. CLASIFICACIÓN

La fresa (*Fragaria vesca*), se caracteriza por ser una planta pequeña que pertenece a la familia de las *Rosáceas*, subfamilia *Rosioideas* y al género *Fragaria*. Es una planta vivaz silvestre considerada la más antigua en todos los continentes y que ha dado origen a más de 400 variedades (Bernal, 1995).

Generalmente, la fresa se considera una hortaliza que se cultiva por los frutos obtenidos de la planta. Se produce por semilla o por renuevos. Las variedades de mejor rendimiento en el país son: *solana*, *fresno* y *tioga*. Es una planta muy fértil, resistente a bajas temperaturas, deteniendo su vegetación en invierno y reactivándose en primavera. La fresa es una fruta de temporada ya que se cosecha de enero a mayo, siendo la de mejor calidad la de febrero y marzo (Bernal, 1995).

II.6.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FRESA

La fresa es una de las frutas más apreciadas desde la antigüedad por su sabor y sus excelentes propiedades nutritivas. Esta fruta constituye una importante ayuda en las dietas de adelgazamiento, ya que el 89.53% de su composición es agua. De hecho, su aporte calórico es muy bajo (36.19 calorías por 100 gramos) (INNSZ, 2000).

En 100 gramos de fresas se encuentran escasas cantidades de grasa, proteínas y carbohidratos: 0.55 g de proteínas, 9.4 g de hidratos de carbono y sólo 0.3 g de grasa. Su principal valor es el alto contenido en vitamina C, 100 g cubren la cantidad recomendada de vitamina C que se requiere diariamente (60 mg/día). También contienen vitamina A (90 UI/100 g), vitamina E (0.23 mg por 100 g) y menores cantidades de otras vitaminas como las B1, B2, B3 y B6. Entre los minerales que contiene, las fresas aportan fundamentalmente potasio y magnesio, aunque también hierro, fósforo, yodo y calcio. Tiene 1.43 gramos de fibra por 100 gramos de producto, lo que supone un aporte moderado. (INNSZ, 2000). También se le atribuye otras propiedades a la fresa, sobre todo por su abundancia de vitamina C, antocianinas, vitamina E y fenoles ya que estos nutrientes poseen una comprobada acción antioxidante (Proteggente *et al.*, 2002; Wada y Ou, 2002; Liu *et al.*, 2002).

II.7. COMPUESTOS FENÓLICOS EN FRUTOS

II.7.1. DEFINICIÓN

Los compuestos fenólicos o polifenoles, son las sustancias que poseen un anillo aromático unido a uno o más grupos hidroxilo, incluyendo derivados funcionales por ejemplo ésteres y glucósidos (Macheix *et al.*, 1990).

Estos compuestos presentes como metabolitos secundarios en plantas están directamente relacionados a las características de los alimentos, como el sabor, palatabilidad, valor nutricional así como sus efectos farmacológicos y nutricionales. Los compuestos fenólicos presentes en la

naturaleza, se encuentran en los frutos y verduras prácticamente en todas las partes de las plantas, de los cuales se conocen aproximadamente 4,000 flavonoides que son el grupo más importante. Un número considerable de fenoles monocíclicos simples, quinonas fenólicas, lignanos, xantonas se incluyen en esta clasificación, de los cuales, la mayoría se pueden encontrar en las frutas, siendo estos una excelente fuente de polifenoles (Macheix *et al.*, 1990).

Solo algunos polifenoles se consideran importantes en los alimentos, estos compuestos son el ácido gálico, sináptico, ferúlico, cafeíco, ρ -cumárico y sus derivados así como los flavonoides y sus glucósidos.

Mientras que la mayoría de los polifenoles no son pigmentos, son de igual importancia ya que son los responsables de la pérdida de color, principalmente del oscurecimiento, que se desarrolla durante el almacenamiento y procesamiento de las frutas y verduras formando parte de las reacciones de oscurecimiento enzimático y no enzimático. Además del color, los polifenoles también contribuyen en el sabor (astringencia), a la relación azúcar/ácido del fruto y se ha utilizado como criterio para determinar la calidad global de frutos frescos y productos como el vino (Lee, 1992).

II.7.2. ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE LOS COMPUESTOS FENÓLICOS

A lo largo de los años, algunos beneficios han sido atribuidos a los compuestos fenólicos y un gran número de estudios han sugerido que el consumo de frutas y verduras pueden reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y de cáncer, potencialmente a través de la actividad biológica de los compuestos fenólicos así como de las vitaminas como antioxidantes (Proteggente *et al.*, 2003). Por lo que los polifenoles pueden prevenir a la oxidación lipídica, la mutación del DNA y el daño del tejido.

El comportamiento antioxidante de los componentes fenólicos parece estar relacionado con su capacidad para quelar metales, inhibir la lipoxigenasa y captar radicales libres, aunque en ocasiones también puede promover reacciones de oxidación *in vitro*. Los compuestos fenólicos actúan como prooxidantes quelando metales, bien de manera que mantienen o incrementan su actividad catalítica o bien reduciendo metales, incrementado así su capacidad para formar radicales libres de los peróxidos (Decker, 1997). Para que un compuesto fenólico sea clasificado como antioxidante debe cumplir 2 condiciones básicas:

- 1) Que se encuentre en una concentración baja con relación al sustrato que va a ser oxidado y pueda retrasar o prevenir la autooxidación o la oxidación mediada por un radical libre.
- 2) El radical formado tras el secuestro sea estable y no pueda actuar en oxidaciones posteriores.

Aunque la actividad antioxidante tradicionalmente se ha atribuido sólo a los compuestos fenólicos solubles, recientemente se ha sugerido que las proantocianidinas y taninos hidrolizables de alto peso molecular también la poseen, ya que estos compuestos no son absorbidos y pueden ejercer su actividad antioxidante dentro del tracto digestivo y liberar los antioxidantes solubles (Bravo *et al.*, 1998).

Por lo anterior, se puede observar la enorme importancia que reviste el retener en la mayor cantidad posible el contenido de fenoles en frutos procesados, para preservar su poder antioxidante y actividad biológica, razón por la cual, en este trabajo se cuantifica el contenido de fenoles residuales en la fresa deshidratada como un indicador de la cantidad de polvo de fresa obtenido.

II.8. DETERMINACIÓN DEL COLOR EN LOS ALIMENTOS

El color de un alimento involucra importantes consideraciones para el consumidor y el tecnólogo, relacionadas con la preferencia y aceptabilidad de un producto. El papel que el color juega en la reacción del consumidor hacia un alimento es automático y por ello, debe ser conservado al máximo.

Por lo tanto, la medición del color de un alimento ha cobrado importancia, por lo que se ha estandarizado y mecanizado, ya que la apreciación individual puede ser muy variada. El sistema más usado para medir y especificar el color con bases científicas es el adoptado en 1931 por la Comisión Internacional de l'Éclairage (Comisión Internacional de Iluminación), y es conocido como sistema CIE.

En el sistema CIE se establecen una serie de normas que han hecho posible medir el color en términos absolutos (Ranganna, 1986), al proveer números que proporcionan una medición de color visto bajo una fuente de iluminación estándar (iluminante) por un observador estándar lo que evita las diferencias que pueden originarse por las reacciones individuales al color (Hui, 1992). Esta teoría se fundamenta en que cualquier color puede ser igualado exactamente por una

mezcla de tres colores primarios, rojo, verde y azul. Las cantidades relativas de cada color que son necesarias para producir un color dado son denominadas valores “triestímulo” del color, que son colores imaginarios definidos matemáticamente con funciones que dan a los colores valores positivos (lo que elimina la igualdad de colores de valor negativo). Los valores triestímulo (denominados X, Y, Z) permite asignar a un color específico valores numéricos a sus atributos (matíz, saturación y brillo) y una posición dentro del plano (diagrama de cromaticidad) al ser convertidos a coordenadas cartesianas que reciben el nombre de coordenadas de cromaticidad (x, y, z), cuyo punto de intercepción corresponde al plano donde se ubica la muestra con una iluminación estándar (Ranganna, 1986).

En el sistema CIElab (modificación hecha en 1971 al sistema CIE), el espacio en que se ubica el color se define en coordenadas equivalentes a X, Y, Z, con la finalidad de que cambios iguales de los valores sean cambios iguales en la percepción. Para esto se combinó un espacio en coordenadas rectangulares (L^* , a^* y b^*) con otro en coordenadas cilíndricas (L^* , H^* , C^*) (Guzmán, 1998; Prádanos del Pico, 2004).

Los atributos del color son matíz, saturación y brillo. El matíz se puede definir como la clase de color (rojo, azul o verde), y está determinado por el valor exacto de la longitud de onda de la luz reflejada (Clavo y Durán, 1997); el brillo o luminosidad está relacionado con la reflectancia o transmitancia del color y debe ser entendido como la extensión de cuanto está un color diluido con negro, mientras que la saturación se define como el grado de la mezcla que tenga un color puro con el blanco y debe entenderse como la fuerza o intensidad del color (Ranganna, 1986).

En el sistema CIElab, L^* es la luminosidad, a^* es la saturación y b^* es el ángulo del tono, mientras que C^* es el croma (equivalente a la saturación, es la distancia del punto de color con respecto al punto blanco) y H^* el matíz (que proporciona información sobre la longitud de onda dominante); el parámetro colorimétrico a^* define el componente rojo-verde, mientras que el parámetro b^* define el componente amarillo-azul (Ranganna, 1986) .

H^* y C^* pueden calcularse como:

$$H^* = \tan^{-1}(b^*/a^*)$$

$$C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{0.5}$$

Dentro del sistema CIElab la diferencia de color entre dos muestras está dada por:

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

(Abonyi *et al.*, 2001)

El índice de oscurecimiento representa la pureza del color café y es reportado como un importante parámetro en los procesos donde toma lugar algún tipo de oscurecimiento, como el cambio en color que acompaña al daño mecánico o fisiológico de frutas y vegetales debido a reacciones oxidativas y no oxidativas. Las reacciones no oxidativas (también conocidas como no enzimáticas) abarcan los fenómenos de caramelización y/o reacciones de Millard. El control del oscurecimiento en alimentos puede llevarse a cabo por varios métodos, como son la selección de cultivos menos susceptibles a la decoloración ya sea por la ausencia de fenoles que puedan servir como sustrato o bien debido a que el sustrato o enzima estén presentes en baja concentración (Abonyi *et al.*, 2001).

El oscurecimiento también puede controlarse cosechando frutas y vegetales en estados de madurez que den una decoloración mínima. Otro método incluye la remoción del oxígeno de los tejidos de las frutas y vegetales así como de la atmósfera que los rodea, la adición de antioxidantes o sustancias reductoras, la adición del tratamiento con inhibidores en niveles permitidos o la inactivación por calor de las enzimas (Hui, 1992).

III. OBJETIVOS

III.1. OBJETIVO GENERAL

Aplicabilidad del secador de lecho por fuente fluidizado con sólidos inertes al secado de pulpa de fresa libre de aditivos, evaluando el efecto de las condiciones de operación y de la temperatura de transición vítrea (T_g) sobre el problema de pegajosidad sobre los sólidos inertes y la eficiencia de recuperación del producto.

III.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Evaluar las características físicas de la materia prima, así como su contenido de vitamina C, fenoles totales y color.
2. Establecer la metodología a seguir para obtener el producto seco.
3. Determinar la temperatura de transición vítrea del producto seco.
4. Evaluar el efecto de las condiciones de operación del secador sobre la pegajosidad y eficiencia de recuperación del polvo así como el grado de termodegradación encontrada en la fresa en polvo utilizando como indicadores de termodegradación, el color residual, así como el contenido residual de vitamina C y fenoles totales.
5. Definir con base en los resultados obtenidos la factibilidad de aplicación de este tipo de secador a la deshidratación de pulpa de frutas.
6. Disminuir la cohesividad de las partículas de la pulpa de fresa en polvo obtenida mediante la adición de bajas concentraciones de maltodextrina que no afecten la calidad del producto.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental planteado se resume en el diagrama de bloques de la Figura IV.1.

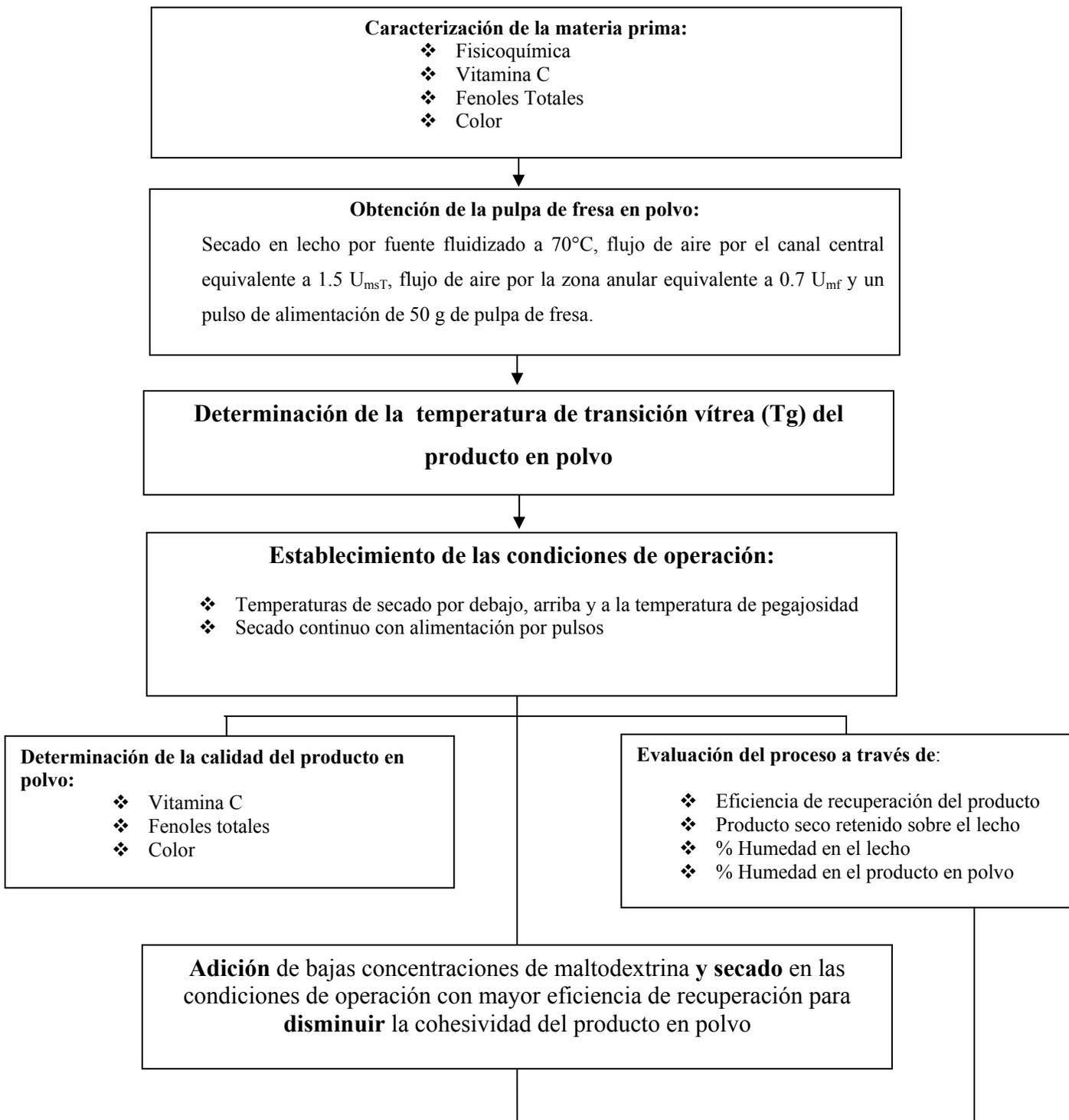


Figura IV.1 Desarrollo experimental para la evaluación del secado de pulpa de fresa en el lecho por fuente fluidizado con tubo central

IV.2. MATERIA PRIMA

Se empleó pulpa congelada de fresa sin semillas adquirida a la empresa TOPPING-FRUT, México sin ningún tratamiento previo ni adulterantes. La cual fue descongelada y adicionada de ácido ascórbico antes de su utilización. A esta pulpa se le denomina a lo largo del trabajo “pulpa de fresa comercial”.

IV.3. MATERIAL DE LABORATORIO Y REACTIVOS

Los materiales que se utilizaron son:

- ❖ Secador de lecho por fuente fluidizado con tubo central sumergido en sólidos inertes (partículas de teflón-FEP)
- ❖ Calorímetro diferencial de barrido PERKIN ELMER DIAMOND DSC
- ❖ Equipo de adquisición de datos EXTECH 383274 CON SOFTWARE
- ❖ Bomba de desplazamiento positivo peristáltica marca COLE PARMER modelo 7553-30 con cabezal marca MASTERFLEX modelo 7016-70
- ❖ Espectrofotómetro UV-visible JENWEY 6305
- ❖ Engargoladora PERKIN ELMER para charolas del calorímetro
- ❖ Termo balanza marca OHAUS
- ❖ Balanza analítica marca METTLER TOLEDO
- ❖ Charolas de aluminio PERKIN ELMER 0219-0041 para calorímetro
- ❖ Manómetros U
- ❖ Manómetros inclinados
- ❖ Termómetros de mercurio
- ❖ Termopares tipo K con registro de temperatura
- ❖ Material de vidrio de uso común en el laboratorio
- ❖ Reactivos químicos de laboratorio

IV.4. EQUIPO EXPERIMENTAL

IV.4.1. SECADOR DE LECHO POR FUENTE CON TUBO CENTRAL

El secador de lecho por fuente-fluidizado que se utilizó en el presente trabajo fue desarrollado en un trabajo previo (Elias, 2000) y se presenta en la Figura IV.2.

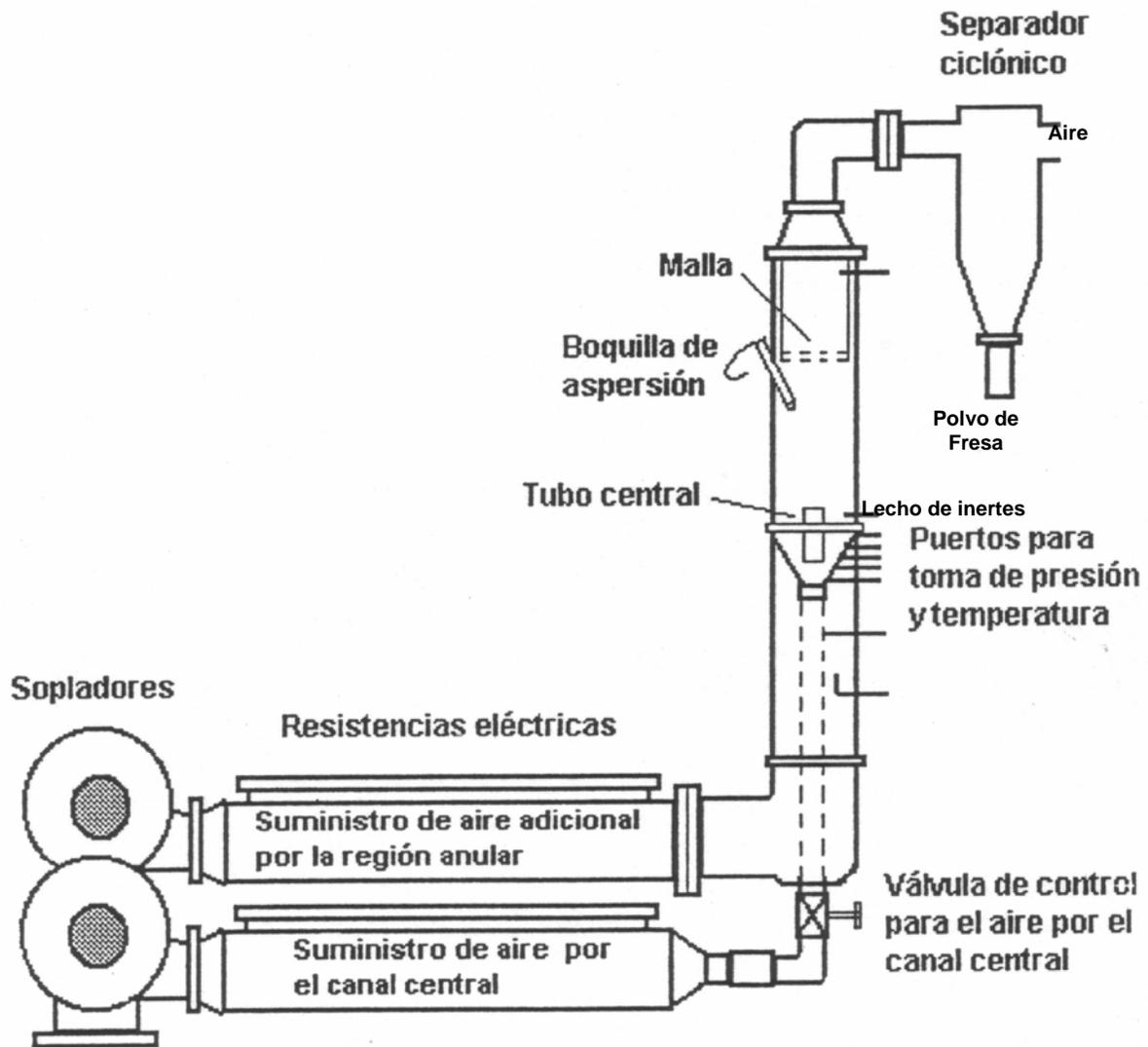


Figura IV.2 Diagrama completo del equipo a utilizar (Elías, 2000)

El cuerpo del secador está formado por una columna cilíndrica de acrílico de 70 cm de alto, 14.3 cm de diámetro interno con un grosor de pared de 6 mm y con una base cónica perforada de acero inoxidable que puede conducir tanto aire adicional a través del espacio anular, como el aire para formar la fuente de manera independiente, manejado a través de sus respectivos sopladores y válvulas de control.

La columna de acrílico sostiene una boquilla de aspersión en su pared, que asperja la solución a secar en forma de cono sólido con un ángulo de 13°. La boquilla está montada de tal manera que se asegura que la alimentación moja únicamente la parte central del lecho. El separador ciclónico se encuentra conectado a la parte superior de la columna a través de una reducción de campana y un codo conector.

Para favorecer el desprendimiento del polvo seco de los sólidos inertes se cuenta con una malla de 1 cm de apertura en la parte superior del cuerpo del secador como deflector de la fuente. El secador está equipado con un tubo central o *draft tube* por debajo de la superficie del lecho que le permite la disminución de la caída de presión originada por el lecho, así como estabilizar la fuente, evitando el colapso de la misma a altas fracciones mojadas del mismo (Strumillo *et al.*, 1983; Osorio, 1990). El tubo central está construido en acero inoxidable con un diámetro interno de 2.85 cm, longitud de 8.8 cm y grosor de 1.8 mm, se encuentra colocado a 5 cm del orificio de entrada del aire para no interferir con el libre movimiento de los sólidos inertes.

La altura del lecho (partículas FEP-DUPONT[®], en todos los casos fue el equivalente a un diámetro de columna (14.3 cm o $H/D_c=1$), que es el mínimo recomendado para aplicar las ecuaciones clásicas de hidrodinámica en este tipo de equipos (Mathur y Gishler, 1955).

En el cuadro IV.1 se presentan los resultados obtenidos por Ramírez (2006) de la caracterización de las partículas de FEP (copolímero defluor etilen propileno) utilizadas como sólido inerte en esta investigación.

Cuadro IV.1 Caracterización de las partículas de FEP (Ramírez, 2006)

CARACTERISTICAS	PARTÍCULA DE FEP
Tamaño de partícula d_p (mm)	2.59
Densidad de partícula (Kg/m^3)	2039.6
Diámetro de esfera equivalente (mm)	2.64
Esfericidad	0.73
Densidad a granel (Kg/m^3)	1214
Porosidad del lecho	0.4019
U_{ms} sin tubo (m/s) ^a	0.84
U_{msT} con tubo central (m/s) ^a	0.54
U_{mf} (m/s) ^b	0.9

^a Velocidad mínima para la formación de la fuente sin tubo (U_{ms}) y con tubo central (U_{msT})

^b Velocidad mínima de fluidización

IV.5. MÉTODOS

Todas las determinaciones se hicieron por triplicado, obteniéndose el valor medio y los límites de confianza al 95% fueron calculados.

IV.5.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

A) Humedad y sólidos totales (AOAC, 1980 Método 22.013)

La determinación de la humedad de la pulpa de fresa inicial se realizó por el método de la termobalanza (Ohaus MB 200), a 110°C programada a una variación de humedad de 0.01 g en 60 segundos en el método “autodry”, usando 10 mL de la pulpa de fresa y una cama de arena (lavada y secada) usada como soporte, para aumentar la superficie de contacto y reducir el tiempo de la determinación por formación de costras.

B) Vitamina C (Ranganna, 1986)

El método de determinación directa está basado en la cuantificación del exceso de 2,6 diclorofenol-indofenol, el cual disminuye la intensidad de su color debido al ácido ascórbico presente en la muestra y en la solución de los estándares.

REACTIVOS:

- Solución de ácido metafosfórico al 2%
- Solución indicadora: Se disolvieron 100 mg de 2,6 diclorofenol-indofenol y 84 mg de bicarbonato de sodio en agua destilada caliente (85-95 C), se enfrió y aforó a 100 mL. Se filtró y diluyeron 25 mL a 500 mL con agua destilada.
- Soluciones estándares de ácido ascórbico: Se pesó (exactamente) 100 mg de ácido ascórbico y se aforó hasta 100 mL con HPO₃ al 2%. Se diluyeron 4 mL de esta solución hasta 100 mL con HPO₃ al 2% (1 mL = 40 µg de ácido ascórbico).

PROCEDIMIENTO:

- Preparación de la muestra: Se pesaron 10 g de muestra y se aforó hasta 100 mL con HPO₃ al 2%.
- Curva Estándar: En tubos de vidrio se colocaron los siguientes volúmenes de la solución estándar de ácido ascórbico 1, 2, 2.5, 3, 4 y 5 mL y se llevaron a 5 mL totales con HPO₃ al 2%. Se adicionaron 10 mL de la solución indicadora y se tomó la lectura dentro de los 15

a 20 seg de reacción. Se Llevó el equipo a 100% transmitancia con un blanco de 5 mL de HPO₃ al 2% y 10 mL de agua. Se tomó la medición a la longitud de onda de 518 nm, obteniendo la curva tipo absorbancia contra concentración.

- Muestra: Se tomaron 5 mL del extracto (o menos y se llevaron a 5 mL con HPO₃ al 2%) y se adicionó 10 mL de la solución indicadora y se procedió a leer su absorbancia a 518 nm con un blanco de 5 mL del extracto y 10 mL de HPO₃.

CÁLCULOS:

La concentración de ácido ascórbico de la curva estándar y de la muestra se realizaron a través de:

$$\frac{\text{mg de ácido ascórbico}}{100 \text{ g o mL de muestra}} = \frac{\text{Contenido de ac. asc. estimado en la curva tipo} \times \text{volumen de aforo} \times 100}{\text{mL de solución tomados para la estimación} \times 1000 \times \text{peso de la muestra}}$$

C) DETERMINACIÓN DE FENOLES TOTALES (Asami *et al.*, 2003)

OBTENCIÓN DE LA CURVA TIPO:

Se prepararon soluciones de 100, 200, 300, 400 y 500 mg/L de ácido gálico. En los tubos de ensaye se adicionaron 100 µL de cada una de las soluciones anteriores 100 µL de agua desionizada, 1 mL de reactivo de Folin Ciocalteu y 0.8 mL de una solución de carbonato de sodio al 7.5%.

Los tubos se agitaron y se dejaron reposar durante 30 minutos en la oscuridad antes de leer la absorbancia a 725 nm.

ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS:

Se maceraron 20 g de muestra y se extrajeron con HCl al 2% en metanol. La solución se dejó en reposo por 24 h en la oscuridad y a temperatura ambiente con agitación. Se aforó a 100 mL con el mismo disolvente, se filtró y se prepararon los tubos para leer en el espectro a 725 nm.

En los tubos de ensaye se adicionaron 100 µL de agua desionizada, 100 µL de muestra, 1 mL del reactivo de Folin Ciocalteu y 0.8 mL de una solución de carbonato de sodio al 7.5%. Los tubos se agitaron y se dejaron reposar durante 30 minutos en la oscuridad antes de leer en el espectro a 725 nm.

CORRECCIÓN POR EL ÁCIDO ASCÓRBICO PRESENTE EN LA MUESTRA

(Asami *et al.*, 2003):

Debido a la contribución que tiene el ácido ascórbico a la reacción de oxidación-reducción realizada por el Folin Ciocalteu con el extracto fenólico de la muestra, se determinó un factor de corrección el cual representa el aporte del ácido ascórbico al contenido de fenoles totales. Para la determinación del factor se preparó una solución de ácido ascórbico con la concentración correspondiente al contenido del mismo en la muestra utilizada en la determinación de fenoles. Se prepararon tubos de ensayo en los cuales se adicionaron 100 μ L de agua desionizada, 100 μ L de la solución de ácido ascórbico, 1 mL del reactivo de Folin Ciocalteu y 0.8 mL de una solución de carbonato de sodio al 7.5%. Los tubos se agitaron y se dejaron reposar durante 30 minutos en la oscuridad antes de leer en el espectro a 725 nm. La absorbancia real correspondiente al contenido de fenoles totales, fue la diferencia de la obtenida con el ácido ascórbico y la obtenida por la muestra. Estos resultados se expresan como equivalentes de ácido gálico (EAG) por g de muestra.

A) DETERMINACIÓN DE COLOR

La determinación de color se realizó mediante un espectrofotómetro colormate HDS, que mide el color de acuerdo al sistema CIELab y al sistema CIE. El espectrofotómetro colormate HDS se calibró con una pieza de cerámica blanca estándar (D_{65} , 10°C, X = 81.88 Y=86.16, b=88.29; SPIN). La determinación de color de la muestra se realizó colocándola dentro de una celda de cuarzo, procurando eliminar todas las burbujas de aire que pueden quedar atrapadas. Las paredes de la celda se limpiaron, y la celda se colocó frente a la fuente de luz cubriéndola con una placa metálica. Se procedió a realizar 5 mediciones en diferentes lugares de la muestra, obteniendo un valor promedio a D_{65} .

La determinación del color de la materia prima se realizó utilizando como patrón pulpa de fresa fresca, sin embargo, para las muestras obtenidas del proceso de secado se utilizó como patrón una muestra de la pulpa de fresa comercial descongelada para determinar el grado de termodegradación de color sufrido por la muestra.

El color se expresó en los parámetros L^* , a^* , b^* , que a su vez son usados para calcular los valores de ΔE para cada muestra. Los parámetros X, Y, Z reportados por el equipo se utilizan para obtener las coordenadas de cromaticidad “x, y”, con la finalidad de poder ubicar el color de la muestra en un diagrama de cromaticidad y facilitar así la visualización del cambio.

Para realizar el análisis completo del color de las muestras se calcularon los parámetros de matiz, croma y la diferencia de color entre el patrón utilizado y la muestra utilizando las ecuaciones correspondientes mencionadas en el punto II.10 de antecedentes.

IV.5.2. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

La temperatura de transición vítrea se determinó mediante un calorímetro diferencial de barrido (PERKIN ELMER DIAMOND DSC) provisto de una unidad de control automático de temperatura. Aproximadamente 15 mg de muestra en polvo se introdujeron en cápsulas de aluminio (PERKIN ELMER 0219-0041) de 20 μ l de capacidad que posteriormente fueron selladas con una engargoladora PERKIN ELMER. Como referencia se utilizó una cápsula vacía y sellada, de similares características a la que contenía el producto. El intervalo de temperatura vario de 0 a 80°C y de 15 a 80°C y las velocidades de calentamiento fueron de 2, 5 y 10 °C/min. Los termogramas obtenidos fueron analizados para la determinación de la temperatura de transición vítrea.

IV.5.3. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA DEL SECADOR

Las variables evaluadas como respuestas del secador fueron:

A) PORCENTAJE DE HUMEDAD REMANENTE EN EL LECHO

Al término del tiempo de secado de cada pulso alimentado se recolectó una cierta cantidad de sólidos inertes, una muestra representativa de estos se pesó y se llevó a peso constante en una estufa a 100°C para eliminar la humedad presente. Se registraron los pesos y se determina el porcentaje de humedad remanente en el lecho.

B) PRODUCTO SECO RETENIDO SOBRE EL LECHO DE INERTES

Después de determinar el porcentaje de humedad en el lecho, los sólidos inertes se lavan con agua caliente para retirar la pulpa seca adherida y posteriormente se secan y se llevan hasta un peso constante en una estufa a 100°C. Se pesan nuevamente y la diferencia respecto al original corresponde a la cantidad de producto seco adherido a los sólidos inertes. Finalmente se expresan como g de sólido seco adherido/ g de sólido inerte.

C) EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DEL PRODUCTO EN POLVO

Al término del tiempo de secado de cada pulso alimentado se recolectó el producto en polvo obtenido, se registró el peso y se determinó el porcentaje de recuperación con respecto al contenido de sólidos de la alimentación inicial. En cada uno de los parámetros mencionados anteriormente, los resultados se obtuvieron por triplicado, presentándose el valor promedio en la sección de resultados y discusiones así como los límites de confianza al 95%.

IV.5.4. DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA DEL PRODUCTO

Las variables evaluadas como grado de termodegradación del producto fueron:

A) DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL PRODUCTO EN POLVO

La determinación de humedad se realizó en una estufa de vacío utilizando 1 g del producto seco, a una temperatura de 60 °C durante 6 horas (método 925.09 de la AOAC).

B) PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE ÁCIDO ASCÓRBICO

Se prepararon 10 g de pulpa de fresa reconstituida con un contenido de sólidos totales de 15.33% y se aforó hasta 100 mL con HPO₃ al 2%. Se procedió con la metodología mencionada anteriormente. El porcentaje de retención de ácido ascórbico en la muestra se realizó a través de la relación de lo obtenido en la muestra reconstituida con respecto al contenido de ácido en la pulpa de fresa comercial utilizada como materia prima en el proceso de secado.

C) PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE FENOLES TOTALES

Se maceraron 10 g de pulpa de fresa reconstituida con HCl al 2% en metanol durante 24 h, en la oscuridad, a temperatura ambiente y con agitación. Se aforó a 50 mL con el mismo disolvente, se filtró y se prepararon los tubos para leer en el espectro a 725 nm.

En los tubos de ensaye se adicionaron 50 µL de agua desionizada, 50 µL de muestra, 0.5 mL del reactivo de Folin Ciocalteu y 0.4 mL de una solución de carbonato de sodio al 7.5%. Los tubos se agitaron y se dejaron reposar durante 30 minutos en la oscuridad antes de leer en el espectro a 725 nm.

Se realizó la corrección por el ácido ascórbico presente en la muestra con la metodología anteriormente mencionada. El porcentaje de retención de fenoles totales en la muestra se realizó a

través de la relación del contenido de los mismos en la muestra corregida por ácido ascórbico con respecto al contenido en la pulpa de fresa comercial original.

B) COLOR

Se prepararon 10 g de pulpa de fresa reconstituida con un contenido de sólidos totales de 15.33% y se procedió con la metodología mencionada anteriormente. El patrón fue pulpa de fresa comercial utilizada como materia prima en la corrida de secado.

V. PRUEBAS PRELIMINARES

Se había planteado inicialmente seguir la metodología propuesta por Medeiros *et al*, (2002) para el secado de pulpa de mango en spouted bed, la cual consiste en alimentar 50 g de pulpa de mango a un lecho de 2.5 kg de sólidos inertes (polietileno de alta densidad), con un tiempo de proceso de 40 min y una temperatura de entrada del aire por el spouted de 70°C; sin embargo, las condiciones de alimentación (velocidad, forma de alimentación, etc.), están omitidas. Por esta razón, se decidió establecer las condiciones de las pruebas preliminares con base a lo reportado por Ruiz (2001) quien trabajó con el mismo equipo utilizado en este trabajo pero con un lecho de partículas de polipropileno secando soluciones de maltodextrina al 30%. Las condiciones de operación para las pruebas preliminares, fueron entonces una combinación de lo reportado por Medeiros *et al*, (2002) y por Ruiz (2001) y se muestran en el Cuadro VI.1.

Cuadro V.1 Condiciones que se mantuvieron constantes en las pruebas preliminares de secado para la pulpa de fresa

CONDICIONES CONSTANTES DE SECADO	VALOR
Altura del lecho mínimo recomendado por Mathur y Gishler (1995)	1H/D _c
Carga de partículas inertes (kg) (Ruiz, 2001)	1.5 ± 0.01
Cantidad de pulpa alimentada recomendado por Medeiros <i>et al</i> , (2002) (g)	50 ± 0.23
Velocidad de alimentación (mL/min) (Ruiz, 2001)	10
Tiempo de secado recomendado por Medeiros <i>et al</i> , (2002) (min)	40
Flujo de aire alimentado por el canal central (Ruiz, 2001)	1.5 U _{ms}
Flujo de aire alimentado por el área anular (Ruiz, 2001)	0.7 U _{mf}
Temperatura a la entrada del aire del spout (Ruiz, 2001) (°C)	70
Temperatura a la entrada del aire del anulo (Ruiz, 2001) (°C)	70

H = Altura del lecho

D_c = Diámetro del cuerpo del secador

U_{ms} = Velocidad mínima de formación de la fuente o spouting

U_{mf} = Velocidad mínima de fluidización

Al realizarse estas pruebas preliminares, se observó que con una alimentación por pulsos en el secado de pulpa de fresa, la humedad en el lecho iba aumentando con cada pulso, llegando a un punto máximo en el cuarto pulso; en el cual presenta tal humedad que si se iniciaba otra alimentación la fuente se colapsaría. Por lo que, se decidió trabajar sólo con cuatro alimentaciones y una etapa de enfriamiento.

Para permitir el secado de cada pulso y dar tiempo al desprendimiento del producto, se midió la temperatura del aire de salida con respecto al tiempo de proceso, observando que con cada pulso la temperatura de salida presentaba una disminución conforme la pulpa era asperjada sobre los sólidos inertes del lecho, llegando a un punto mínimo, a partir del cual, la temperatura de salida comenzaba nuevamente a incrementarse hasta recuperar la temperatura inicial de salida de lecho. Para registrar la historia de la temperatura de salida del aire de secado se incluyó un sistema de adquisición de datos EXTECH383274, el cual registró y almacenó la temperatura del aire de salida durante todo el proceso de secado.

Los datos almacenados por el sistema de adquisición de datos se muestran en la Fig. V.1. Esta figura muestra que el lecho tarda aproximadamente 10 minutos en recuperar la temperatura inicial de salida durante cada una de las alimentaciones. A este tiempo se le llamó TIEMPO DE RECUPERACIÓN DEL LECHO. Con base en estas observaciones, en las pruebas preliminares posteriores, se decidió anexar este tiempo de recuperación de lecho al tiempo de secado para mantener constantes las condiciones iniciales del lecho durante cada pulso de alimentación en el secado de la pulpa de fresa.

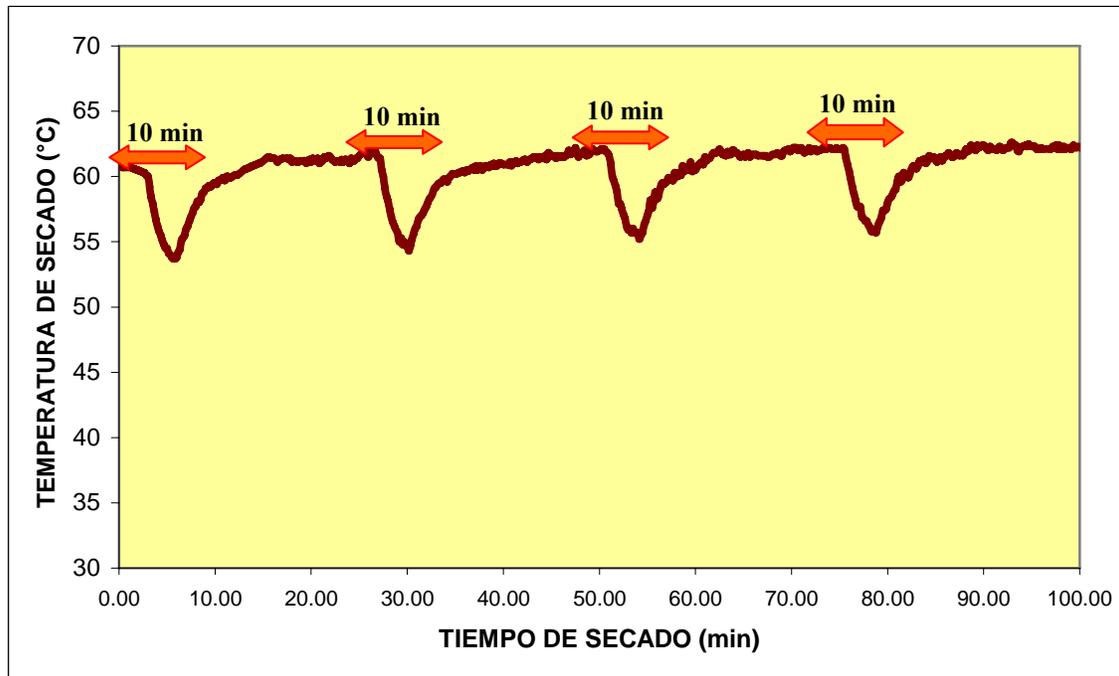


Fig. V. 1 Temperaturas de salida del aire de secado registradas por el sistema de adquisición de datos en las diferentes etapas del secado de pulpa de fresa por pulsos a 70°C

Para poder fijar las temperaturas de secado a utilizar en este trabajo, se determinó la temperatura de transición vítrea (T_g) del polvo obtenido, resultando ser de aproximadamente 43°C como se presenta en la sección VI.2 del capítulo de resultados. Las diferentes temperaturas de secado se propusieron con base a lo mencionado por Bhandari *et al*, (1993) quienes proponen que el punto de pegajosidad de los alimentos ricos en azúcares se presenta en un intervalo de $10\text{-}20^\circ\text{C}$ por arriba de su temperatura de transición vítrea (T_g), por lo que tomando en cuenta la T_g de 43°C , el intervalo de pegajosidad de la pulpa de fresa se encontraría entre $53\text{-}63^\circ\text{C}$.

Finalmente se estableció un modelo experimental, el cual fue de tres variables a dos niveles (2^3) sin punto central, quedando finalmente como se indica en el Cuadro VI.2, en el cual se presentan las temperaturas de proceso, los tiempos de secado y las velocidades de alimentación utilizados en el secado por pulsos para la pulpa de fresa. Cada corrida de secado se realizó por triplicado determinándose los valores medios y los límites de confianza al 95%, los resultados obtenidos se presentan en el capítulo VI. En el cuadro V.3 se presentan las condiciones de operación que se mantuvieron constantes para este diseño experimental utilizando el secador de lecho por fuente fluidizado con tubo central sumergido en los sólidos inertes.

Cuadro V.2 Condiciones de operación definitivas para el secado por pulsos para la pulpa de fresa

VARIABLES	NIVELES	
Temperatura de secado (T_i)	60°C	70°C
Tiempo de secado (Θ)	15 min	25 min
Velocidad de alimentación de la pulpa (F)	5 mL/min	10 mL/min

Cuadro V.3 Condiciones que se mantuvieron constantes para el secado por pulsos de diseño factorial 2^3 del Cuadro

VI.3

CONDICIONES CONSTANTES DE SECADO	VALOR
Altura del lecho mínimo recomendado por Mathur y Gishler (1995)	$1H/D_c$
Carga de partículas inertes (kg)	1.5 ± 0.01
Cantidad de pulpa alimentada (g)	30 ± 0.34 g
Flujo de aire alimentado por el canal central (m/s)	$1.5 U_{msT}$ (0.81)
Flujo de aire alimentado por el área anular (m/s)	$0.7 U_{mf}$ (0.63)
Temperatura a la entrada del aire del spout (T_a)	Igual a T_i

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.1. Caracterización de la materia prima

VI.1.1. Características Físicoquímicas

En el Cuadro VI.1 se muestran las principales características físicoquímicas de la pulpa de fresa comercial.

Cuadro VI.1 Principales parámetros físicoquímicos de pulpa de fresa comercial

PARÁMETRO	VALOR
Sólidos solubles totales (°Brix)	14
pH	3.7
% Humedad	84.65 ± 0.23
Sólidos totales	15.33 ± 0.24

VI.1.2. Contenido de ácido ascórbico

Los resultados de la determinación de ácido ascórbico en las muestras estudiadas se muestran en el Cuadro VI.2.

Cuadro VI. 2 Contenido de ácido ascórbico en las muestras de pulpa de fresa comercial y pulpa fresa fresca

MUESTRAS	ÁCIDO ASCÓRBICO (mg/100 g)
PULPA DE FRESA FRESCA	58.86 ± 0.76
PULPA DE FRESA COMERCIAL	13.44 ± 0.78
PULPA DE FRESA COMERCIAL ADICIONADA CON ÁCIDO ASCÓRBICO	57.87 ± 0.37

En el Cuadro VI. 2 se puede observar que el contenido de ácido ascórbico en la pulpa de fresa comercial fue de 13.44 mg ± 0.78/100 g, el cual es menor a lo reportado por Sahara *et al*, (2004) para fresa congelada a -12 °C con un 1 día de almacenamiento (52 mg /100 g) pero similar a lo encontrado en la pulpa de fresa congelada a -12°C con 90 días de almacenamiento (18.5

mg/100g) esto se debe a que la pulpa congelada utilizada en esta investigación se adquirió con meses de anticipación y presenta una pérdida de vitamina C debido al tiempo y temperatura de almacenamiento. Se realizó un análisis a la pulpa de fresa fresca con fines de comparación, la cual contenía $58.86 \text{ mg} \pm 0.76 / 100 \text{ g}$ por lo que la pulpa comercial presentó sólo un 22.83% de retención de ácido ascórbico. Estos datos concuerdan con los presentados por Lee y Coates (1999) en jugo de naranja congelado, el cual presenta el 19.2% de pérdida después de 24 meses de almacenamiento y a los reportados por Giannakourou *et al.*, (2003) quienes reportaron pérdidas del 25.6, 43.9, 47.8 y 75.8 % para okras, chícharos, frijoles y espinaca respectivamente durante su almacenamiento a -14.4°C por 60 días. Estas pérdidas se deben a la oxidación del ácido ascórbico a ácido dehidroascórbico, el cual se sigue oxidando y se transforma en ácido 2,3-dicetogulónico que no tiene ninguna actividad biológica. Según sean las condiciones del sistema y por medio de una degradación de Strecker el ácido 2,3-dicetogulónico se cicla y produce anhídrido carbónico y furfural; este último se polimeriza y forma melanoidinas, de manera semejante a las que ocasionan el oscurecimiento no enzimático. Es por eso que la pérdida del ácido ascórbico, además de sus consecuencias nutricionales, lleva consigo también una generación de olores indeseables y oscurecimiento del producto. Debido a que la vitamina C es inestable y lábil, se ha propuesto usar su contenido residual en los alimentos procesados como índice de retención de nutrimentos y calidad del proceso (Badui, 1996).

Para evaluar como afectan las condiciones de secado a la pulpa de fresa durante el secado, se le adicionó 45 mg de ácido ascórbico por cada 100 g de pulpa comercial para obtener una concentración final de $57.87 \text{ mg} \pm 0.37 / 100 \text{ g}$ similar a la que tendría la pulpa de fresa fresca y así observar el porcentaje de retención de vitamina C en el producto después del secado.

VI.1.3. Contenido de fenoles totales

Mediante la ecuación de ajuste se realizó el cálculo del contenido de fenoles totales en las muestras.

Para evaluar si la temperatura de congelación y el tiempo de almacenamiento a la que fue sometida la pulpa de fresa comercial afecta el contenido de fenoles totales, se realizó el análisis de una muestra denominada “pulpa de fresa control”, la cual consistió en pulpa de fresa fresca la cual fue congelada en un congelador horizontal convencional hasta -15°C . A esta muestra se le determinó el contenido de fenoles totales corregidos por el contenido de ácido ascórbico junto con

las muestras de pulpa de fresa comercial y pulpa de fresa fresca para determinar el grado de degradación de este parámetro debido a las condiciones de procesamiento y almacenamiento.

En el Cuadro VI.3 se muestran los resultados del análisis de fenoles totales corregidos por el contenido de ácido ascórbico presente en las muestras de pulpa de fresa comercial, pulpa de fresa fresca y pulpa de fresa control, expresados como equivalentes de ácido gálico (EAG) en mg por 100 gramos de muestra.

Cuadro VI. 3 Contenido de fenoles totales corregido por ácido ascórbico en las muestras de pulpa de fresa fresca, pulpa de fresa comercial y pulpa de fresa control

MUESTRAS	FENOLES TOTALES mg eq ácido gálico/100 g de muestra (EAG)
PULPA DE FRESA FRESCA	1693 ± 0.70
PULPA DE FRESA COMERCIAL	1654 ± 0.60
PULPA DE FRESA CONTROL	1657 ± 0.52

Si bien el Cuadro VI.3 muestra variación del contenido de fenoles totales entre las tres muestras estudiadas, éstas, son consistentes con lo reportado por Pastrana-Bonilla (2003), quienes establecen un intervalo del contenido de fenoles totales para la fresa fresca de 1600-2410 mg/100 g de muestra.

Asami *et al*, (2003) demostraron que durante la congelación y almacenamiento a -12°C durante un periodo de 6 meses de pulpa de durazno, no se produce un decrecimiento significativo (utilizando pulpa de durazno fresca como patrón) en el contenido de fenoles totales. Estos resultados concuerdan con lo obtenido para la pulpa de fresa comercial (1654 mg/100 g muestra) y pulpa de fresa fresca (1693 mg/100 g de muestra), las cuales no presentan gran diferencia y concuerdan con lo descrito anteriormente. Por lo tanto, resulta viable el uso de este parámetro como indicador de termodegradación utilizando como materia prima para el secado pulpa de fresa comercial.

Con base a estos resultados se puede considerar que la pulpa de fresa comercial utilizada en esta investigación no pierde compuestos fenólicos por la temperatura de congelación ni por el tiempo de almacenamiento, por lo que es importante evaluar este parámetro para determinar su termodegradación durante su procesamiento y así establecer las condiciones de secado en las cuales se preserva para mantener su calidad como fuente de compuestos fenólicos.

VI.1.4. Determinación de color de la pulpa comercial

La determinación de color se realizó a través del espectrofotómetro Colormate. Debido a que el equipo realiza la medición de los parámetros con respecto a una muestra inicial se utilizó como parámetro de referencia pulpa de fresa fresca en la medición de color de la pulpa de fresa comercial. A partir de los datos reportados por el colormate (L^* , luminosidad; a^* , saturación que define el componente rojo-verde; b^* , ángulo de tono que define el componente amarillo-azul), se calcularon los valores de ΔE^* y con los valores de X, Y, Z se procedió al cálculo de las coordenadas de cromaticidad “x, y” para cada muestra. Se determinaron los valores del matiz (H^*) y el croma (C^*), los que proporcionan información sobre la longitud de onda predominante y la saturación del color, respectivamente). Los valores de los parámetros de color de la pulpa de fresa comercial se presentan en el Cuadro VI.4.

Cuadro VI.4 Valores de los parámetros de color de pulpa de fresa comercial con referencia a pulpa de fresa fresca

	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	H^*	C^*	x^*	y^*
PULPA DE FRESA COMERCIAL	3.31	-1.17	-4.33	-0.74	28.58	8.75	0.36	0.34

Como se puede observar en el Cuadro VII.4, la pulpa de fresa comercial presentó un cambio de color ΔE de 3.31 respecto a la pulpa de fresa fresca lo que indicó, de acuerdo con Francis y Clydesdale (1975) que se obscureció por el proceso de congelación. Con respecto a la luminosidad de la muestra, esta presenta un decremento con respecto a la pulpa de fresa fresca lo que indica una pérdida de luminosidad de 1.17 puntos confirmando el obscurecimiento de la pulpa debido al proceso de congelación al que fue sometido. Los valores de Δa^* y Δb^* según la Fig. II.2 del capítulo de antecedentes de este trabajo, indican un cambio en las tonalidades predominantes en la pulpa de fresa comercial respecto a la pulpa de fresa fresca, desplazándose

hacia el verde y el azul provocando un color rojo con tonalidades verde-azul que provocan un mayor oscurecimiento de la muestra.

Francis y Clydesdale (1975), indicaron que un ΔE^* de 2 puede ser un cambio de color notablemente diferente, mientras que un valor de 3 es inaceptable para muchos productos. El valor de ΔE^* de 3.31, para el caso de la pulpa de fresa comercial es una repercusión en el aspecto de la pulpa, ya que como se indicó anteriormente, el color cambió de un rojo-claro de la pulpa de fresa fresca a un verde-azul oscuro lo que puede ser debido a las melanoidinas producidas por la degradación furfural que provocan un oscurecimiento a la pulpa de fresa comercial.

VI. 2. Determinación de la temperatura de transición vítrea

La metodología que se utilizó en un principio para la determinación de la temperatura de transición vítrea (T_g) en la pulpa en polvo fue la reportada por Hennigs *et al*, (2001). Estos autores utilizan un intervalo de calentamiento de 0 a 50°C con una velocidad de 10 °C/min, posteriormente un enfriamiento hasta 0°C y finalmente un segundo calentamiento de 0 a 80 °C. Después de varias pruebas variando tanto el intervalo de temperatura como la velocidad de calentamiento, se llegó a establecer que el intervalo de temperatura a usarse sería de 15 a 80°C sin enfriamiento previo a 0°C a velocidades de calentamiento de 10, 5°C/min debido a que en el proceso de secado no se manejan temperaturas cercanas a 0°C. Los resultados de estos análisis se presentan en las Fig. VI.1 y VI.2.

En la Fig. VI.1 se observa que las muestras presentan inflexiones que corresponden a la transición de fase de segundo orden de algún componente de las muestras. Por lo tanto, la temperatura de transición vítrea (T_g) se identifica a los 42.77 °C para la muestra obtenida durante la primera alimentación (SP1) y a los 44.91 °C para la muestra de la cuarta alimentación (SP4). Al observarse en ambas muestras un comportamiento similar se decidió analizar solo una de las muestras, la obtenida en el primer pulso (SP1).

En la Fig. VI.2 se observa la zona de transición obtenida en el termograma correspondiente a la muestra de polvo de fresa obtenido para la primera alimentación (SP1) a una velocidad de calentamiento de 5°C/min. Se identifican inflexiones que indican la transición de algún componente a la temperatura de 44.67°C muy semejante a las determinadas anteriormente. Esto

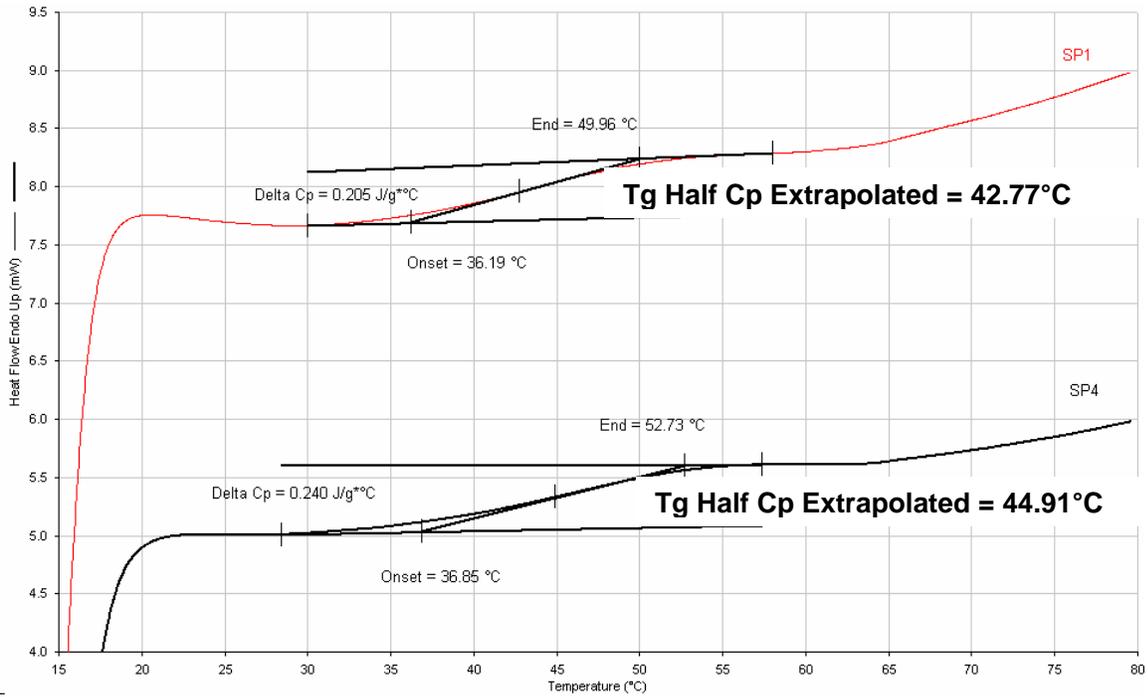


Fig. VI.1 Termograma obtenido para las muestras de polvo obtenido durante la primera (SP1) y cuarta (SP4) alimentación del secado de pulpa de fresa en spouted bed con un intervalo de calentamiento de 15-80°C y a una velocidad de 10°C/min

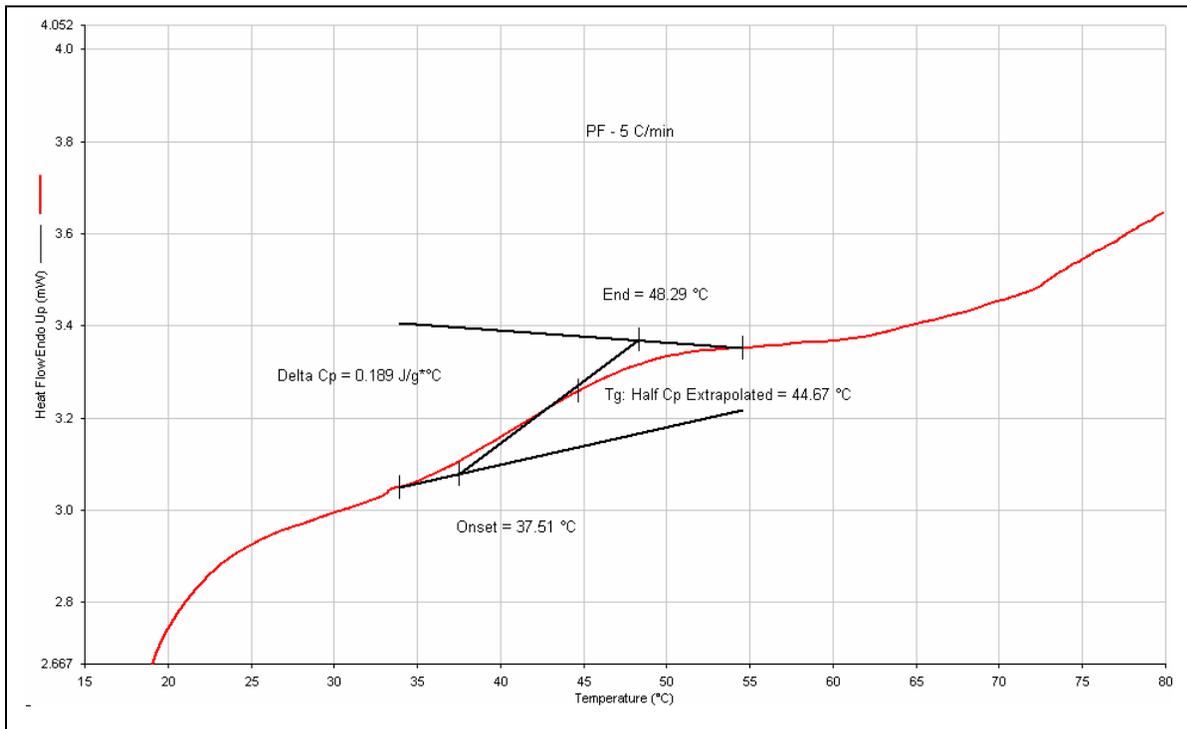


Fig. VI.2 Termograma obtenido para las muestras de polvo de pulpa de fresa en spouted bed con un intervalo de calentamiento de 15-80°C y a una velocidad de calentamiento de 5°C/min

concuerta con lo mencionado por Ozmen *et al*, (2002) quienes utilizaron velocidades de calentamiento de 10, 5 y 2°C/min para determinar la temperatura de transición vítrea de leche en polvo, encontrando que las velocidades de calentamiento óptimas para la obtención de termogramas que muestren claramente la transición de los componentes de la muestra en el caso de alimentos con un alto contenido de azúcares en polvo son de 10 y 5 °C/min.

Para establecer las condiciones finales de operación del secado por pulsos de pulpa de fresa se decidió que la temperatura de transición vítrea del polvo de fresa fuera una media de las temperaturas encontradas en los termogramas obtenidos con una velocidad de calentamiento de 10 que fueron los mas estables (Fig. VI.1) siendo establecida como 43°C.

VI.3. DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RECUPERACIÓN DEL LECHO

Como se indicó en pruebas preliminares, el tiempo de recuperación del lecho se determinó para cada temperatura y flujo de alimentación, obteniendo los resultados promedio indicados en el Cuadro VI.5.

Cuadro VI.5 Tiempo de recuperación del lecho para las diferentes condiciones de secado por pulsos para la pulpa de fresa

VARIABLES (T_i , F)*	TIEMPO DE RECUPERACIÓN DEL LECHO (min.)
60°C x 5 mL/min	12.8
60°C x 10 mL/min	12.5
70°C x 5 mL/min	9.9
70°C x 10 mL/ min	10.3

* T_i = temperatura de entrada del aire de secado

F= velocidad de alimentación

Debido a que los diferentes tiempos de recuperación del lecho en cada una de las condiciones son semejantes entre sí y considerando la gran cantidad de variables involucradas que se tenían, se decidió mantener este parámetro constante en cada una de las condiciones definitivas de secado. Para las pruebas de secado realizadas a 60°C se tomó un tiempo de recuperación del lecho de 13 minutos y a 70°C un tiempo de 10 minutos. Los tiempos finales de recuperación del lecho utilizados en cada una de las condiciones definitivas se presentan en el Cuadro VI.6. Estos tiempos se fijaron para cada temperatura antes de cada tiempo de secado.

Cuadro VI.6. Tiempo de recuperación del lecho para las diferentes condiciones de secado por pulsos para la pulpa de fresa

CONDICIONES DE SECADO	TIEMPO DE RECUPERACIÓN DEL LECHO (min.)
Para $T_i=T_a=60^{\circ}\text{C}$	13
Para $T_i=T_a=70^{\circ}\text{C}$	10

T_i = temperatura de entrada del aire de secado por el canal central

T_a = temperatura de entrada del aire de secado por el ánulo

VI.4. PARAMETROS DE RESPUESTA DEL SECADOR.

Las pruebas de secado se realizaron en las condiciones indicadas en el Cuadro V.3 de la sección de pruebas preliminares. En todas las pruebas de secado de la pulpa de fresa, se recolectó polvo seco de color y aroma característicos de fresa. La adherencia al recolector y al ciclón se presentó en diferente grado hacia al final de cada corrida como consecuencia de la termoplasticidad dependiendo de la temperatura de secado y de la velocidad de alimentación, sin embargo ésta disminuyó considerablemente con relación a las pruebas preliminares. El diferente grado de adherencia a la cámara de secado dio como resultado diferentes eficiencias de recuperación, la cual fue una de las variables de respuesta evaluada.

Para facilitar la presentación de datos en las figuras que se presentan a continuación, se asignó una nomenclatura para cada corrida de secado que incluye las condiciones de operación en las que fue realizada, de la forma: Temperatura de secado x Tiempo de secado x Velocidad de alimentación. Por ejemplo, la clave 70x15x5 indica 70°C de temperatura de secado, 15 minutos de tiempo de secado y 5 mL de pulpa de fresa alimentada por minuto.

VI.4.1. HUMEDAD REMANENTE EN EL LECHO

El resultado de esta determinación para todas las pruebas de secado con ambas temperaturas, a cualquier velocidad de alimentación y para cualquier tiempo de secado nunca fue mayor al **0.1% de humedad**. Al ser tan pequeño este valor, no se consideró para la evaluación del efecto de las variables de respuesta del secador.

VI.4.2. CANTIDAD DE PRODUCTO SECO RETENIDO SOBRE EL LECHO DE INERTES

El diseño factorial incluyendo las réplicas de las pruebas de secado realizadas durante esta investigación se presenta en el Cuadro VI.7. La cantidad de producto seco adherido a los sólidos inertes obtenido al final de cada pulso de alimentación para las temperaturas de secado de 60 y 70°C y cada una de las condiciones utilizadas en este trabajo junto con los límites de confianza al 95% se presentan en el Cuadro VI.8.

Cuadro VI. 7 Diseño factorial de las pruebas de secado realizadas en esta investigación

Orden de realización de la prueba	No. de Prueba	Temperatura de secado (Ti) +1= 70°C -1= 60°C	Tiempo de secado (Θ) +1= 25 min -1= 15 min	Velocidad de alimentación (F) +1 = 10 mL/min -1 = 5 mL/min
11	1	-1	+1	-1
12	2	+1	+1	+1
1	3	-1	-1	+1
5	4	-1	-1	+1
7	5	-1	+1	-1
10	6	+1	-1	-1
3	7	-1	+1	-1
6	8	+1	-1	-1
4	9	+1	+1	+1
8	10	+1	+1	+1
2	11	+1	-1	-1
9	12	-1	-1	+1

Como puede apreciarse en la Fig. VI.4, la cantidad de sólido de fresa adheridos a los sólidos inertes, se incrementa conforme prosiguen los pulsos de alimentación llegando a valores de 0.4 g de producto/100 g de sólido inerte en el cuarto pulso para ambas temperaturas de secado y velocidades de alimentación para un tiempo de secado de 15 min. El aumento en el tiempo de secado a 20 min tiene un efecto considerable en este parámetro, pues si bien sigue la misma tendencia de aumento conforme prosiguen los pulsos de alimentación, la cantidad adherida por pulso es considerablemente menor, alcanzando valores de 0.30 g de producto/100 g de sólidos inertes para cualquier temperatura y velocidad de alimentación en el cuarto pulso de alimentación. La cantidad tan alta del producto adherido a los inertes al final del cuarto pulso de alimentación (65.36% de retención del polvo de fresa en los sólidos inertes del lecho) concuerda con lo

mencionado por Medeiros *et al.*, (2002) quienes obtienen un 66% de retención del polvo de mango en los sólidos inertes durante el proceso de secado. Este comportamiento es observado en las pulpas de frutas y se debe principalmente a la alta pegajosidad de los polvos, lo cual esta relacionado con la presencia de un alto contenido de azúcares en este tipo de alimentos y a que la temperatura de secado sobrepasa el punto de pegajosidad.

Cuadro VI. 8 Cantidad de producto seco retenido en el lecho de sólidos inertes (g producto/ 100 g inerte) en las diferentes condiciones de secado

CONDICIONES DE SECADO (Ø x F)	1^{er} PULSO DE ALIMENTACIÓN	
	70 °C	60°C
15 X 5	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.04
15 X 10	0.13 ± 0.03	0.15 ± 0.02
25 X 5	0.09 ± 0.01	0.05 ± 0.02
25 X 10	0.08 ± 0.03	0.10 ± 0.03
	2^{do} PULSO DE ALIMENTACIÓN	
	70 °C	60°C
15 X 5	0.25 ± 0.03	0.20 ± 0.04
15 X 10	0.22 ± 0.02	0.25 ± 0.03
25 X 5	0.17 ± 0.03	0.12 ± 0.04
25 X 10	0.20 ± 0.03	0.16 ± 0.03
	3^{er} PULSO DE ALIMENTACIÓN	
	70 °C	60°C
15 X 5	0.36 ± 0.02	0.32 ± 0.02
15 X 10	0.37 ± 0.04	0.33 ± 0.02
25 X 5	0.26 ± 0.02	0.24 ± 0.03
25 X 10	0.23 ± 0.03	0.23 ± 0.03
	4^o PULSO DE ALIMENTACIÓN	
	70 °C	60°C
15 X 5	0.41 ± 0.02	0.37 ± 0.04
15 X 10	0.42 ± 0.05	0.39 ± 0.03
25 X 5	0.31 ± 0.02	0.31 ± 0.04
25 X 10	0.30 ± 0.01	0.26 ± 0.03

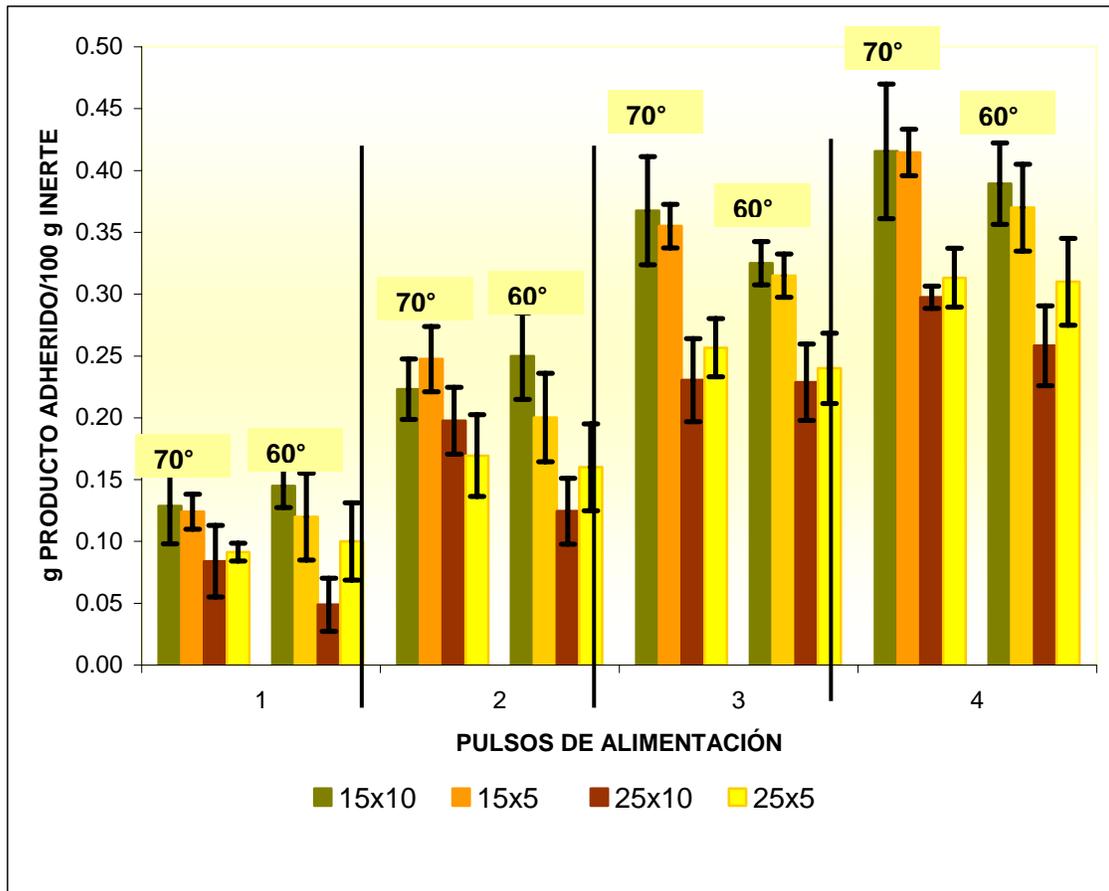


Fig. VI. 4. Cantidad de producto seco retenido en el lecho de sólidos inertes a las diferentes condiciones de secado

En general, la Fig. VI.4 muestra que prácticamente no hay diferencia en la cantidad de sólidos adheridos respecto a la temperatura de secado independientemente de la velocidad de alimentación para cada pulso de alimentación; pero el tiempo de secado sí afecta marcadamente, disminuyendo los sólidos adheridos a cualquiera de las dos velocidades de alimentación.

Ruiz (2002) menciona que durante la alimentación continua de diferentes soluciones de maltodextrina al secador de lecho por fuente fluidizado, utilizado en esta investigación, pero con un lecho de partículas de polipropileno, se presentó un fenómeno de adhesión del producto a la superficie de los sólidos inertes sobre todo al principio del proceso de secado, llegando a un valor límite que depende de las condiciones de operación, el cual tiende a hacerse despreciable respecto a la cantidad de producto obtenido en largos tiempos de operación. Resulta entonces que la cantidad de polvo retenido en la superficie de las partículas del lecho está en función no solamente de la velocidad de aire de la fuente utilizada, sino también del volumen de solución alimentada en el secador y de su concentración y que es un fenómeno inherente al uso de sólidos inertes, pues aún la maltodextrina que no presenta pegajosidad y es utilizada como ayuda de

secado para reducir la pegajosidad de jugos y pulpas, se adhiere en cierta cantidad a los sólidos inertes hasta alcanzar un valor de equilibrio que depende de las condiciones de secado.

Con el fin de analizar si el comportamiento anterior también se presenta bajo un esquema de alimentación por pulsos, se realizó la determinación del polvo adherido en función del número de pulsos de alimentación, aumentando éstos a 10 pulsos, utilizando como alimentación tanto la pulpa de fresa comercial como una solución de maltodextrina con la misma concentración de sólidos que la pulpa de fresa (15%). Con base en los resultados presentados anteriormente se observó que las pruebas de secado realizadas a 60°C eran las que brindaban más estabilidad a la fuente por lo que se planteo el utilizar esta temperatura para estas determinaciones y evitar en lo posible el colapso de la fuente. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. VI.5 y Fig. VI.6 para un tiempo de secado de 15 y 25 min respectivamente.

A pesar de utilizar la temperatura de 60°C, con la cual se había logrado mantener un proceso de secado más estable, en las determinaciones de adhesión del polvo a los sólidos inertes con pulpa de fresa, solo se pudieron realizar 6 alimentaciones de las 10 originalmente planeadas debido al colapso de la fuente, independientemente del tiempo de secado como puede apreciarse en las Fig. VI. 5 y VI.6.

Las Fig. VI. 5 y VI.6, muestran que hasta la cuarta alimentación la cantidad de pulpa de fresa adherida a los sólidos inertes era tan solo un poco mayor que la maltodextrina, pero que debido a la pegajosidad de la pulpa en el quinto pulso de alimentación, la cantidad de producto adherido subió abruptamente hasta 0.76 g de pulpa adherida/100 g de inertes pudiendo tan solo soportar una alimentación más, ya que los sólidos se hicieron tan pegajosos entre sí que provocaron el colapso de la fuente. El aumento del tiempo de secado a 25 min, permitió mayor liberación del producto adherido, sin embargo el comportamiento fue similar al obtenido a 15 min de tiempo de secado, alcanzando un valor de 0.74 g de pulpa de fresa adherida/100 g de inertes en el quinto pulso de alimentación colapsándose la fuente en el sexto pulso de alimentación.

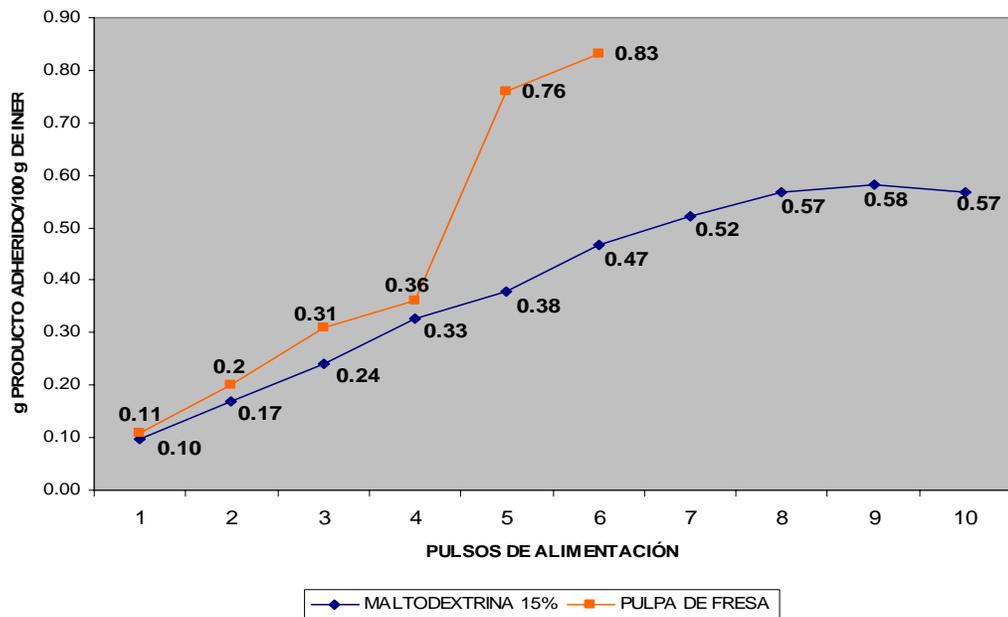


Fig. VI. 5 Cantidad de producto seco retenido en el lecho de sólidos inertes a 60°C, con una velocidad de alimentación de 5 mL/min y un tiempo de secado de 15 min

Como puede observarse en las Fig. VI.5 y VI.6 la maltodextrina también presentó adhesión del producto en polvo sobre los sólidos inertes del secador conforme avanzan las alimentaciones alcanzando valores de 0.50-0.59 g de maltodextrina/100 g de inertes.

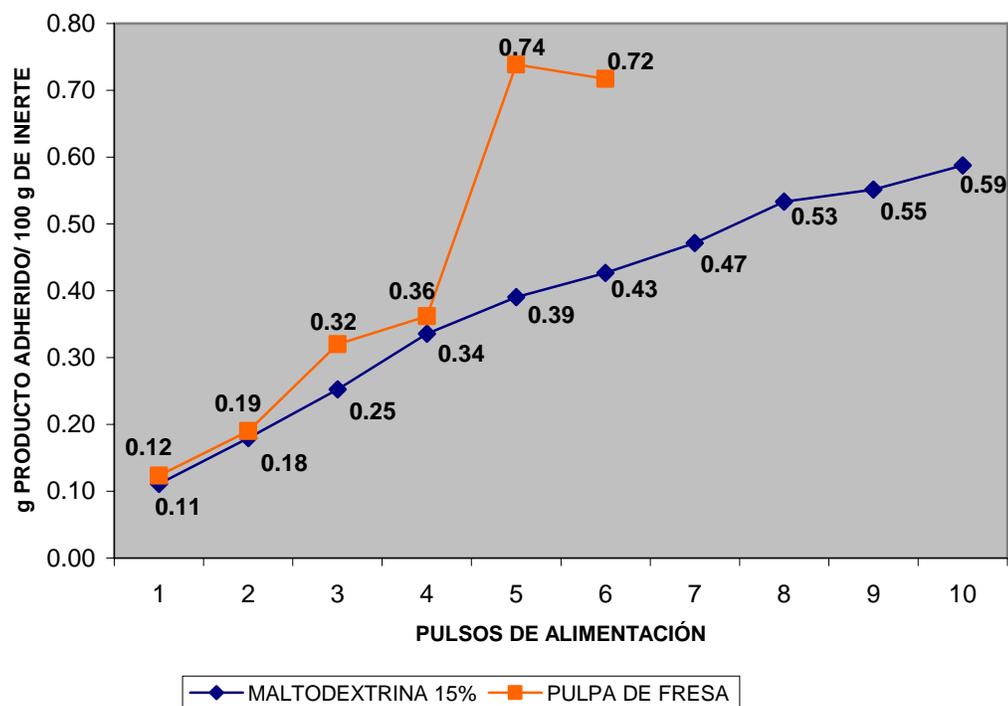


Fig. VI. 6 Cantidad de producto seco retenido en el lecho de sólidos inertes a 60°C, con una velocidad de alimentación de 5 mL/min y un tiempo de secado de 25 min

Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Ruiz (2002) para un lecho de polipropileno y diferentes soluciones de maltodextrina alimentadas bajo un régimen continuo. Sin embargo, las cantidades de polvo retenido en los sólidos en un proceso con alimentación continua y largos tiempos de secado llega a hacerse despreciable respecto a la cantidad de producto obtenido lo que no se observa en régimen de alimentación intermitente después de 10 pulsos de alimentación provocando que la cantidad que es retenida sobre los inertes, de manera inherente al funcionamiento del secador, afecta ampliamente al porcentaje de recuperación del producto. Con base en estos resultados se puede establecer que debido al régimen de alimentación de la pulpa de fresa siempre existirá una adhesión a los sólidos inertes debida al funcionamiento y las características propias del secador. Sin embargo debido a que a 60°C aún se presenta una alta pegajosidad después del cuarto pulso de alimentación, esta cantidad de polvo adherido provoca que los sólidos inertes se aglutinen y se colapse la fuente deteniendo la operación de secado. De aquí puede inferirse que 60°C esta aún por arriba del punto de pegajosidad.

VI.4.3. EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DEL PRODUCTO

Las eficiencias de recuperación del producto para cada una de las pruebas de secado se muestran en la Fig. VI.7, en donde se puede apreciar que conforme la temperatura de secado disminuye, la eficiencia de recuperación aumenta, lo cual puede ser debido a que la temperatura de 70°C se encuentra muy por arriba de la temperatura de pegajosidad (53°C-63°C), lo que ocasiona que gran cantidad de producto se adhiera a los sólidos inertes dando como consecuencia una baja eficiencia de recuperación como lo muestra la Fig. VI.7. A la temperatura de 60°C la eficiencia de recuperación es considerablemente mayor que a 70°C para cualquier tiempo de secado y velocidad de alimentación utilizada. Esto puede ser debido a que la temperatura de 60°C se encuentra cercana pero aún por arriba de la temperatura de pegajosidad, la cual muy probablemente esta más próxima a 53°C que a 63°C (intervalo de pegajosidad antes mencionado).

Lo anterior coincide con lo reportado por Lopes *et al*, (2006) quienes mencionan que para incrementar la eficiencia de recuperación del producto durante el secado de pulpa de mango en un secador de lecho por fuente fluidizado, es necesario una distribución más homogénea de la película de la pulpa sobre los sólidos inertes acompañado de bajas temperaturas de proceso lo que facilita el desprendimiento del producto. Estos parámetros están relacionados con temperaturas

de secado por debajo del punto de pegajosidad, bajas velocidades de alimentación y altas velocidades de aire tanto en la zona anular como la del “spout”.

En lo que respecta a la velocidad de alimentación, se puede apreciar en la Fig. VI.7 que ninguna de las utilizadas en el proceso de secado parece tener influencia en la eficiencia de recuperación del producto. Esto puede deberse a que a pesar de que se disminuyó la velocidad de alimentación en ambas temperaturas de secado, la adhesión del producto a los sólidos inertes del lecho no presentó una disminución mayor. El tiempo de secado de 25 min tampoco tuvo influencia en la eficiencia de recuperación del producto.

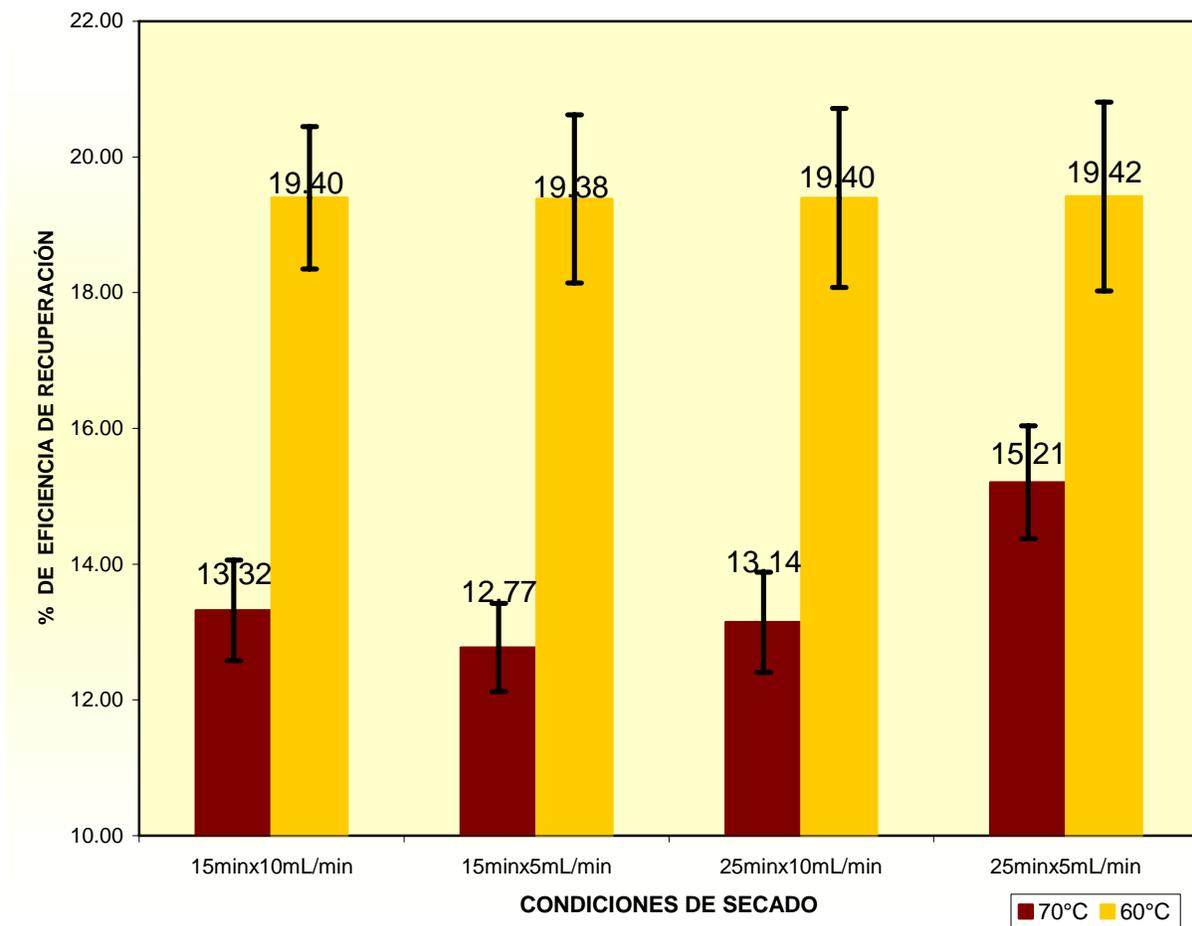


Fig. VI. 7. Eficiencia de recuperación de polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado

VI.5. PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL PRODUCTO

Además de la cuantificación de los parámetros de respuesta del secador, se evaluaron diversos parámetros de respuesta del producto para analizar el grado de termodegradación sufrido por el

polvo de fresa. Los polvos obtenidos durante las diferentes etapas de secado fueron mezclados y reconstituidos para obtener una cantidad suficiente para poder analizar los parámetros que se mencionan en la metodología. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

VI.5.1. HUMEDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO

Los resultados correspondientes a la humedad del producto recuperado de cada una de las corridas experimentales se presentan en la Fig. V.I.8, en donde se observa que el contenido de humedad del producto no varía con ninguna de las variables estudiadas tomando un valor de 2.4-2.8%.

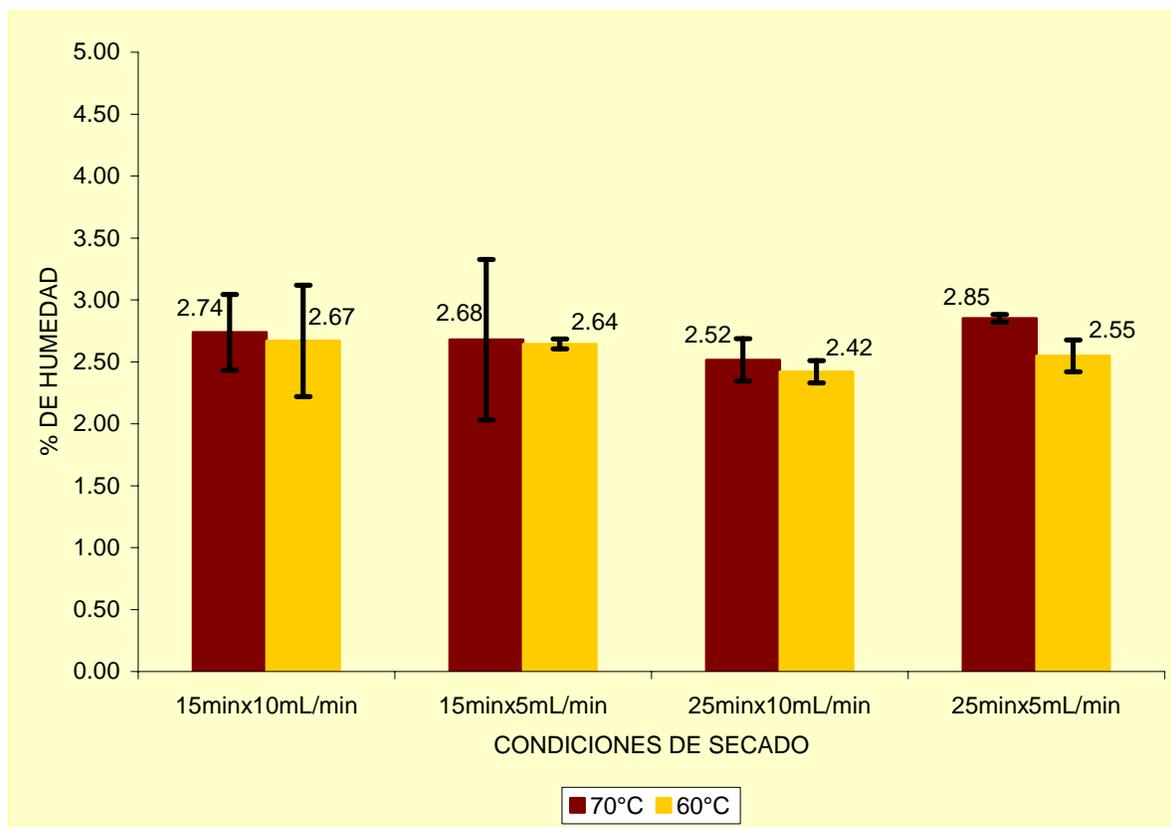


Fig. VI. 8 Humedad del polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado

La humedad del producto está dentro de lo reportado por otros autores para jugos y pulpas de frutas. Young *et al*, (2007) obtuvieron polvo de sandía mediante secado por aspersión y reportan un contenido de humedad de 2.78% para el producto obtenido a 145°C y 94.7°C (temperatura de entrada y salida respectivamente) con una adición de 3% de maltodextrina. Abadio *et al*, (2004) reportan un 1.18% de humedad para polvo de piña obtenido a través de secado por aspersión con adición de maltodextrina del 10%, a temperaturas de entrada y salida de 190 y 90°C respectivamente. Ambas investigaciones concluyen que el contenido de humedad del producto es

afectado por la adición de maltodextrina, ya que ésta reduce la pegajosidad del polvo pero altera algunas de sus propiedades como pH, humedad y color. Ambos autores reportan que si el contenido de humedad disminuye, el tiempo de reconstitución se incrementa (Young *et al.*, 2007). Este comportamiento afecta directamente las propiedades finales del producto. Lopes *et al.*, (2006) encontraron que el contenido de humedad del polvo de mango obtenido bajo un esquema de alimentación intermitente similar al utilizado en este trabajo varía entre 0.5 y 2.9%. La evaluación de la influencia de las variables de proceso mostró que solamente la temperatura utilizada en el proceso ejerce un efecto negativo significativo en el contenido de humedad del polvo de mango, debido principalmente al aumento de la transferencia de calor y consecuentemente al transporte de masa. Es importante mencionar que en el presente trabajo, la pulpa de fresa se ha logrado secar sin la adición de ningún aditivo a diferencia de las metodologías propuestas por los autores citados anteriormente.

VI.5.2. PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE ÁCIDO ASCÓRBICO

El grado de termodegradación fue medido mediante el porcentaje de retención del ácido ascórbico y del porcentaje de retención de fenoles totales presentes en el polvo de fresa respecto a la pulpa de fresa comercial utilizada como materia prima. A continuación se presentan los resultados obtenidos con respecto al porcentaje de retención de ácido ascórbico (Fig.VI.9).

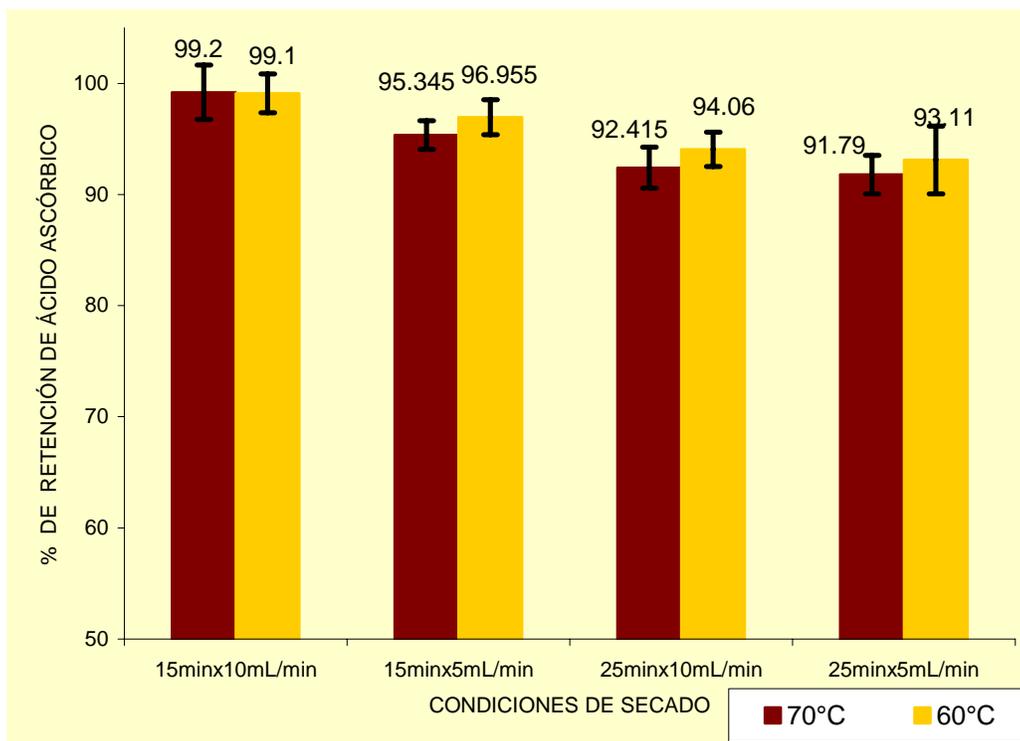


Fig. VI. 9 Retención de ácido ascórbico en el polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado

Puede observarse en la Fig.VI.9 que el porcentaje de retención de ácido ascórbico presentado por el polvo de fresa obtenido con una temperatura de secado de 70°C decreta ligeramente con respecto al obtenido a 60°C en cualquier condición de secado, sin embargo, esta disminución no es significativa entre las temperaturas de secado. La pérdida de vitamina C que presenta el polvo de fresa se debe principalmente a la oxidación del ácido ascórbico a ácido dehidroascórbico (Badui, 1996), ya que, durante el proceso de secado el polvo de fresa está en contacto con el aire de secado provocando esta pérdida. Estos resultados pueden observarse en la Fig. VI.9 ya que al incrementar el tiempo de secado a 25 min. para ambas temperaturas de secado, el porcentaje de retención de ácido ascórbico disminuye debido principalmente a la mayor exposición del polvo con el aire de secado.

Young *et al*, (2007) mencionan que a pesar de que los polvos de frutas presentan una pérdida en sus componentes nutrimentales, ésta pérdida no es significativa debido a la aglomeración que presentan este tipo de alimentos. La aglomeración disminuye la exposición de los polvos con el oxígeno del aire y por lo tanto protegen a los nutrimentos de su destrucción por oxidación.

Ramírez (2006) menciona en su trabajo realizado con un alimento modelo en secado con alimentación continua a temperaturas de 120, 130 y 140°C, que el ácido ascórbico no sufre termodegradación (llega a obtener hasta 100% de retención) siendo el tiempo de residencia del producto en el secador de 8 minutos; sin embargo, en el caso del presente trabajo, debido a la pegajosidad del producto este permanece adherido mucho más tiempo por lo que la degradación del ácido ascórbico es mayor, lo cual es más evidente al tiempo de secado de 25 min.

VI.5.3. PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE FENOLES TOTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos con respecto al porcentaje de retención de fenoles totales (Fig.VI.10).

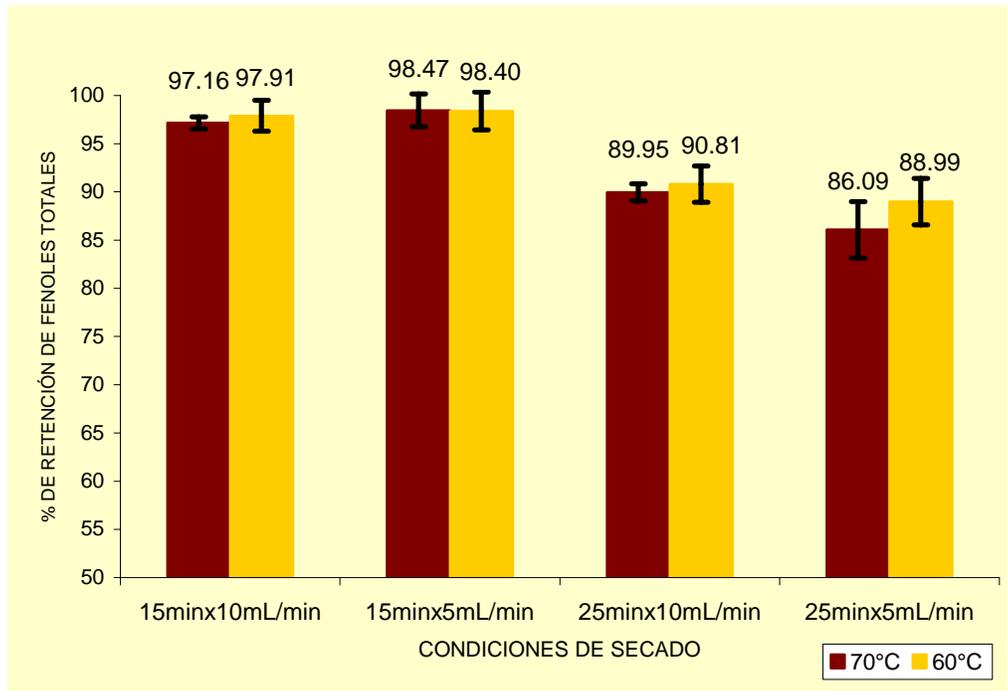


Fig. VI. 10 Retención de fenoles totales en el polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado

Se puede observar en la Fig.VI.10 que la velocidad de alimentación (5 y 10 mL/min) no afecta directamente el contenido de fenoles totales en el producto obtenido, sin embargo, el parámetro que modifica este porcentaje de retención es el tiempo de secado, ya que, al permanecer el polvo de fresa más tiempo en contacto con el aire de secado, esto provoca una pérdida mayor (10-14%) del contenido de fenoles totales presentes originalmente en la muestra indicando mayor termodegradación.

Estos resultados concuerdan con lo mencionado por Asami *et al*, (2003) quienes realizaron una cuantificación del contenido de fenoles totales y de ácido ascórbico en fresa liofilizada y deshidratada mediante un secado convencional, obteniendo un 15.6 y 21.1% de pérdida de fenoles respectivamente en la fresa deshidratada. Esto se debe principalmente a que las muestras fueron sometidas a la temperatura de -45°C durante la liofilización y al tiempo del secado convencional de 88 h. Estas exposiciones tan drásticas afectaron el porcentaje de retención de fenoles totales.

VI.5.4. DETERMINACIÓN DE COLOR DEL PRODUCTO OBTENIDO

Para la determinación de la diferencia de color que presentan las muestras de las pruebas de secado con respecto a la pulpa comercial, se realizó la reconstitución del polvo de fresa hasta

obtener una pulpa de características similares a la original. Los resultados se muestran en la Cuadro VI.9.

Debido a la disminución que presenta la luminosidad (ΔL^*) del polvo de fresa con respecto a la pulpa de fresa comercial utilizada como referencia, se puede afirmar que el color de la pulpa de fresa congelada se oscurece durante el secado, ya que fue encontrado que las variaciones de Δa^* y Δb^* presentados por las muestras disminuyeron provocando un cambio total de color. La disminución de valores de a^* con respecto a la referencia denota una tendencia del color rojo original a un tono verde de la pulpa reconstituida mientras que la disminución de los valores de b^* denotan una disminución del amarillo de la referencia hacia un tono azul de la pulpa reconstituida comparado con el tono original de la pulpa de fresa comercial. El incremento de ΔE confirma el cambio de la intensidad de color que presentaron las muestras. Francis y Clydesdale (1975) indicaron que un ΔE^* de 2 puede ser un cambio de color notablemente diferente, mientras que un valor de 3 es inaceptable para muchos productos. Sin embargo, un valor de ΔE^* mayor de 5, no necesariamente tiene una repercusión negativa en el aspecto del puré, ya que como se indicó anteriormente, el color cambió hacia de tono rojo-brillante ha un color rojo con tonalidades verde-azul oscuro más intenso. Lo mismo se observó en la pulpa comercial respecto a la fresa fresca utilizada como materia prima lo que no necesariamente podría ser perjudicial para el producto.

Young *et al*, (2007) encontraron al evaluar el color del polvo de sandía, que cuando la temperatura de entrada al secador por aspersion se incrementa, los valores de a^* y b^* disminuyen contribuyendo así, a los incrementos en el matiz (H^*) y el croma (C^*) del producto. Lo que concuerda con lo encontrado en el polvo de fresa a 60 y 70°C. Con respecto a la luminosidad (ΔL^*) del polvo de sandía, esta disminuyó conforme la temperatura de entrada se incrementó lo que implicó que el color del polvo se oscureció con respecto al jugo de sandía original. Este comportamiento puede deberse a los azúcares presentes en el jugo, los que contribuyen al oscurecimiento del polvo conforme la temperatura de entrada se incrementa. Esto sucedió con el polvo de fresa, ya que al tenerse temperaturas de secado tan bajas los azúcares no fueron modificados drásticamente.

Con respecto al croma (C^*), el polvo de sandía presentó un incremento de 47.39 a 53.49°C, lo que ubica al producto en una región de cambio del rojo al amarillo, donde un croma igual a 0 corresponde a un rojo puro y un croma igual a 90 es amarillo. Esto significa que el jugo de sandía

en polvo mostró un decremento en el color rojo cuando la temperatura de entrada del secador se incrementó.

Cuadro VI.9. Valores de los parámetros de color de pulpa de fresa reconstituida obtenida en las etapas de secado con referencia a la pulpa de fresa comercial

	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	H^*	C^*	X^*	y^*
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (70x15x10)	5.91	-4.50	-3.77	-0.71	46.31	10.07	10.2	8.56
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (70x15x5)	6.34	-4.57	-4.24	-1.17	40.73	8.46	9.67	9.39
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (70x25x10)	5.29	-4.06	-3.13	-1.30	35.53	8.66	10.53	9.80
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (70x25x5)	5.70	-4.51	-3.28	-1.19	35.11	10.19	10.25	9.56
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (60x15x10)	5.69	-4.37	-3.34	-1.47	33.99	9.98	10.32	9.63
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (60x15x5)	6.41	-4.39	-4.46	-1.38	38.44	9.10	10.17	9.62
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (60x25x10)	5.90	-4.30	-3.82	-1.32	36.18	9.65	10.30	9.67
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (60x25x5)	5.79	-4.50	-3.80	-1.38	35.96	9.64	10.19	9.56

Con respecto a los diferentes polvos de fresa obtenidos, estas presentaron un incremento en el matiz desde 28.58 de la pulpa de fresa comercial hasta de un 46.31 de la pulpa reconstituida, contrario a lo que sucede en polvo de sandía mencionado anteriormente. Esto indica que el color del polvo de fresa presenta un incremento en el matiz del color del producto.

Estos resultados pueden deberse a las bajas temperaturas de operación, ya que al presentar el polvo de fresa un mayor porcentaje de retención de fenoles de hasta 99.2% según la Fig. VI.10 se ve favorecida la retención de color, por lo contrario en el trabajo de Young *et al.*, (2007) las altas temperaturas de entrada y salida del secado por aspersión provocan pérdidas de licopeno y β -carotenos presentes en el jugo de sandía de hasta un 24.06 y 27.08% respectivamente. Estos nutrientes son los responsables directos del color de los alimentos, por lo que su retención durante los procesos de conservación es un parámetro de calidad en la industria alimentaria.

VI.6. PRUEBAS DE SECADO ADICIONALES A 50°C

Con base a los resultados obtenidos a 60 y 70°C, se observó que no existe una reducción significativa en la adhesión del polvo de fresa a los sólidos inertes del lecho y a las paredes del secador aún en el proceso de secado a 60°C; lo cual puede deberse a que esta temperatura de secado se encuentra dentro o muy cerca del intervalo de pegajosidad que teóricamente estaría situada entre 53 y 63°C (basado en una T_g de 43°C). Sin embargo, esta temperatura (60°C) contribuye marcadamente al incremento de la eficiencia de recuperación de un promedio de 13% a 70°C a 19.4% a 60°C (Fig. VI.7). La velocidad de alimentación no tiene influencia en la eficiencia de recuperación del polvo de fresa como lo indican los resultados anteriormente presentados.

Dado que una de las metas de esta investigación era evaluar las condiciones de operación del secador por debajo del punto de pegajosidad, lo que no se logró, con el pulso de 30 g secando a 50°C, pues rebasaba la capacidad de evaporación del secador a esta temperatura (como se indicó en pruebas preliminares), se decidió realizar pruebas adicionales de secado a 50°C (temperatura por debajo del intervalo de pegajosidad) disminuyendo el pulso de alimentación a 15 g, lo que en teoría provocaría una disminución en la adhesión del polvo de fresa a los sólidos inertes y por lo tanto, un incremento en el porcentaje de recuperación del mismo.

En los resultados obtenidos a 60°C, previamente presentados se observó que el tiempo de secado contribuye directamente a la disminución del producto adherido a los sólidos inertes por lo que se decidió realizar pruebas de secado a 50°C con ambos tiempos de secado (15 y 25 min) y analizar el efecto de este parámetro sobre la cantidad de producto adherido a sólidos inertes y la eficiencia de recuperación a temperaturas por debajo de la temperatura de pegajosidad.

Con respecto a la velocidad de alimentación, los estudios previos establecieron que este parámetro no tenía influencia en la eficiencia de recuperación del producto por lo que se decidió realizar la alimentación con un flujo de 5 mL/min principalmente para evitar la saturación del lecho y tratar de evitar el colapso de la fuente. El tiempo de recuperación del lecho fue determinado para esta temperatura y flujo de alimentación, obteniendo en promedio un tiempo de 18 minutos, por lo que este tiempo fue anexado al tiempo de secado de 15 ó 25 min según fuera el caso.

VI.7. PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL SECADOR A 50°C CON PULSOS DE 15 g

Los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de secado realizadas a una temperatura de 50°C con pulsos de alimentación de 15 g con tiempo de secado de 15 y 25 min se presentan a continuación.

VI.7.1. HUMEDAD REMANENTE EN EL LECHO

Esta determinación se realizó para comprobar que el proceso de secado se estuviera realizando correctamente y no se saturara la capacidad evaporativa del secador. El resultado de esta determinación para todas las pruebas de secado nunca fue mayor al 0.13% de humedad, similar al encontrado en las pruebas realizadas a 60 y 70°C; lo que indicaba que el lote utilizado era apropiado para la temperatura de proceso de 50°C.

VI.7.2. CANTIDAD DE PRODUCTO SECO RETENIDO SOBRE EL LECHO DE INERTES

Los resultados obtenidos de la cantidad de producto adherido a los inertes para las diferentes pruebas de secado se presentan en la Fig. VI.11. En las pruebas de secado realizadas a 50°C se pudo observar que posterior a la cuarta alimentación las características del lecho (movimiento descendiente de las partículas inertes en la zona anular y en el spout) eran favorables para continuar con las alimentaciones, logrando llegar hasta 10 alimentaciones sin que el lecho se viera afectado o se presentara el colapso de la fuente.

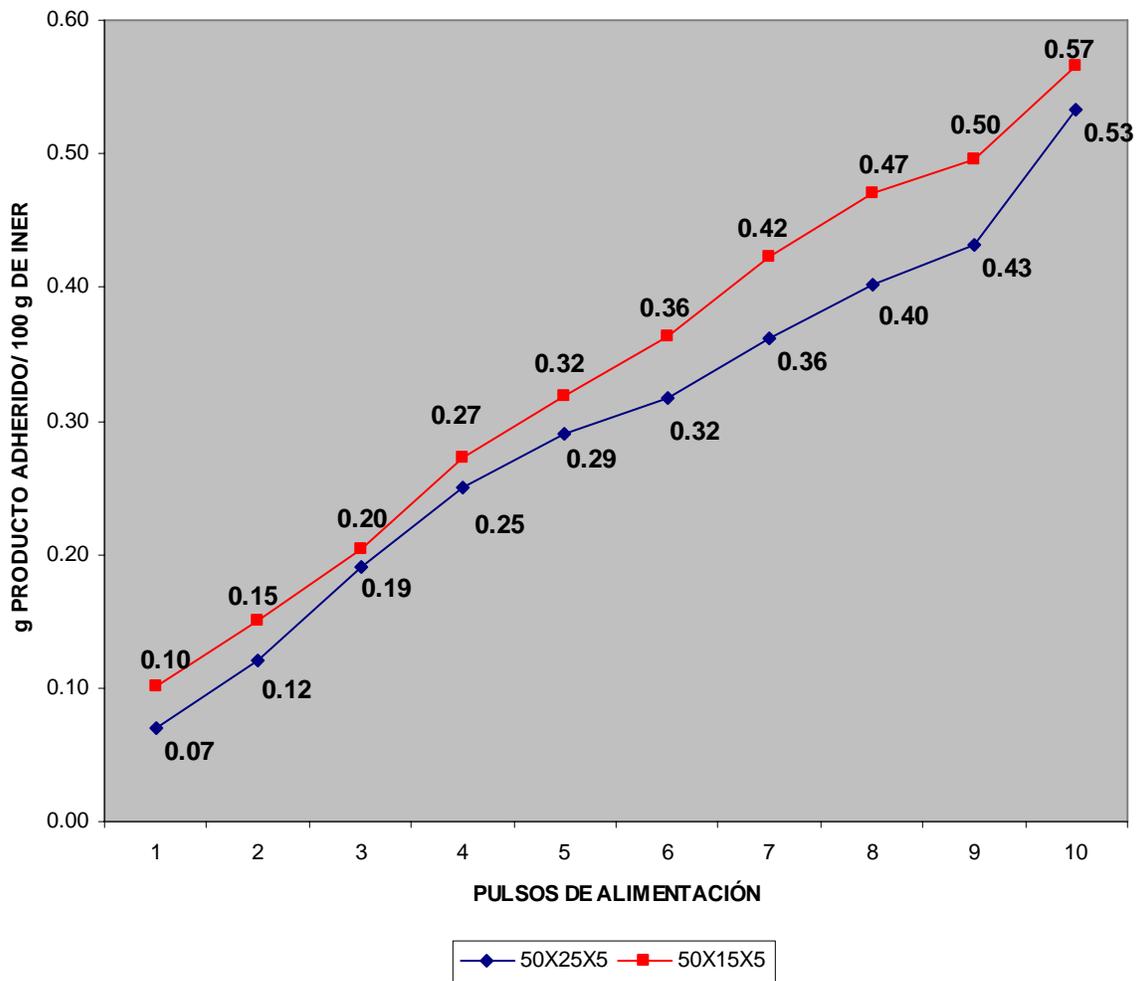


Fig.

VI. 11 Cantidad de producto seco retenido en el lecho de sólidos inertes a las diferentes condiciones de secado a 50°C

La Fig. VI.11 muestra que la cantidad de polvo de fresa adherido a los sólidos inertes durante el secado a 50°C a ambas condiciones presentan un proceso de acumulación del polvo conforme avanzan los pulsos de alimentación, sin embargo, esta adhesión se redujo considerablemente con respecto a la observada a 60°C; esto se debe tanto a la reducción del pulso de alimentación como a la disminución de la adhesión entre las partículas inertes en el lecho y a las paredes del secador lo que favoreció las colisiones entre las partículas, con el tubo central, contra la malla deflectora y las paredes del secador, facilitando entonces el desprendimiento del polvo de la superficie de las partículas. Este fenómeno favorece el aumento del número de alimentaciones y como se verá más adelante al incremento en el porcentaje de recuperación del polvo. El aumento en el tiempo de secado de 15 a 25 min favoreció el desprendimiento del producto de la superficie de los inertes

obteniéndose valores menores para cualquier pulso de alimentación y por lo tanto favoreciendo la estabilidad del proceso.

De lo anterior, se comprueba que a pesar de encontrarse el secado en una temperatura menor al intervalo de pegajosidad, los inertes del lecho retienen polvo sobre su superficie de manera inherente al funcionamiento del secador.

VI.7.3. EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DEL PRODUCTO.

Las eficiencias de recuperación del producto para cada una de las pruebas de secado a 50°C se muestran en la Fig. VI.12.

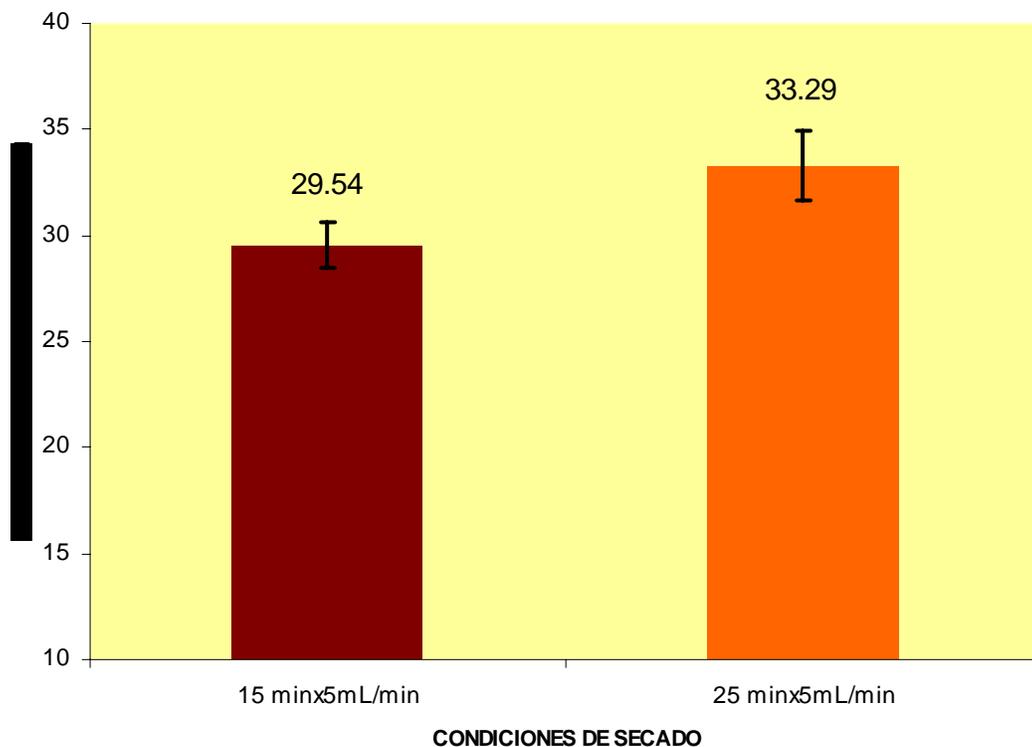


Fig. VI. 12 Eficiencia de recuperación de polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado a 50°C

En la Figura VI.12 puede observarse un incremento significativo en la eficiencia de recuperación del polvo de fresa con respecto al obtenido a 60°C (de 19.4% a 60°C a 33.29% a 50°C). Esto se debe a que la temperatura de proceso al encontrarse por debajo del punto de pegajosidad de la pulpa de fresa favorece el movimiento de los sólidos tanto en la zona anular como en la fuente, lo que promueve el desprendimiento del producto.

En la Figura VI.12 se observa que el tiempo de secado contribuye directamente al incremento en la eficiencia de recuperación del polvo a 50°C lo que no ocurría a 60°C. Esto debido a que al encontrarse por abajo del punto de pegajosidad, se evita la cohesión y la adhesión de los sólidos inertes del lecho en la zona anular favoreciendo la colisión entre las partículas contra el tubo central, las paredes del secador y la malla deflectora, lo que promueve el fácil desprendimiento del polvo de la superficie de las partículas.

VI.8. PARÁMETROS DE RESPUESTA DEL PRODUCTO

Los polvos obtenidos durante las diferentes etapas de secado a 50°C fueron mezclados y reconstituidos para analizar los parámetros de calidad similares a los realizados para el producto obtenido a 60 y 70°C. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

VI.8.1. HUMEDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO

El contenido de humedad del producto no varió con respecto a los obtenidos anteriormente (60 y 70°C) tomando un valor de 2.5-2.9%. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. VI.13.

La Fig. VI.13 muestra que el aumento en el tiempo de secado genera productos con menor humedad debido a que se tiene mayor tiempo entre cada pulso de alimentación. Los resultados obtenidos concuerdan con lo mencionado por Lopes *et al*, (2006) para el polvo de mango secado en spouted bed con alimentación intermitente, cuyo contenido de humedad varió desde 0.5 a 2.9%.

Estos resultados reflejan que la temperatura de 50°C no tiene una influencia negativa en el contenido de humedad del polvo, sino por el contrario, la movilidad de los sólidos tanto en el spout como en la zona anular favorecen la transferencia de calor y consecuentemente el transporte de masa brindando al producto un contenido de humedad similar al alcanzado a temperaturas mas altas.

VI.8.2. PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE ÁCIDO ASCÓRBICO

El grado de termodegradación fue analizado mediante el porcentaje de retención de ácido ascórbico, el porcentaje de retención de fenoles totales y el color presentes en el polvo de fresa al igual que los polvos obtenidos a 60 y 70°C. A continuación se presentan los resultados obtenidos para el porcentaje de retención de ácido ascórbico (Fig. VI.14).

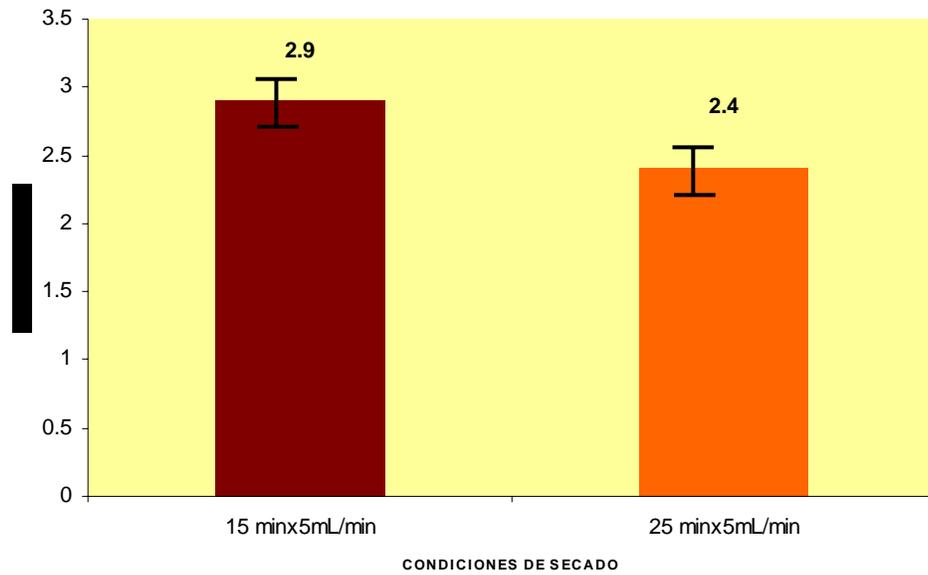


Fig. VI. 13 Porcentaje de humedad del polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado a 50°C

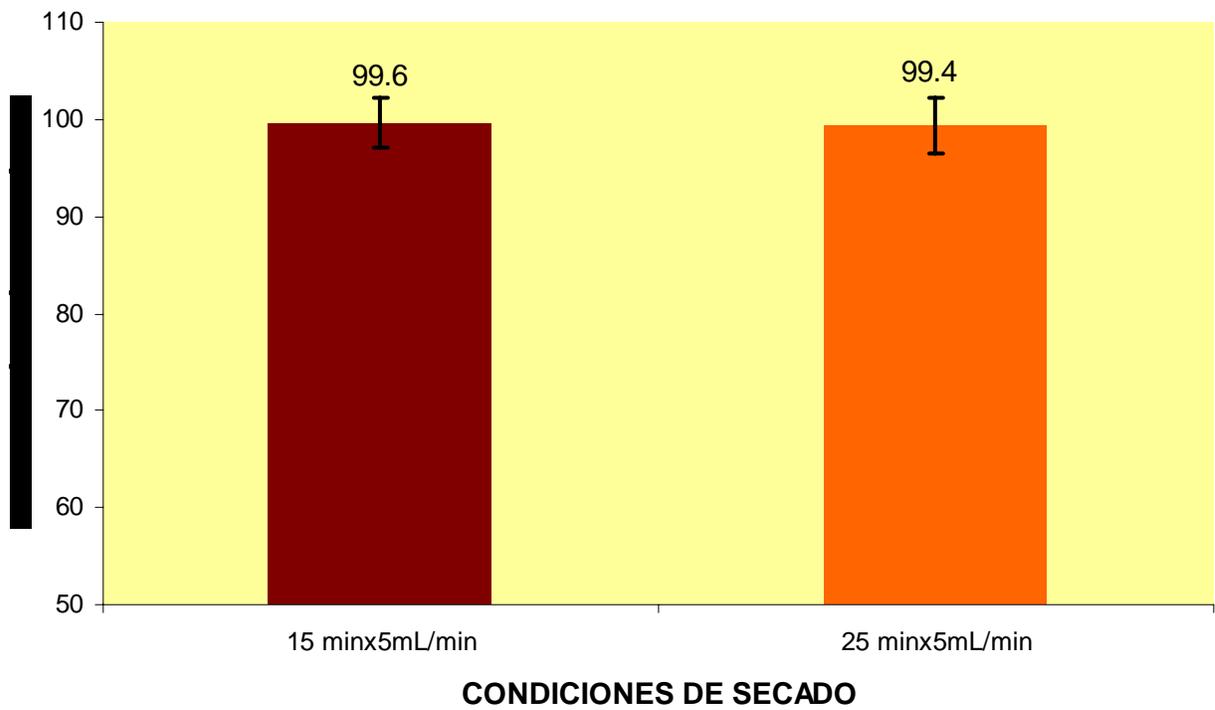


Fig. VI. 14 Retención de ácido ascórbico en el polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado a 50°C

Puede observarse en la Fig. VI.14 que el porcentaje de retención de ácido ascórbico presentado por el polvo de fresa no se ve afectado por la temperatura del proceso (50°C). Esto difiere con lo mencionado por Lopes *et al*, (2006) al trabajar con polvo de mango obtenido en spouted bed fluidizado con perlas de vidrio entre 55 y 75°C. Estos autores reportaron que las altas temperaturas usadas en el proceso de secado asociado con largos tiempos de procesamiento favorecieron la degradación del contenido de vitamina C presente en la materia prima. Denotaron que los tiempos de proceso mayores a 30 min brindan a la pulpa de mango una disminución del 35-37% en el contenido de vitamina C con respecto a la pulpa de mango fresca. Este fenómeno también se observó en el presente trabajo en el polvo de fresa obtenido a una temperatura de proceso de 60 y 70°C en el cual el porcentaje de retención de ácido ascórbico decrementa ligeramente con respecto al tiempo de secado, pero en el caso de 50°C la pérdida no es significativa. Como puede observarse en los resultados obtenidos, ya que a bajas temperaturas de secado, aun con los mayores tiempos de proceso a 50°C, conserva el 99% del contenido de esta vitamina en el polvo de fresa.

VI.8.3. PORCENTAJE DE RETENCIÓN DE FENOLES TOTALES

A continuación se presentan los resultados obtenidos con respecto al porcentaje de retención de fenoles totales en el polvo de fresa obtenido a 50°C (Fig. VI.15).

En la Fig.VI.15 se puede observar que prácticamente no existe pérdida de fenoles totales en el polvo de fresa obtenido a 50°C. Estos resultados se deben nuevamente a la baja temperatura de proceso utilizada, ya que se ha observado en otras investigaciones que la pérdida de componentes antioxidantes en pulpa de frutas es debida principalmente a las altas temperaturas utilizadas en los procesos de secado. Lopes *et al*, (2006) obtuvieron entre el 12 y el 30% de pérdida de β -caroteno en pulpa de mango procesada entre 55-75°C. Observaron que la mayor pérdida de β -caroteno ocurre principalmente en procesos realizados a una elevada temperatura y en tiempos largos. Young *et al*, (2007) reportaron pérdidas del 24.06% de licopeno y de 27.08% de β -caroteno en polvo de sandía obtenido en secado por aspersión con temperaturas de entrada de 145-175°C. Determinaron que el contenido de licopeno en el polvo de sandía decrementa conforme la temperatura de entrada del aire en el sacador se incrementa. Ambas pérdidas afectaron el color del

producto obtenido, sin embargo, el efecto de la pérdida de licopeno fue más predominante debido a su alta contribución al color característico de la sandía.

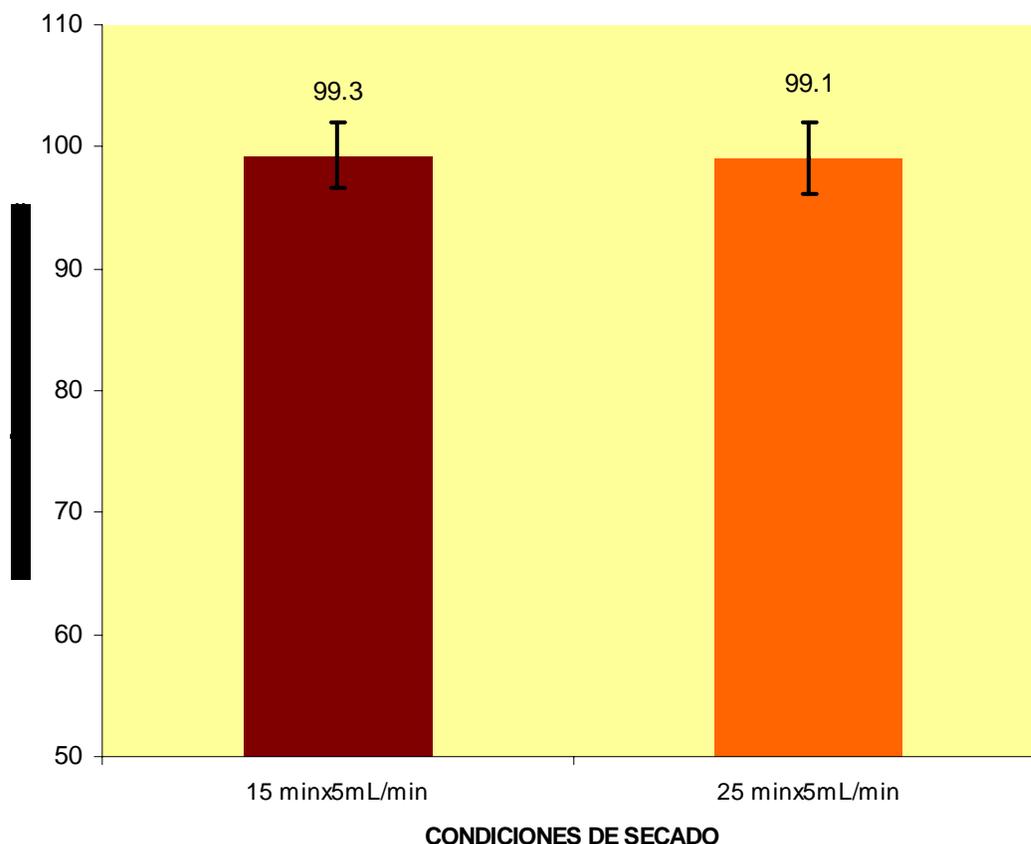


Fig. VI. 15 Retención de fenoles totales en el polvo de fresa obtenido en las diferentes condiciones de secado a 50°C

VI.8.4. DETERMINACIÓN DE COLOR DEL PRODUCTO OBTENIDO

La determinación de color se realizó bajo la misma metodología utilizada para polvos obtenidos a 60 y 70°C. Los resultados se muestran en el Cuadro VI.10.

En el cuadro VI.10 se muestran los parámetros de color ΔL , Δa^* , Δb^* así como el croma (C^*), el matiz (H^*), el cambio de color con respecto a la materia prima (ΔE) y las coordenadas x^* y y^* del plano de color. Los resultados obtenidos indican que la pérdida de luminosidad (ΔL) del polvo de fresa obtenido a 50°C (-2.14 a -2.67) es menor con respecto al polvo de fresa obtenido a 60 y 70°C (-4.06 a -4.57). Esto es debido principalmente a la menor oxidación de los componentes de la materia prima, la cual, evita la pérdida de los principales componentes responsables del color del polvo de fresa (antocianinas y fenoles).

Cuadro VI.10 Valores de los parámetros de color de pulpa de fresa reconstituida obtenida en las etapas de secado a 50°C con referencia a la pulpa de fresa comercial

	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	H^*	C^*	x^*	y^*
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (50x15x5)	4.40	-2.14	-1.90	-0.53	34.37	9.97	10.52	9.86
PULPA DE FRESA RECONSTITUIDA (50x25x5)	4.35	-2.67	-2.13	-0.64	35.51	10.25	10.43	9.73

Otros parámetros afectados por la temperatura de proceso fueron los valores de Δa^* (indica el cambio de verde a rojo) y Δb^* (indica el cambio de azul a amarillo). La disminución de los valores de a^* con respecto a los polvos obtenidos a 60 y 70°C denota un croma más rojo (el cual es confirmado por el incremento en el croma C^*) mientras que los valores de b^* disminución mínima del color amarillo de la muestra.

El decremento de ΔE que presentan las muestras con respecto a los productos de 60 y 70°C, confirma que el cambio en la intensidad de color que presentaron las muestras de 50°C fue menor. Esto indica que el cambio de color fue hacia un tono no oscuro tan oscuro como en los casos anteriores. Este resultado, esta confirmado por la menor pérdida de luminosidad de la muestra, lo que indica una menor oxidación de los componentes y por lo tanto, un proceso con un mínimo daño térmico al producto final.

VI.9. USO DE ADITIVOS PARA INCREMENTAR LA TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA (T_g)

Como puede observarse en los resultados presentados hasta ahora, la temperatura de transición vítrea de la pulpa de fresa fue de aproximadamente 43°C por lo que su temperatura de pegajosidad está localizada entre 53 y 63°C (Bhandari *et al.*, 1993). Los resultados del secado realizado a 50°C mostraron que la cantidad de producto seco adherido a los inertes disminuyó considerablemente logrando un incremento en la eficiencia en la recuperación del polvo. Esto fue debido principalmente a la disminución tanto en el pulso de alimentación como la adhesión de

producto a los sólidos inertes del lecho y a las paredes del secador, favoreciendo así el desprendimiento del polvo de la superficie de los mismos. Estos resultados indican que para tener un secado exitoso de pulpa de fresa, la temperatura de proceso debe encontrarse por debajo de la temperatura de pegajosidad.

Sin embargo, el propósito del secado de jugos y pulpas de frutas no solo es obtener altos rendimientos de recuperación del polvo sino también obtener un polvo estable y de fácil manejo para así prolongar su vida útil. La alimentación de flujos con bajas temperaturas de transición vítrea como los jugos de frutas es usualmente realizada en secado por aspersion, pero este tipo de procesos es desarrollado a través de la incorporación de altas cantidades de aditivos al flujo alimentado. Roustapour *et al*, (2006) mencionan que el secado de productos con una alta temperatura de transición vítrea y un alto punto de fusión presentan un comportamiento estable y producen altos porcentajes de recuperación del producto. Entre estos productos, denominados ayuda de secado, se encuentran la lactosa, el almidón y las maltodextrinas en sus diferentes grados de dextrosa equivalente (DE).

La alta higroscopicidad y la naturaleza termoplástica de los polvos de jugos de frutas dan lugar a problemas tales como la adhesión a las paredes del secador, dificultad en el manejo y apelmazamiento del producto. El uso de altas concentraciones de aditivos en el secado por aspersion es necesario para facilitar el proceso, mejorar el rendimiento e incrementar el tiempo de almacenamiento del polvo. Las maltodextrinas en sus diferentes grados de DE son los aditivos más usados en el secado por aspersion de jugos de frutas, debido principalmente a que poseen altas temperaturas de transición vítrea (100-188°C) (Roustapour *et al.*, 2006) y que al ser incorporados a soluciones de sólidos de bajo peso molecular (monosacáridos y disacáridos) pueden incrementar su temperatura de transición vítrea (T_g) reduciendo la pegajosidad e incrementando la estabilidad del polvo.

Con base en los resultados presentados anteriormente y a lo reportado en diversas investigaciones (Roustapour *et al.*, 2006, Papadakis *et al.*, 2006, Young *et al.*, 2006, Goula *et al.*, 2004 y Abadio *et al.*, 2004) se estudió la variación de la temperatura de transición vítrea (T_g) de la pulpa de fresa con la adición en diferentes concentraciones de maltodextrina DE10.

Para evaluar la relación de maltodextrina/sólidos de pulpa de fresa mínima necesaria para aumentar la T_g por arriba de 60°C para poder ser secada a esta temperatura se realizaron tres niveles de incorporación basados en el contenido total de sólidos de la pulpa: 20:80, 30:70 y 50:50 (maltodextrina: sólidos de pulpa). Con el fin de comparar la temperatura de transición vítrea de las muestras maltodextrina: pulpa arriba citadas y las obtenidas con polvo de fresa sin aditivos previamente presentada (sección V.2), se realizó, posterior a la incorporación del aditivo, un ajuste de sólidos totales para igualar el contenido de sólidos totales del polvo de fresa sin aditivos (15.33%) para que las muestras se encontraran en las mismas condiciones y pudiesen ser comparadas. El secado de las muestras se realizó a 50°C , con un pulso de alimentación de 15 mL, un tiempo de recuperación del lecho de 18 min y un tiempo de secado de 25 min, esta metodología es igual a la utilizada para obtener el polvo de fresa sin aditivos que fue analizado previamente. Una vez que el polvo de las diferentes mezclas de maltodextrina: pulpa de fresa fue obtenidos, se realizó la determinación de la temperatura de transición vítrea, se utilizaron las mismas condiciones que para el polvo de fresa sin aditivos (intervalo de $15\text{-}80^\circ\text{C}$ y una velocidad de calentamiento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$). Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro VI.11 y la Fig.VI.16.

Cuadro VI.11 Temperatura de transición vítrea (T_g) determinada en las diferentes muestras adicionadas de maltodextrina DE10

INCORPORACIÓN DE MALTODEXTRINA A LA PULPA DE FRESA		TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA ($^\circ\text{C}$)
Relación Maltodextrina/Sólidos de la pulpa	% Maltodextrina adicionada (con base a la pulpa de fresa)	
20:80	3.69 %	43.5
30:70	6.16 %	44.69
50:50	13.29 %	62.5

Como puede observarse en el Cuadro VI.11 y la Fig. VI.16 la adición de maltodextrina a la pulpa de fresa menor a la relación 50:50 no logran incrementar la temperatura de transición vítrea (T_g). Esto puede deberse a la baja temperatura de transición de la pulpa de fresa pura, por lo que fue necesario realizar una adición de maltodextrina en una proporción igual a los sólidos presentes en la pulpa de fresa. El incremento que se obtuvo en la T_g fue de 20°C , elevando el intervalo de pegajosidad de $53\text{-}63^\circ\text{C}$ para la pulpa de fresa original a $72.5\text{-}82.5^\circ\text{C}$ para la pulpa de fresa con maltodextrina proporción 50:50 para no tener problemas de secado a 70°C . La incorporación de la

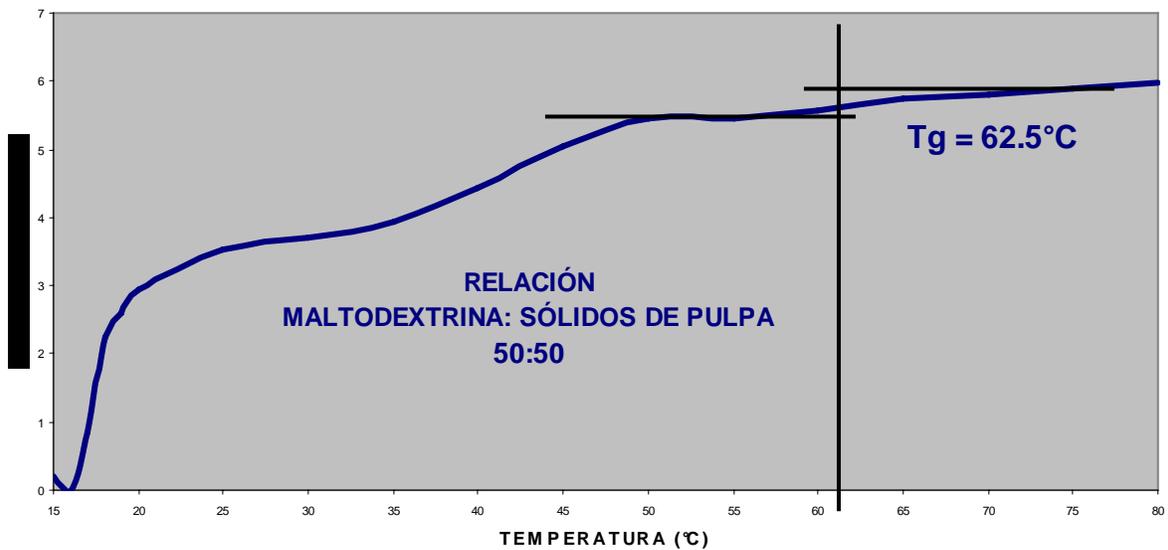
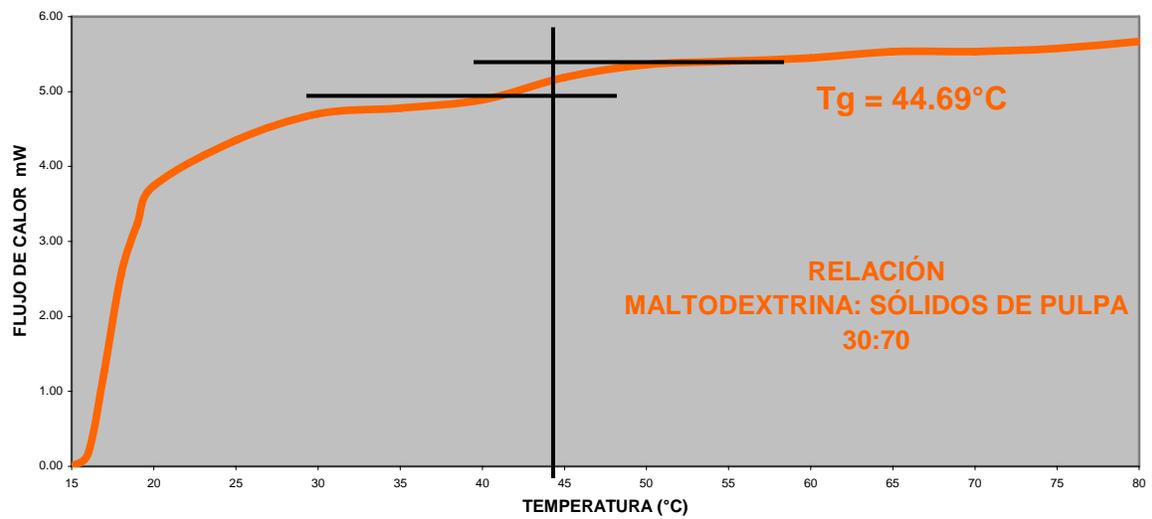
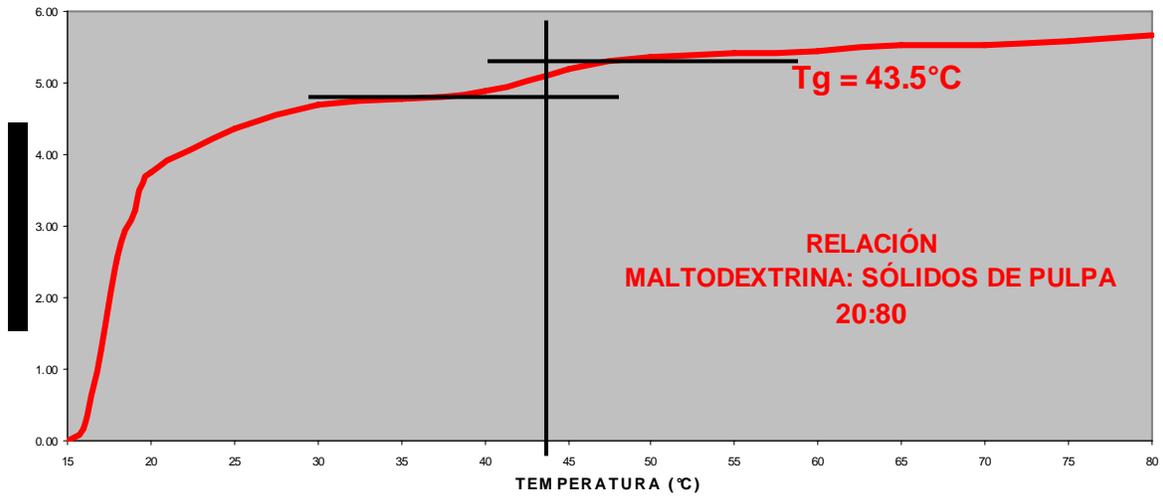


Fig. VI.16 Termogramas obtenidos a 10°C/min del polvo de fresa adicionado de maltodextrina en una relación maltodextrina: sólidos de pulpa de 20:80, 30:70 y 50:50

relación 50:50 a los jugos de frutas puede incrementar su temperatura de transición vítrea, sin embargo, este porcentaje de incorporación produce un decremento en las cualidades nutrimentales y el color de los polvo obtenidos. Bhandari *et al*, (1993), obtuvieron las mejores concentraciones maltodextrina: jugo en el secado por aspersión de jugos de frutas siendo para jugo de grosella negra (35/65), jugo de durazno (40/60) y jugo de frambuesa (45/55). Sudhagar *et al*, (2002) reporta la obtención de polvo de mango sin problemas de adhesión mediante la adición de 45% de maltodextrina a la alimentación en secado por aspersión. Estas investigaciones muestran que la incorporación de maltodextrina ayuda a incrementar el contenido de sólidos totales en el jugo de fruta, disminuye el comportamiento de pegajosidad del polvo en las paredes del secador y reduce el contenido de humedad del polvo obtenido, pero disminuye la calidad del producto. Para reducir la cohesividad del polvo de fresa obtenido a 50°C y mejorar su manejo, se propuso emplear la adición de maltodextrina en proporción maltodextrina: sólidos de pulpa de 20:80 que no afecta la temperatura de transición vítrea según el cuadro VI.11 y la Fig. VI.16 pero sí se espera que mejore la eficiencia de recuperación, reduzca la cantidad de producto adheridos a los inertes y reduzca la cohesividad del polvo. Para esto, se le adicionó la cantidad antes mencionada de maltodextrina a la pulpa, aumentando por tanto el contenido de sólidos totales del 15.33% en la pulpa inicial al 18.45%. En este caso no se ajustó el contenido de sólidos al 15.33% como se realizó en las pruebas de secado reportadas anteriormente a 50°C. El secado de la pulpa adicionada con maltodextrina se llevó a cabo a 50°C, con pulso de alimentación de 15 mL, tiempo de recuperación del lecho de 18 min y un tiempo de secado de 25 min. En la Fig. VII.17 se muestran los resultados obtenidos de la cantidad de producto adherido a los sólidos inertes comparados con los obtenidos para pulpa de fresa pura, en las pruebas de secado llevadas a cabo a 50 °C reportadas anteriormente. En esta figura también se incluye la cantidad de producto adherido a los sólidos inertes al secar una solución de maltodextrina con la misma concentración que la pulpa de fresa (15%) con fines de comparación.

En la Fig. VI.17 se observa que existe una disminución en la cantidad de polvo seco retenido en el lecho con respecto a la pulpa de fresa secada sin aditivos. La adición de maltodextrina incrementa el contenido de sólidos totales en la pulpa de fresa original y por lo tanto, mejora las condiciones de secado y brinda estabilidad al proceso. Esto se observa claramente en la Fig. VI.17 ya que la gráfica tiende a una estabilidad en la cantidad de polvo retenida sobre los sólidos inertes a diferencia de la pulpa de fresa sin aditivos que presenta un comportamiento ascendente aún

después de 10 alimentaciones ya que continúa la acumulación del polvo de fresa sobre la superficie de los sólidos inertes.

}

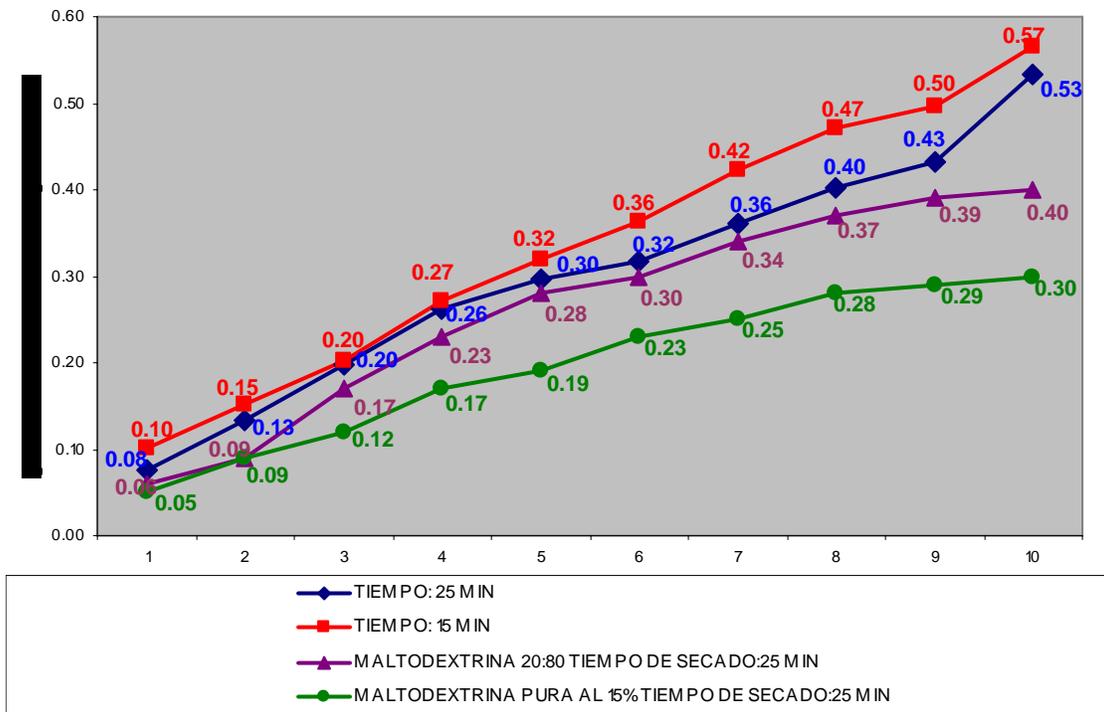


Fig. VI. 17 Comparación de la cantidad de polvo seco retenido en el lecho de sólidos inertes secado a 50°C con diferentes tiempos de secado de la pulpa de fresa original, la adicionada con maltodextrina (20 maltodextrina/80 sólidos de pulpa de fresa) y una solución de maltodextrina al 15%

Los resultados obtenidos concuerdan nuevamente con lo obtenido por Ruiz (2002) quien menciona que la adhesión de polvo sobre la superficie de los sólidos inertes es un fenómeno inherente al uso de sólidos inertes, pues como se observa aún a 50°C se presentó la adhesión de la maltodextrina sobre los sólidos, a pesar de que la maltodextrina es considerada un producto no pegajoso y presenta una alta temperatura de transición vítrea (160°C) (Roustapour, et al, 2006).

En la Fig. VI.17 se observa que tanto la relación maltodextrina: sólidos de pulpa (20:80) y la maltodextrina al 15% posterior a la séptima alimentación tienden a la estabilidad en la cantidad de polvo retenida sobre los sólidos inertes, esto concuerda con lo encontrado por Ruiz (2002) bajo un régimen de alimentación continua ya que después de cierto tiempo de proceso se llegó a un equilibrio, en el cual la cantidad de producto retenido sobre los inertes tiende a hacerse despreciable respecto a la cantidad de polvo obtenido en largos tiempos de operación, sin

embargo, en un régimen de alimentación intermitente y con productos pegajosos es muy difícil llegar a este equilibrio ya que la estabilidad del proceso no solo depende del tiempo de proceso sino también de la temperatura y sobre todo del comportamiento de pegajosidad que presenta el producto.

La reducción en la cantidad de producto adherido a los sólidos inertes que se presenta en la relación 20 maltodextrina: 80 sólidos de pulpa se refleja en el incremento en el porcentaje de recuperación del producto, el cual se muestra en forma comparativa con la pulpa sin aditivos y con la maltodextrina al 15% con un tiempo de secado de 25 min en la Fig. VI. 18.

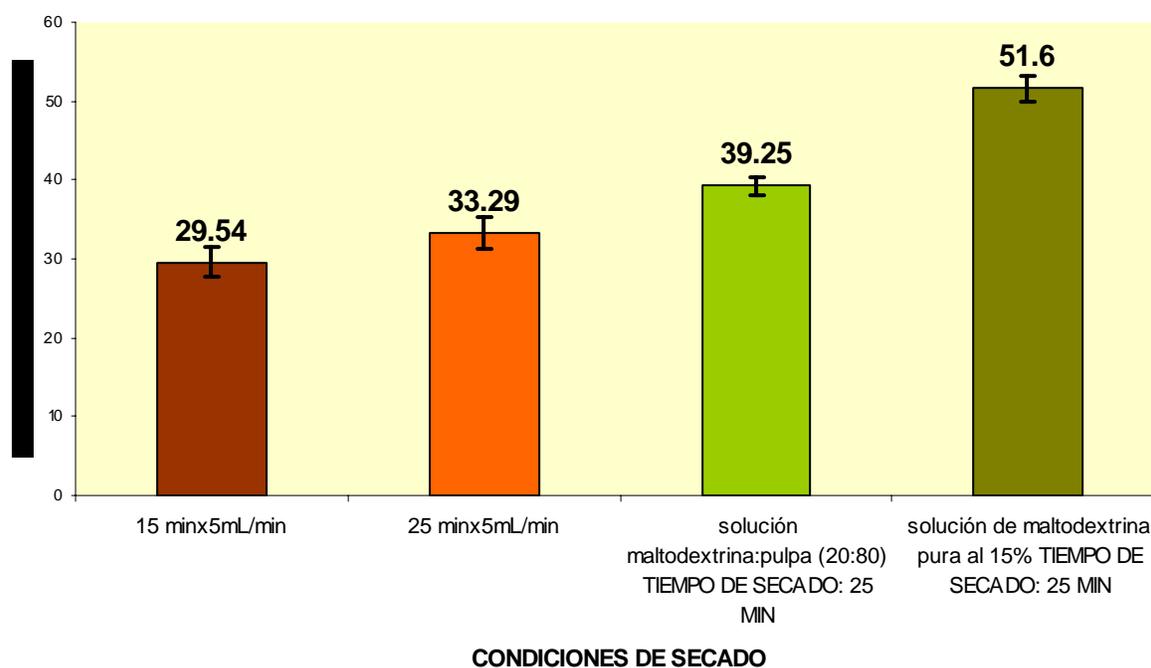


Fig. VI. 18. Eficiencia de recuperación de producto obtenido de pulpa de fresa sin la incorporación de aditivos, pulpa adicionada con 20 maltodextrina: 80 sólidos de pulpa y solución de maltodextrina al 15% secados a 50°C

Como puede observarse en la Fig. VI.18, existe un incremento considerable en el porcentaje de recuperación del producto en la muestra adicionada con maltodextrina. Esto se debe principalmente a la disminución del contenido de humedad de la pulpa alimentada, así como el decremento de la adhesión del polvo a la superficie del sólido inerte.

Los resultados anteriores muestran que la adición de maltodextrina en porciones tan bajas como 20 maltodextrina: 80 sólidos de pulpa que no alcanzan a modificar la temperatura de transición

vítrea (T_g), pero mejoran considerablemente el rendimiento y manejo del polvo de fresa cuando esta es secada a temperaturas por debajo del punto de pegajosidad que se estimó según Bhandari *et al*, (1993) entre 53-63°C. La cantidad de maltodextrina utilizada, que equivale a una concentración de 3.69% (20 maltodextrina: 80 sólidos de pulpa) respecto a la pulpa alimentada (Cuadro VI.11), contrasta con la utilizada por Young *et al*, (2006) quienes establecieron que la adición del 5% de maltodextrina al jugo de sandía en el secado por aspersion reduce la pegajosidad del polvo e incrementa el porcentaje de recuperación. Sin embargo estos autores reportan que, debido al alto porcentaje de incorporación de maltodextrina, la luminosidad y el matiz del producto se vieron reducidos así como los contenidos de licopeno y β -caroteno. En contraste con los resultados de Young *et al*, (2006), el polvo de fresa obtenido en este trabajo presenta poco cambio de color y un grado de termodegradación despreciable, por lo que se conserva su calidad sensorial y nutrimental.

VII. CONCLUSIONES

- ❖ El secado de pulpa de fresa en lecho por fuente fluidizado con tubo central puede realizarse exitosamente a través de alimentación por pulsos.
- ❖ La adhesión del polvo de fresa a los sólidos inertes del lecho y a las paredes del secador no se ven afectada a las temperaturas de secado utilizadas (60 y 70°C), sin embargo, la eficiencia de recuperación del producto se incrementa conforme la temperatura de secado disminuye de 70 a 60°C, lo cual puede deberse a que la temperatura de 60°C se encuentra aún dentro del intervalo de pegajosidad.
- ❖ Ninguna de las velocidades de alimentación utilizadas en el proceso de secado tiene influencia en la eficiencia de recuperación del producto y en la cantidad de producto adherido a los inertes.
- ❖ Los parámetros de calidad del producto (contenido de humedad, retención de ácido ascórbico y fenoles totales) no se ven afectados por la temperatura de secado o velocidad de alimentación, sin embargo, el incremento en el tiempo de secado disminuye ligeramente (10-15%) tanto la retención de ácido ascórbico como la de fenoles totales. En general los polvos de fresa obtenidos presentan un cambio de color (ΔE^*) mayor a 5, lo cual indica un oscurecimiento del producto con un cambio de color a un rojo con tonalidades verde-azul.
- ❖ El secado de la pulpa de fresa a 50°C que se encuentra por debajo del punto de pegajosidad favorece el desprendimiento del producto de las partículas inertes del lecho mejorando considerablemente la eficiencia de recuperación y la calidad del producto ya que se retiene prácticamente la totalidad del ácido ascórbico y fenoles totales presentes en la pulpa de fresa original obteniéndose una menor pérdida de luminosidad lo que indica un producto menos oscuro.
- ❖ La adición de maltodextrina a la pulpa de fresa en una proporción 20 maltodextrina: 80 sólidos de pulpa no modifica la T_g , sin embargo produce una disminución en la cantidad de producto seco retenido en los sólidos inertes del lecho, incrementa la eficiencia de

recuperación del producto (hasta un 39%) y reduce la cohesividad de las partículas de la fresa en polvo sin un detrimento apreciable en el color del producto.

- ❖ El porcentaje de eficiencia de recuperación del polvo cuando se secó una solución de maltodextrina al 15% en peso fue del 51%, lo que corrobora que la adhesión del producto a los sólidos inertes durante el secado es inherente en este tipo de procesos.
- ❖ La correlación que existe entre la temperatura de transición vítrea y la temperatura de pegajosidad no es precisa ya que se tiene un intervalo muy amplio de temperatura en la cual se encuentra el punto de pegajosidad, por lo que su utilización presenta algunos inconvenientes, ya que para estimaciones precisas donde se requiere un control exacto de temperatura, tan solo uno o dos grados arriba de la temperatura de pegajosidad puede provocar cohesión y adhesión del producto. Sin embargo, es importante resaltar que a pesar de los problemas que representa el uso de la temperatura de transición vítrea (T_g), es el indicador más utilizado y aplicado en las investigaciones acerca de la determinación de la temperatura de pegajosidad de diferentes polvos alimenticios.
- ❖ En general, el proceso de secado de pulpa de fresa a bajas temperaturas puede realizarse en el secador de lecho por fuente fluidizado con sólidos inertes; el polvo obtenido presenta baja termodegradación, lo que favorece el uso de este secador para la obtención de polvo de fresa con una alta calidad nutricia y sin la presencia de algún aditivo. Sin embargo, es importante recalcar que debido a la naturaleza de estos productos, la adhesión que presenta el polvo a las paredes y sólidos inertes es muy alta lo que provoca bajas eficiencias en la recuperación del lecho. Este problema puede ser disminuido mediante el uso de temperaturas de secado por debajo del punto de pegajosidad, lo que representa un reto para el secado por aspersión y una ventaja para el secador de lecho por fuente fluidizado.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abadio** F. D. B., Domínguez A. M., Borges S. V. and Oliveira V. M. 2004. Physical properties of powdered pineapple (*Ananas Comosus*) juice-effect of maltedextrin concentration and atomization speed. *J. Food Eng.* 64, 285-287.
- Adhikari** B., Howes T., Bhandari B. and Troung V. 2003. Stickiness, functionality, and microstrure of food podwers. *J. Food Ind.* 5, 112-124.
- Alonso** S. D. 2005. Contaminación del producto obtenido en lecho por fuente fluidizado por los finos provenientes del lecho de inertes. Tesis Maestría. ENCB. IPN. México.
- Alsina** O.L.S. 1996. Studies on performance of spouted bed dryer symposium. Kraków. Poland. 865-872.
- Askar** A. and Treptow H. 1993. Quality assurance in tropical fruit processing. Springer Laboratory. Germany. 28-43.
- Audu** T. O. K., Loncin M. and Weisser H. 1978. Sorption isotherms of sugars. *LWT.* 11, 31-34.
- Ayala** R. 1996. Comercialización de la fresa mexicana. Tesis Licenciatura. Facultad de Contaduría y Administración. UNAM. México.
- Badui** D. S. 1996. Química de los alimentos. Alambra. México. 279-327.
- Barret** M. D., Ramaswarry H. and Laszlo S. 2005. Processing fruits (science and technology). CRC press. USA. 532-539.
- Barret** N. D., Fane A. G., Claflin J. K. and Hadzismajlovic D. 1985. The industrial potential and economic viability of spouted bed processes. *Chemical* 85, 13 th Australian Chem. Eng. Conf. Pert. 401-405.
- Bernal** S. M. 1995. Desarrollo de frutas cristalizadas (fresa y papaya).Tesis Licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México.
- Berlitz** H. D. and Grosch W. 1999. Food Chemistry. Springer-Verlag. Alemania.
- Bhandari** B. R., Datta N. and Howes T. 1997. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. *Drying Technol.* 15, 671-684.
- Bhandari** B. R., Senoussi A., Dumoulin E. D. and Lebert A. 1993. Spray drying of concentrated fruit juices. *Drying Technol.* 11, 33-41.
- Bhandari** B. R., Truong V. and Howes T. 2005. Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods. Part I-Moisture and glass transition temperature profile during drying. *J. Food Eng.* 71, 55-65.

- Bhandari B. R.**, Truong V. and Howes T. 2005. Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods. Part II-Optimization of spray drying process based on glass transition temperature concept. *J. Food Eng.* 71, 66-72.
- Boonyai P.** 1999. Comparative Evaluation of Soyamilk Drying in a Spray Dryer and Spouted Bed of Inert Particles. www.203.159.19.151/phfpe/febt/Masters%20Thesis/PhFPE%2099/99-8.htm.
- Boonyai P.**, Bhandari B. and Howes T. 2004. Stickiness measurement techniques for food powder: a review. *Powder Technol.* 145, 34-36.
- Bravo L.** 1998. Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition Rew.* 56, 317-333.
- Brennan J. G.**, Herrera J. and Jowitt R. 1971. A study of some of the factors affecting the spray drying of concentrated orange juice on a laboratory scale. *J. Food Technol.* 6, 295-307.
- Bronlund J.** 1997. The modeling of caking in bulk lactose. PhD Thesis. Massey University. New Zealand.
- Chaterjee A.** 1970. Effect of particle density on internal solids circulation rate in air spouted beds. *Ind. Eng. Chem.* 4, 105-536.
- Calvo C.** y Durán L. 1997. Óptica y color en: temas en tecnología de alimentos. IPN. México, D. F.
- Clifford M. J.** 2000. Anthocyanin composition of red raspberry juice: influences of cultivar processing and environmental factors. *J. Food Sci.* 65, 1135-1141.
- Decker E. A.** 1997. Phenolics: Prooxidants or antioxidants?. *Nutricional Rew.* 55, 396-398.
- Dixon A.** 1999. Correlating food powders stickiness with composition, temperature and relative humidity. Research Project. Department of Chemical Engineering. Monash University.
- Downton G. E.**, Flores-Luna J. L. and King C. J. 1982. Mechanism of stickiness in hygroscopic, amorphous powders. *Ind. Eng. and Chem. Fund.* 21, 447-451.
- Dumronglaohapun P.** 1994. Liquid food drying by spouted bed technique. www.kmutt.ac.th/organization/Enginnering/food/1005y94.htm, 1-1.Marzo, 2003.
- Elias R.** 2000. Adaptación, caracterización y estudio hidrodinámico de un secador de lecho por fuente-fluidizado y su aplicación en el secado de alimentaciones liquidas. Tesis Maestría. ENCB. IPN. México.
- Epstein N.** and Grace J. R. 1984. Spouting of particulate solids. *Handbook of powder science and technology.* Van Nostrand Reinhold Co. USA. 507-536.
- Flores T. L. Y.** 2005. Termoprocesamiento de puré de zanahoria en un intercambiador de calor de superficie raspada piloto y efectos sobre sus carotenoides. Tesis Maestría. ENCB. IPN. México.

- Fogliano V.**, Verde V., Randazzo G. and Ritieni A. 1999. Method for measuring antioxidant activity and its application to monitoring the antioxidant capacity of wines. *J. Agric. Food Chem.* 47, 1035-1040.
- Francis F. J.** and Clydesdale F. M. 1975. *Food Colorimetry: theory and applications*. AVI Publishing Co., Inc. USA.
- Geankoplis C. J.** 1998. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. CECSA. México.
- Goula M. A.**, Kockel T. K. and Adamopoulos K. G. 2004. Spray drying of tomato pulp: effect of feed concentration. *Drying Technol.* 22, 2309-2330.
- Guzmán R. I.** 1998. Cambios en el color y clorofilas de aguacate (*Persea americana, Mill*) variedad hass tratado en microondas. Tesis Doctorado. ENCB. IPN. México.
- Hufenüssler J. T.** 1992. Special topics in drying. Federal University of Saõ Carlos. Brazil. 330.
- Hennigs C.**, Kockel T. K. and Langrish T. A. G. 2001. New measurements of the sticky behaviour of skim milk powder. *Drying Technol.* 19, 471-484.
- Hernández C. L. C.** 2002. Obtención de un concentrado de frambuesa. Tesis Maestría. ENCB. IPN. México.
- Hui Y. H.** 1992. *Encyclopedia of food science and technology*. Vol. 1, 2 y 4. John Wiley & Sons Inc. USA. 1: 211-218, 223-230, 293-310, 739; 2: 452-460, 981, 1338, 1339, 1352-1355, 1378-1404; 4: 2252-2561, 2701-2712.
- INEGI.** Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2000. Cultivos en México. IX censo agropecuario de México. 185-189.
- INNSZ.** Instituto Nacional de Nutrición "Salvador Zubirán". 2000. Tablas de valor nutritivo de los alimentos de mayor consumo en México. 118-119.
- Jackman L.** and Smith H. S. 1992. Antioxidant activity in fruits and leaves of blackberry, raspberry and strawberry varies with cultivar and developmental stage. *J. Agric. Food Chem.* 40, 140-146.
- Kähkönen M. P.** Hopia A. I. and Heinonen M. 2001. Berry phenolics and their antioxidant activity. *J. Agric. Food Chem.* 49, 4076-4082.
- Kinsella W.**, McGinn J., Lean M. E. J., MacLean M. R. and Gardner L.. 1993. Ellagitannins, flavonoides, and other phenolics in red raspberries and their contribution to antioxidant capacity and vasorelaxation properties. *J. Agric. Food Chem.* 41, 5191-5196.
- Labuza T. P.** 1995. Properties of sorption isotherms of foods, in water activity theory, management and application. University of Queensland. Department of Food Science and Technology Gatton Collage and Shanaglen Technology. Australia. 13-16.
- Lazar M. E.**, Brown A. H., Smith G. S., Wong F. F. and Lindquist F. E. 1955. Experimental production of tomato powder by spray drying. *Food Technol.* 26, 129-134.

- Lee** C. Y. 1992. Phenolic compounds en encyclopedia of food science and technology. Wiley & Sons Inc. USA. 2055-206.
- Lee** H. S. and Coates G. A. 1999. Vitamin C in frozen, fresh squeezed, unpasteurized, polyethylenebottled orange juice: a storage study. *Food Chem.* 65, 165-168.
- Levine** H. and Slade L. 1990. Cryostabilisation technology: thermoanalytical evaluation of food ingredients and systems in thermal analysis of foods. Elsevier. London. 221-223.
- Lima** M. F. M. 1992. Deshidratation de umbu pulp in spouted beds, M. Sc. Thesis. Federal University of Paraiba. Brazil. 117.
- Liu** M., Li X. Q., Weber C., Lee C. Y., Brown J. and Lui R. H. 2002. Antioxidant and antiproliferative activities of raspberries. *J. Agric. Food Chem.* 50, 2926-2930.
- Lockeman** C. A. 2001. An investigation of milk powders produced by a laboratory-scale spray dryer. *Chem. Eng. Process.* 38. 301-306.
- López** C. R., García C. A. and Cecilia M. 2006. Effects of operating conditions on the quality of mango pulp dried in a spout fluidized bed. *Drying Technol.* 24, 423-432.
- López** da Silva F., Bailón T. and Pérez-Alonso J. J. 2005. Anthocyanin pigments in strawberry. *LWT.* 6, 126-135.
- Macheix** J., Fleuriet A. and Billot J. 1990. Fuit phenolics. CRC Press, Inc. USA.
- Martínez-Valverde** I., Periago M. J. and Ros G. 2000. Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición.* 50, 5-18.
- Masters** K. 1991. Spray drying handbook. Longman Scientific & Technical. England.
- Mathur** K. B. and Epstein N. 1974. Spouted beds. Academic Press. USA. 111-191.
- Mathur** K. B. and Gishler P. E. 1995. A study of application of the spouted bed technique to wheat drying. *J. Appl. Chem.* 5, 624-636.
- Mazza** G. and Miniati E. 1993. Anthocyanins in fruits, vegetables, and grains. CRC Press. EUA.
- Medeiros** M. F. D., Rocha S. C. S., Alsina O. L. S., Jerónimo C. E. M. and Mata A. L. M. L. 2002. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of composition on dryer performance. *Drying Technol.* 20, 855-881.
- Morales-Blancas** E. F., Chandia V. E. and Cisneros-Zevallos L. 2002. Termal inactivation kinetics of peroxidase and lipoxygenase from brócoli, green asparagus and carrots. *J. Food Sc.* 67, 146-154.
- Nguyen** L. B., Van Loey A. M., Fachin D., Verlent I., Duvetter T., Vu S.T., Smout C. and Hendrickx M. E. 2002. Strawberry pectin methylesterase (PME): purification, characterization, thermal and high-pressure inactivation. *Biotechnol. Prog.* 18, 1447-1450.

- Nienaber** U. and Shellhammer T. H. 2001. High-pressure processing of orange juice: kinetics of pectinmethylesterase inactivation. *J. Food Sc.* 66, 328-331.
- Ochoa-Martínez** L. A., Brennan J. G. and Niranjana K. 1993. Spouted bed dryer for liquid food. *Food Control.* 4, 41-45.
- Oliveira** W. P. 1999. Development of a process for production of dry-extracts of brazilian endemic plants using spouted beds. II Congresso de Engenharia de Processos do MERCOSUL. Brazil.
- Oliveira** W. P. and Silva G. P. 1997. Tablet coating by conventional spouted bed. www.fcfrp.usp.br/users/wpoliv/, 1-5. Enero, 2003.
- Olson** M. E., Andersson C. S., Oredsson S., Berglund R. H. and Gustavsson K. E. 2006. Antioxidant level and inhibition of cancer cell proliferation in vitro by extracts from organically conventionally cultivated strawberry. *J. Agric. Food Chem.* 54, 1248-1255.
- Osorio** G. 1990. Spouted bed drying of liquids. PhD. Thesis. University of Reading. U. K.
- Osorio** Trejo Bitia. 2003. Secado por aspersion de jugo de zanahoria. Tesis Licenciatura. ENCB. IPN. México.
- Ozmen** L. and Langrish T. A. G. 2002. Comparison of glass transition temperature and sticky point temperature for skim milk powder. *Drying Technol.* 10, 817-837.
- Papadakis** E. S., Gardeli C. and Tzia C. 2006. Spray drying of raisin juice concentrate. *Drying Technol.* 24, 173-180.
- Paterson** A. H. J. and Bronlund G. F. 2001. The blow test for measuring the stickiness of powders. Reno Hilton. USA.
- Passos** M. L., Barreto D. W. and Massarani G. 1992. Production of annatto concentrates in spouted beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering.* 70, 954-954.
- Passos** M. L., Massarani G., Freire J. T. and Mujumdar A. S. 1997. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. *Drying Technol.* 15, 605-624.
- Prádanos** del Pico R. 2004. Normalización del color en Ingeniería Gráfica. Departamento de Extensión Gráfica en la Ingeniería de la Escuela Universitaria Politécnica-AIDA. España.
- Proteggente** A. R., Pannala A. S., Paganga G., Van Buren L. Wagner E., Wiseman, S., Van De Put F., Dacombe C. and Rice-Evans C. A. 2002. The antioxidant activity of regularly consumed fruit and vegetables reflects their phenolic and vitamin C composition. *Free Radic. Res.* 36, 217-233.
- Ramírez** Torres Arturo Miguel. 2006. Distribución de tiempos de residencia en un sistema modelo fluidizado con sólidos inertes. Tesis Maestría. ENCB. IPN. México.
- Ranganna** S. 1986. Color measurement in: Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetables products. Mc Graw-Hill. India.

- Reyes S. A. E.** 1996. Drying of solutions and suspensions in conical spouted beds. Ph.D. Thesis. COPPE- Federal University of Río de Janeiro. Brazil. 169.
- Rommel A.** and Wrolstad R. E. 1993. Ellagic acid content of red raspberry juice as influenced by cultivar, processing, and environmental factors. *J. Agric. Food Chem.* 41, 1951-1960.
- Ross Y.** and Karen M. 1991. Plasticizing Effects of water on thermal behavior and crystallization of amorphous food models. *J. Food Sc.* 56, 38-43.
- Roustapour Q. R.,** Hosseinalipour M. and Ghobadian L. 2006. An Experimental investigation of lime juice drying in a pilot plant spray dryer. *Drying Technol.* 24 , 181-188.
- Ruiz C. A.** 2001. Estudio del proceso de secado y del grado de contaminación del producto obtenido en lecho por fuente-fluidizado. Tesis Maestría. ENCB. IPN. México.
- Sahara M.,** Boostani M. and Zohreh H. 2004. Effect of low temperatura on the ascorbic acid content and quality characteristics of frozen strawberry. *Food Chem.* 86, 357-363.
- Salué-Gracia G.,** Wrolstad R. E., Lea P. and Enerven G. 1997. Color stability of strawberry and blackcurrant syrups. *J. Food Sc.* 62, 172-177.
- Schneider T.** and Bridgwater J. 1989. The stability of wet spouted beds. *Drying Technol.* 2, 277-301.
- Senoussi A.,** Dumoulin E. D. and Berk Z. 1995. Retention of diacetyl in milk during spray-drying and storage. *J. Food Sc.* 60, 894-905.
- Slade L.,** Levine H., Levoella K. and Wang M. 1993. The glassy state phenomenon in applications for the food industry: application of the food polimer science approach to structure- function relationships of sucrose in cookie and cracker systems. *J. Sc. Food Agric.* 63, 133-176.
- Spitzner-Neto P. I.** and Freire J. T. 1998. Studies on drying of pastes in spouted bed: influence of the paste on the process. Proceedings of the 25th Brazilian Congress of Particulates Systems. 185-190.
- Strumillo C.** and Kundra T. 1987. Drying: principles, application and design. Gordon and Breach Science Publishers. USA. 448.
- Strumillo C.,** Markowsky A. and Kamistry W. 1983. Modem developments in drying of pastelike materials. Hemisphere Publishing Corp. USA. 193-232.
- Young Q.,** King N. and Swedlund P. 2007. The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chem Eng. and Proc.* 46, 386-392.
- Wada L.** and Ou B. 2002. Antioxidant activity and phenolic content of Oregon caneberries. *J. Agric. Food Chem.* 50, 3495-3500.
- Wallack N.** and King B. 1998. Effects of time, temperature and pressure on the cake formation of coffee milk powders. *J. Food Eng.* 58, 355-361.

- Wesche-ebeling** P. and Montgomery W. M. 1990. Strawberry polyphenoloxidase: purification and characterization. J. Food Sc. 55, 1315-1319.
- Worlstand** E. R. 1993. Color and pigment analyses in fruit products. Oregon State University. USA. 121-126.