

---

---

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**  
**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE REHIDRATACIÓN DEL LIOFILIZADO DE AGUACATE CRIOLLO (*Persea americana Mill. variedad Drimifolya*) MEDIANTE ANÁLISIS DE IMÁGENES**

**T E S I S**

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL  
*GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS*  
CON ESPECIALIDAD EN:  
CIENCIAS QUIMICOBIOLOGICAS

**PRESENTA:**

WENDY DAYANARA ACOSTA HERNÁNDEZ



DIRECTORES DE TESIS:  
Dr. GUSTAVO FIDEL GUTIÉRREZ LÓPEZ  
Dra. ALICIA ORTIZ MORENO

## ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
2 Antecedentes	4
2.1 Generalidades sobre el aguacate	5
2.2 Importancia de los alimentos deshidratados	6
2.3 Alimentos en polvo	7
2.4 Liofilización	8
2.5 Rehidratación de alimentos	9
2.5.1 Propiedades de rehidratación de los alimentos	11
2.5.2 Humectabilidad	12
2.6 Tamaño y distribución de partícula	13
2.7 Microestructura	13
2.8 Procesamiento digital de imágenes	14
2.8.1 Generalidades del análisis de imágenes	14
2.8.2 Etapas de la técnica de análisis de imágenes	16
2.8.2.1 Adquisición de la imagen	17
2.8.2.2 Pre-procesamiento de la imagen	18
2.8.2.3 Segmentación de la imagen	19
2.8.2.4 Medición de las características del objeto	19
2.8.2.4.1 Tamaño	19
2.8.2.4.2 Forma	20
2.8.2.4.3 Color	20
2.8.2.4.4 Textura	21
2.8.2.4.5 Clasificación	25

3 Justificación	26
4 Objetivos	27
5 Materiales y métodos	28
6 Desarrollo experimental	30
7 Resultados y discusión	36
8. Conclusiones	60
9 Bibliografía	62
10 Anexos	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Aguacate variedad criollo	5
Figura 2	Diagrama de análisis de imágenes	16
Figura 3	Representación tridimensional del espacio de color $L^*a^* b^*$	21
Figura 4	Procesamiento de la imagen y ejemplo del método de conteo de cajas para determinar la dimensión fractal de contorno de la Imagen de aguacate	25
Figura 5	Partes del sistema de adquisición de imágenes	33
Figura 6	Cromatograma del perfil de ácidos grasos obtenido del liofilizado de aguacate variedad criollo	38
Figura 7	Cambios en los parámetros de color $L^*a^*$ y $b^*$ a diferentes niveles de humectación para una tamaño de partícula de 1.67 mm	42
Figura 8	Cambios en los parámetros de color $L^*a^*$ y $b^*$ a diferentes niveles de humectación para una tamaño de partícula de 1.41 mm	42
Figura 9	Cambios en los parámetros de color $L^*a^*$ y $b^*$ a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 1.00 mm	43
Figura 10	Cambios en los parámetros de color $L^*a^*$ y $b^*$ a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 0.707 mm	43
Figura 11	Cambios en los parámetros de color $L^*a^*$ y $b^*$ a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 0.297 mm	43
Figura 12	Imagen de partículas obtenidas por microscopía electrónica de barrido e ilustración del diámetro de Feret	43
Figura 13a y 13b	Representación tridimensional de los cambios en el contorno de las partículas del liofilizado de aguacate	45
Figura 15	Gráfico del diámetro de Feret y tamaño de partícula de 1.68 mm	45
Figura 16	Gráfico del diámetro de Feret y tamaño de partícula de 1.41 mm	45
Figura 17	Gráfico del diámetro de Feret y tamaño de partícula de 1.00 mm	46

Figura 18 Grafico del diámetro de Feret y tamaño de partícula de 0.707 mm	46
Figura 19 Gráfico del diámetro de Feret y tamaño de partícula de 0.297 mm	46
Figura 20 Cambios en el segundo momento angular a diferentes tiempos para partículas sin aceite	50
Figura 21 Cambios en el segundo momento angular a diferentes tamaños de Partícula	50
Figura 22 Partícula con aceite	51
Figura 23 Partícula sin aceite	51
Figura 24 Cambios en los valores de entropía a diferentes tiempos para partículas sin aceite	52
Figura 25 Cambios en los valores de entropía a diferentes tamaños de partículas sin aceite	53
Figura 26 Cambios en los valores de dimensión fractal de textura en partículas con aceite	54
Figura 27 Cambios de los valores de dimensión fractal de textura en partículas con aceite	54
Figura 28 Proceso de rehidratación de una partícula de maltodextrina, aumento 10x	55
Figura 29 Proceso de rehidratación de una partícula de liofilizado de Aguacate con aceite aumento 10x	56
Figura 30 Proceso de rehidratación de una partícula de liofilizado de aguacate sin aceite aumento 10x	57

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Aplicaciones de las cámaras con CCD para la evaluación de la calidad de alimentos	16
Cuadro 2 Análisis proximal del liofilizado de aguacate expresado en g/100g	36
Cuadro 3 Resultados del proceso de tamizado del polvo de aguacate	39
Cuadro 4 Tiempo de humectación para el polvo de aguacate	40
Cuadro 5 Dimensión fractal de contorno (D <sub>fc</sub> ) para diferentes tamaños de Partículas	44
Cuadro 6 Coeficientes de correlación y capacidad máxima obtenidos de la Cinética	47
Cuadro 7 Evaluación de la dimensión fractal en partículas sin aceite a 4 tiempos representativos	48
Cuadro 8 Evaluación de la dimensión fractal de las partículas secas sin Aceite	58
Cuadro 9 Evaluación de la dimensión fractal de las partículas mojadas sin Aceite	59

## **RESUMEN**

En la industria de alimentos se emplean una gran variedad de polvos, los cuales en su mayoría deben ser rehidratados antes de su consumo. Los alimentos deshidratados deben tener buenas propiedades de rehidratación una larga vida de anaquel y bajo costo de transportación. La elaboración de un polvo de aguacate es una buena opción para el procesamiento de dicho fruto, sin embargo existen pocas investigaciones con respecto al proceso de rehidratación del polvo de aguacate. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la rehidratación de un polvo liofilizado de aguacate con y sin extracción de aceite, enfocándose en la etapa de humectabilidad, empleando el análisis de imagen.

Al polvo anteriormente mencionado se le realizó un análisis proximal, determinación de fitoquímicos y análisis morfológico (fractal y tamaño de partícula); de igual forma se realizó un análisis de dimensión fractal de contorno y textura fractal, así como la determinación de entropía y el segundo momento angular, de las imágenes obtenidas de estos polvos también se realizó la evaluación de la humectabilidad de las partículas aisladas además de la determinación de color en el material mojado. De igual manera se realizó una cinética de extracción de aceite.

El 30 % de las partículas presentaron un diámetro mayor a 1.68 mm y su humectación se realizó en aproximadamente 0.6 segundos. La dimensión fractal de contorno de estas partículas fue de 1.2064 y el máximo de extracción de aceite fue 81.3 %.

A menor tamaño de partícula hay un menor tiempo de humectabilidad por lo tanto una menor dimensión fractal de contorno. La determinación de dimensión fractal y el diámetro de Feret ayudaron a establecer la diferencia de partículas rugosas y suaves.

Las partículas con aceite presentaron un valor menor de entropía de imagen (mayor segundo momento angular) y lo inverso sucedió con partículas sin aceite. El tamaño, la morfología y la composición de la partícula tienen una influencia directa en la humectabilidad del material.

## **ABSTRACT**

In the food industry, a great amount and variety of powders are used and many of them must be rehydrated prior to consumption. Dehydrated foods should have good rehydration properties, long shelf life and low transport costs. Preparation of avocado powder is a good alternative for processing this fruit. However, there are few investigations on avocado powder rehydration.

The objective of this work was to evaluate the rehydration of freeze dried avocado powder with and without the oil fraction, focusing on the humectability stage, by means of image analysis.

Proximal, physicochemical and morphological (fractal and size distribution) analysis were carried out to the test material and fractal dimension of contour and fractal texture were evaluated as well as image entropy and angular second moment of the images of the powders. Also, humectability of single particles and color of wetted material as well as kinetic of oil extraction were evaluated. 30% of particles had diameters higher than 1.68 mm and their humectation took approximately 0.06 s. Fractal dimension of contour for these particles was 1.2064 and maximum oil extraction was 81.3 % .

The lower the particle size, the lower the time for humectability and a lower fractal dimension of contour. Fractal dimension and Feret's diameter allowed distinguishing between rough and smooth particles.

Also, particles with oil had a lower value of entropy of image (higher angular second moment) and the contrary happened for particles without oil. Size, morphology and composition, had an influence on humectability of material.

## **INTRODUCCIÓN**

Uno de los objetivos de la industria alimentaria es la conservación de los alimentos. En esta industria se maneja una gran cantidad y variedad de materiales muchos de los cuales, son comercializados en forma de polvos que requieren ser hidratados antes de ser consumidos. Se ha observado que para la producción de alimentos en polvo, se requiere de un proceso diseñado para obtener productos de buena calidad. Los alimentos deshidratados (pueden ser polvos) deben ofrecer una rehidratación fácil, vida de anaquel larga, estabilidad microbiológica, f uso fácil, costos de transportación bajos y un valor agregado alto. Por lo tanto, el interés industrial, académico y científico ha incrementado el número de investigaciones sobre la rehidratación de los alimentos en polvo (Marabí, Saguy, 2004). No obstante, la rehidratación puede ser una medida del deterioro del alimento causada por el proceso de secado y tratamientos precedentes a la deshidratación (Lewicki 1988).

Existen una gran cantidad de alimentos en polvo, entre ellos el aguacate que, en esta presentación es una buena alternativa para su industrialización. Se han utilizado métodos convencionales de secado, los cuales han sido inadecuados para este fruto, debido a la enorme degradación que le causan, ya que los productos deshidratados con aire caliente tienden a experimentar encogimiento y a colapsar el tejido, características que retardan el proceso de rehidratación y cambian el aspecto agradable del producto. La liofilización es, sin duda, la mejor opción para secar este sensible y delicado alimento, permitiendo que el aguacate conserve sus características sensoriales y nutricionales (Oliveira, 1999).

En la actualidad Arrioloa-Guevara han estudiado el comportamiento del aguacate al rehidratarlo, realizando pruebas de capacidad y cinéticas de rehidratación. Sin embargo, todavía no existe evidencia bibliográfica en relación con la micoestructura y la geometría fractal, como herramientas utilizadas para poder caracterizar el polvo de aguacate (Aguilera y Stanley 2000; Peleg, 1993)

## 2 ANTECEDENTES

En la última década, ha habido un aumento continuo en la demanda de alimentos instantáneos, incluyendo los productos deshidratados, esto se debe principalmente a los estilos de vida modernos. Esta tendencia ha sido acompañada de una disminución en el deseo y la falta de tiempo para preparar los alimentos, además del incremento en el poder adquisitivo de los consumidores para adquirir alimentos que sean de fácil acceso y con un requerimiento mínimo para su preparación. Uno de los métodos utilizados para producir alimentos instantáneos es la deshidratación, los alimentos secos resultantes presentan ventajas, como un costo de transporte bajo, una vida de anaquel larga y la facilidad de uso. Este último representa una importante expectativa para los consumidores ya que necesitan que el producto deshidratado se mezcle, o cocine durante un periodo corto de tiempo a fin de lograr la rehidratación y la reconstitución del producto. Sin embargo, hay que tomar en cuenta los parámetros de calidad más importantes asociados con los alimentos secos, los cuales son el cambio de color y atractivo visual, sabor, olor, carga microbiana, porosidad, textura, aditivos y conservadores. Estos parámetros deben cumplir con los reglamentos de los diferentes países y a menudo puede afectar negativamente a la aceptabilidad de los productos secos (Conrad., 2005). En la actualidad se utilizan numerosos productos deshidratados, entre ellos se encuentran algunos vegetales que son utilizados ampliamente en sopas instantáneas, además de granos de cereales, carnes, pescados y frutas que se rehidratan por lo general en agua o soluciones salinas o azucaradas (Ratti., 2000).

## 2.1 Generalidades sobre el Aguacate

El aguacate (*Persea americana* Mill.) pertenece a la familia Lauraceae, una de las más antiguas en nuestro planeta. Comprende poco más de 50 géneros y unas 2,200 especies. El aguacate se clasifica dentro del género *Persea*. En el género *Persea* se reconocen tres especies *P.americana* Mill., *P. schiedeana* Nees y *P. parvifolia* Williams. La mayoría de los miembros reconocidos de este género se encuentran principalmente en una misma área que inicia del centro de México hasta Panamá en Centroamérica. Los hallazgos de aguacates primitivos desde la Sierra Madre Oriental en el estado de Nuevo León México, hasta Costa Rica en Centroamérica, apoyan la hipótesis de que se trata de un centro de origen del aguacate y probablemente de todo el subgénero *Persea* (Sánchez-Pérez., 2007). México es el principal productor y consumidor de aguacate en todo el mundo con una producción anual aproximada de 1, 127,574.3 toneladas anuales. El estado de Michoacán es el productor más importante con una producción anual de 1, 012,667.6 toneladas una superficie de cultivo de 78.530 has. Actualmente México es el principal exportador de aguacate a nivel mundial (SAGARPA 2007).



**Figura 1 .Aguacate variedad criollo (Claridades Agropecuarias 2002)**

El aguacate es en la actualidad uno de los cultivos más importantes en México no sólo por la cantidad de toneladas producidas, que lo ubica como el productor más importante a nivel mundial sino también porque es un cultivo que genera miles de empleos directos e indirectos y permite una alta entrada de divisas por la exportación de su fruto (López y cols, 2007). Además posee valiosas propiedades alimenticias por su alto contenido de aceite (12-30%) y proteína (3-4%), contiene hidratos de carbono, vitaminas y minerales. Estas propiedades le confieren grandes posibilidades para el aumento en su consumo en la dieta humana. En los últimos años se ha desarrollado su industrialización en la producción de alimentos, extracción de aceites y productos farmacológicos (Rodríguez, 1992., Ortiz y col., 2004., Kritchevsky y Tepper 2003).

## **2.2 Importancia de los alimentos deshidratados**

El agua es el principal componente de los alimentos, ayudándoles a mantener su frescura, sabor, textura y color. La deshidratación a través de la historia es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para la conservación de alimentos, esta técnica de conservación trata de preservar la calidad de los alimentos bajando la actividad de agua mediante la disminución del contenido de humedad, evitando así el deterioro y contaminación microbiológica de los mismos durante su almacenamiento.

Hay que tomar en cuenta que las operaciones previas a la deshidratación, llamadas pretratamientos, tienen influencia marcada sobre las características y composición del producto rehidratado estos pretratamientos evitan mayores pérdidas de sólidos solubles hacia el medio de rehidratación (Lewicki, 1998). Para hacer uso de alimentos deshidratados es necesario proceder a su rehidratación. La rapidez y facilidad con que pueda desarrollarse esta operación marca la calidad del producto deshidratado (Bello, 2000). Al igual que para el secado la eficiencia de rehidratación depende en gran parte, del tipo de producto y sus características (tamaño, geometría, composición del alimento,

contenido de humedad porosidad), así como los factores relativos al medio de inmersión: temperatura, agitación y composición.

Desde el punto de vista comercial una importante ventaja de utilizar esta técnica, es que al convertir un alimento fresco en uno procesado (deshidratado) se añade valor agregado a la materia prima utilizada. Además se reducen los costos de transporte, distribución y almacenaje, debido a la reducción de peso y volumen del producto fresco (Toledo, 1994).

### **2.3 Alimentos en polvo**

Existe una gran cantidad de alimentos en polvo procesados, que tienen las ventajas de mayor vida de anaquel, transportación fácil y un consumo más accesible. Para ello se pueden utilizar varios métodos de deshidratación o combinación de los mismos, tales como secado solar, aire caliente, microondas, liofilización, atomización, deshidratación osmótica, entre otros (Vega, 2006). No obstante para obtener alimentos deshidratados de buena calidad es necesario estudiar los fenómenos de transferencia de materia y energía, así como los cambios producidos a nivel textural y estructural (porosidad, firmeza, encogimiento) además de la migración de solutos y la pérdida de compuestos volátiles y de los nutrientes que se producen de forma irreversible y tiene un impacto en la calidad del producto final. La reconstitución de los polvos debe ser rápida, fácil y completa en el agua u otros medios líquidos mostrando características estructurales y bioquímicas adecuadas. (Yan y Barbosa-Canovas, 2000; Hoge Kamp y Schubert, 2003).

La deshidratación o secado es una operación de transferencia de calor y masa en la que se elimina la mayor parte de la humedad presente en el material. En el caso de materiales en polvo, las condiciones de secado y las propiedades de la alimentación determinan las características de la rehidratación y la morfología de los materiales obtenidos. La característica más deseable de un alimento en polvo es que cuando se reconstituye, el producto líquido sea tan similar al original como

sea posible (Aguilera y cols. 2003). La magnitud de la rehidratación puede ser utilizada como un indicador de la calidad de los alimentos en polvo ya que los alimentos que se secan en las mejores condiciones sufren menos daño y se rehidratan más rápida y completamente.

## **2.4 Liofilización**

La liofilización o secado por congelación es un proceso de secado, en el cual el agua es sublimada directamente de un material previamente congelado. Las ventajas de este proceso son la relativa facilidad de procesar un líquido, la estabilidad mejorada de un polvo seco y a menudo, disolución rápida que ocurre después de la reconstitución o rehidratación de la “pastilla liofilizada”. Así, una liofilización exitosa depende del conocimiento acerca del comportamiento del producto y sus condiciones de manufactura a usarse, así cualquier aditivo, agente formador etc., altera las características de congelación y por tanto las condiciones de liofilización a ser aplicadas; la solución que se liofilizará debe ser formulada de modo que la “pastilla” obtenida después de secar tenga las siguientes características:

- ❖ Invariable con respecto a su actividad biológica, al ser reconstituida
- ❖ Disolución rápida al ser reconstituida
- ❖ Suficientemente fuerte (compacta) para prevenir el agrietamiento y la pulverización
- ❖ Color uniforme
- ❖ Invariable con respecto a su forma y tamaño comparada con la masa congelada de la cual provino.

Los productos liofilizados suelen tener un contenido de humedad muy bajo cercano al 5%, pero estas técnicas son muy costosas; sin embargo, al rehidratar estos productos liofilizados se obtienen productos muy parecidos a los originales, con un mayor valor nutritivo y cualidades sensoriales similares a

los del alimento fresco, si se comparan con oras técnicas de secado (Barbosa-Cánovas y Vega-Mercado 2000)

## **2.5 Antecedentes generales de la rehidratación de alimentos**

Es importante considerar que la rehidratación no es proceso inverso de la deshidratación, ya que ambos fenómenos tienen diferentes mecanismos de transferencia de materia y dependen de factores distintos, además es el primer paso en la incorporación de ingredientes funcionales de los alimentos ayudando a restaurar las propiedades del alimento deshidratado (Hogekamp y Schubert 2003). La rehidratación es usualmente descrita como la cantidad de agua que es absorbida por una cantidad definida de polvo (Lamiot y cols., 1998). También se puede considerar como una medida del daño ocasionado en el alimento ocurrido durante la deshidratación. (Weerts y cols., 2006).

Durante el proceso de rehidratación el material seco que se sumerge en agua o algún otro medio acuoso sufre diferentes cambios fisicoquímicos simultáneos (ejemplo: contenido de sólidos, porosidad, gelatinización y textura), además de tener varios procesos en paralelo incluyendo el transporte del líquido a través de la red porosa y difusión a través de la matriz sólida, el hinchamiento del material donde el cambio del volumen del producto deshidratado es proporcional a la cantidad de agua absorbida, aumentando o recuperando su tamaño y volumen inicial (Lewicki, 1998).

Como resultado de todos estos procesos la rehidratación de alimentos es un fenómeno complejo que involucra diferentes mecanismos de acción. En cuanto a la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación se puede mencionar que el agua (o solución hidratante) es absorbida más rápidamente al inicio del proceso, luego disminuye gradualmente la absorción hasta que el contenido de humedad alcanza su equilibrio, esto es cuando todos los espacios queden saturados con agua o con solución hidratante.

Así, la absorción de agua por parte de los tejidos del alimento deshidratado aumenta el volumen del mismo, junto con una salida de los sólidos desde el interior de los tejidos (Krokida, y cols., 2003).

Debe hacerse una distinción importante entre dos términos que se utilizan a menudo en la literatura, el primer término es la Rehidratación que se refiere a la cantidad de agua que un alimento seco es capaz de absorber en un periodo determinado de tiempo y está relacionado con las cinéticas y tecnologías del proceso. El segundo término es la Reconstitución que caracteriza el estado del producto después de la absorción de líquidos y está relacionado con los aspectos sensoriales del proceso. Hay que tener en cuenta que en la mayoría de los casos el objetivo es acortar el tiempo de rehidratación y la reconstitución para minimizar el esfuerzo requerido por el consumidor para lograr una comida rápida y sabrosa.

La calidad final del producto rehidratado se ve afectada por algunas operaciones realizadas durante el secado; para poder evaluar esta calidad comúnmente se utilizan índices numéricos para observar este efecto. Entre estos indicadores destacan la capacidad de rehidratación la cual se refiere a la cantidad máxima de agua que el producto es capaz de tomar en la inmersión, y la velocidad de rehidratación que tiene que ver con la estructura, usualmente la velocidad de rehidratación disminuye con el tiempo de inmersión y su valor inicial es muy importante para caracterizar los productos que son sujetos a periodos cortos de inmersión (SanJuan y cols., 2001).

### **2.5.1 Propiedades de rehidratación de alimentos en polvo**

Una mejor comprensión del proceso de deshidratación de polvos, facilita la predicción de su cinética y fundamentalmente los mecanismos que gobiernan la rehidratación de polvos, donde rehidratación es la cantidad de agua que es incorporada por una cantidad definida de polvo.

En la gran mayoría de los casos, los alimentos en polvo están destinados a la rehidratación con agua. Un polvo ideal debe ser humedecido con rapidez en la primera fase, llamada humectación. En esta fase el líquido penetra dentro de los poros del material, antes de que las películas se encuentren debajo de la superficie del líquido, o sea cuando éstas se hundan en él; presentándose la segunda fase, a lo que se conoce como hundimiento que representa la capacidad del polvo para sumergirse en el disolvente.

Posteriormente, las partículas se dispersan debido a la energía de baja intensidad a esta tercer fase se le conoce como dispersión. Finalmente en la última fase las partículas se transportan dentro de la solución haciéndolas solubles en el líquido en un corto periodo de tiempo sin la formación de grumos, lo que se le conoce como solubilidad (Schubert, 1987, Lamiont y Pouliot, 1988; Hoge Kamp y Schubert, 2003).

Este comportamiento ideal es difícil de lograr, ya que los procesos de fabricación suelen arrojar partículas de tamaño más bien pequeño y / o estructura desfavorable. La presencia de grasa o aceite puede disminuir aún más la capacidad de humectación

### **2.5.2. Humectabilidad (Mojabilidad)**

La humectabilidad o mojabilidad se define como la tendencia de un fluido a adherirse a una superficie sólida en presencia de otros fluidos inmiscibles, tratando de ocupar la mayor área de contacto posible sobre dicho sólido. La mojabilidad está en función del tipo de fluido (agua) y de la superficie sólida (un medio poroso).

La humectabilidad es una medida de las propiedades hidrofílicas, que describe la preferencia de un sólido a ser mojado por un cierto fluido, cuando este fluido se encuentra presente y el tiempo de humectación puede ser expresado en función del tamaño de la partícula. La superficie de un material mojable por agua está revestida de una película la cual forma una capa eléctrica doble de agua. La primera capa de agua con estos iones es estática y la segunda capa intercambia iones con el agua. Cuando dos interfaces tales como las interfaces sólido-agua y agua-lípidos se encuentran próximas entre sí las fuerzas que actúan para mantenerlas separadas o acercarlas comprenden interacciones de Van der Waals electrostática, estructurales o de solvatación (Abdallah, 2007). Una humectabilidad es favorecida por el grado de porosidad de la partícula ya que entre más porosas sean, se incrementa la capacidad del material de absorber líquidos o vapores. El grado de porosidad puede ser causado por el estrés producido por algún mecanismo al que está expuesta la partícula, tal como transferencia de masa y calor durante el proceso de secado. Así, una humectabilidad baja produce una disolución baja y está relacionada con un decremento de la solubilidad a causa de una densidad baja del polvo (Jha y col; 2002; Hogekamp y Schubert 2003; Marabi y col, 2004; Niro, 2005). La humectabilidad es consecuencia directa de interacciones moleculares entre las fases en contacto. Si las fuerzas adhesivas sólido-líquido son fuertes, como las fuerzas cohesivas de un sólido, la humectabilidad puede ocurrir espontáneamente (Lamiont y col, 1988; Hogekam y Schubert 2003).

## **2.6 Tamaño y distribución de partícula**

La distribución del tamaño de partícula es una de las características importantes en productos alimenticios que presentan mezclas.

El primer paso en la caracterización de una partícula, es la determinación de su tamaño; la dimensión característica de una partícula, depende del método usado para medirla. En el caso de una esfera, el diámetro la caracteriza totalmente, pero para partículas irregulares la descripción es más compleja. El problema se podría resolver si se relaciona la dimensión evaluada con la de una esfera de diámetro, perímetro o volumen equivalente al de la partícula (Yang y Rodríguez, 2001).

Los métodos para expresar el tamaño de partícula dependen del instrumento de medición utilizado. Uno de los más comunes es el tamiz convencional. En este caso, los sólidos particulados se colocan en la parte superior de una serie de mallas, las cuales tienen aberturas pequeñas que van disminuyendo de tamaño y al vibrar las partículas caen a través de ellas hasta alcanzar un tamiz en el que las aberturas son demasiado pequeñas para que pase la partícula. El tamaño de las mismas se expresa como una longitud media apropiada entre las aberturas del tamiz anterior y el que retiene la partícula. Los tamices convencionales son la serie Tyler y o la serie U.S. (Foust, 1993)

## **2.7 Microestructura**

La microestructura de un alimento muestra la organización de sus elementos estructurales y la interacción entre ellos. Durante el procesado de un alimentos su microestructura puede modificarse, destruirse, reconstruirse, etc. Estos cambios en la estructura se pueden visualizar por distintas técnicas microscópicas (microscopía de fluorescencia, microscopía de transmisión y microscopía de barrido) y el análisis de imágenes, que permiten entender mejor la relación entre estructura y las propiedades de los alimentos (Aguilera y Stanley, 2000). Así los

alimentos pueden tener composición química similar y manifestar comportamientos totalmente diferentes dependiendo de la estructura que se le haya impartido a través de su procesado (Aguilera y cols., 1999). Por este motivo la descripción estructural de los tejidos frescos resulta imprescindible para el análisis comparativo de las alteraciones estructurales causadas por distintos tratamientos, por ejemplo temperaturas altas o bajas (Otwell y Gidding, 1980) alimentos en polvo y su relación con propiedades de rehidratación y los efectos que tienen los tratamientos térmicos sobre semillas de higuera para beneficiar la extracción de aceite y la producción de biodiesel (Perea y Dominguez, 2009).

## **2.8 Procesamiento digital de imágenes**

### **2.8.1 Generalidades del análisis de imágenes**

El analizar una imagen tiene como fin, la cuantificación de las propiedades de los objetos, a través de los elementos que los componen, su origen y naturaleza (Lira, 2002). Es por esta razón que se considera una herramienta útil para determinar características morfológicas de las células y otros materiales biológicos además de tener ventajas sobre observaciones hechas de manera directa debido a que por medio de ella se obtienen evaluaciones objetivas, es una técnica no destructiva, permite realizar mediciones *in situ*, además de que puede automatizarse, se obtiene información diversa a partir de la toma de una sola medida, es relativamente económica ya que no consume reactivos, es susceptible de reducir al mínimo la intervención humana y puede aportar información sobre la textura y morfología de las superficies (Jiménez, 2005).

Actualmente existen distintas técnicas no destructivas para el análisis de los alimentos, un ejemplo es el uso de sistemas de visión por computadora en donde se requiere una cámara o algún dispositivo para adquirir una imagen y de software computacionales para analizar dichas imágenes y extraer características morfológicas o de textura y posteriormente clasificar los alimentos mediante el uso

de redes neuronales u otros sistemas de clasificación automática. (Burtz y Hoffman., 2005).

Recientemente las técnicas de análisis de imágenes han tenido un gran desarrollo, debido a que pueden caracterizar cuantitativamente características de tamaño, forma, color y propiedades de textura en los alimentos. Debido a esto cada vez son más importantes dentro de la evaluación de la calidad de los alimentos ya que son sistemas eficientes y exactos.

Por otra parte las técnicas de análisis de imágenes son frecuentemente combinadas con sistemas mecánicos e instrumentales que reemplazan la manipulación humana con el fin de hacer más eficaces los procesos; por ejemplo Cheng-Jin y Da-Wen, 2004),desarrollaron un sistema automatizado para detectar defectos en la superficie de manzanas.

Otras de las aplicaciones de la técnica de análisis de imágenes son: detección de defectos, identificación, clasificación de frutas, vegetales, carne, pescado, productos de panificación, y preparados alimenticios (Pedreschi, y cols. 2004).

Mendoza y Aguilera (2004) implementaron un sistema de visión por computadora para identificar las etapas de maduración de plátanos basándose en el color, el desarrollo de puntos cafés y en la textura de la imagen, los resultados encontrados mostraron que existen pequeñas variaciones en los datos de color y de apariencia, y que esta es una técnica simple de clasificación muy confiable para identificar las etapas de maduración del plátano en lugar de la percepción visual. Usando las coordenadas de color  $L^*a^*b^*$ , el porcentaje de área color café y el contraste, fue posible clasificar una muestra de 49 plátanos en 7 etapas de maduración con una exactitud del 98 %.

Pedreschi y cols. (2004) propusieron un patrón de reconocimiento para clasificar papas fritas en diferentes condiciones: 2 pretratamientos (blanqueado y no

blanqueado) y a 3 temperaturas (120 ° C, 150 ° C, 180 ° C). Obtuvieron más de 1500 características de las imágenes, y finalmente seleccionaron 11 para clasificar las muestras estableciendo 6 clases de papas con una exactitud del 95 %.

### 2.8.2 Etapas de la técnica de análisis de imágenes

Pedreschi y cols (2004) describe generalmente la técnica de análisis de imágenes que consiste en cinco etapas las cuales se muestran en la Figura 2. Se inicia con la adquisición de imágenes en forma digital; posteriormente se hace el pre-procesamiento para obtener mejores imágenes con las mismas dimensiones de la imagen original; seguido de la segmentación para dividir la imagen digital en regiones; a continuación se miden las características de tamaño, forma, color y textura; y finalmente se hace la identificación y clasificación en grupos (Cheng-Jin y Da-Wen, 2004). Es importante señalar que para este trabajo “procesamiento de imágenes” y “análisis de imágenes” son usados como sinónimos.

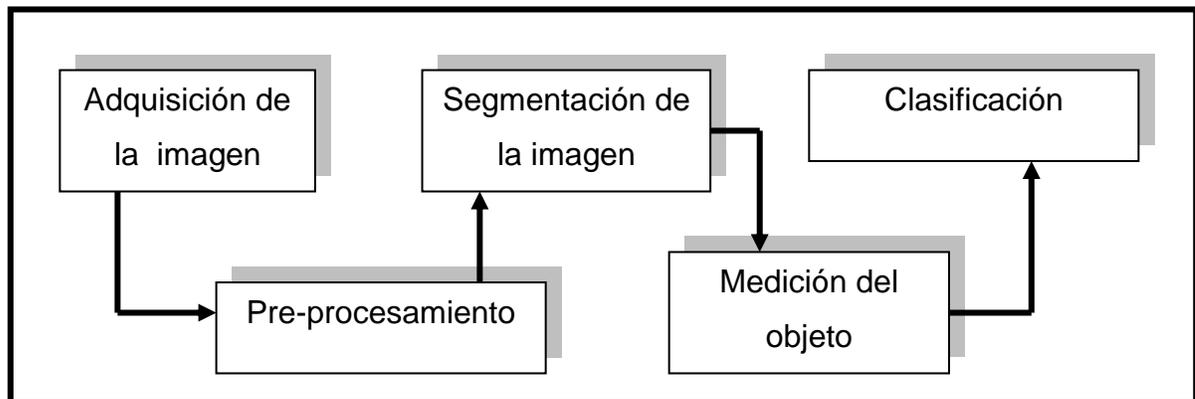


Figura 2. Diagrama del análisis de imágenes (Cheng-Jin y Da-Wen, 2004).

### **2.8.2.1 Adquisición de la imagen**

La calidad de la imagen capturada puede ser afectada en gran medida por la intensidad de la iluminación y la orientación relativa de la fuente de iluminación por que las escalas de grises de los pixeles no sólo determinan las características de textura de la superficie, sino también estos dos parámetros. Una imagen de alta calidad puede ayudar a reducir el tiempo en el procesamiento en las siguientes etapas del análisis de imágenes y en consecuencia a reducir los costos del sistema de análisis de imágenes.

Actualmente existen varios sensores para la adquisición de imágenes en forma digital, como una cámara con dispositivo de carga acoplado (CCD por sus siglas en inglés). Las cámaras con CCD son empleadas en las técnicas de análisis de imágenes para evaluar atributos de calidad externos como tamaño, forma, color, características de textura y defectos. Típicamente la imagen de una cámara digital está formada por tres canales digitales: rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés); y esta imagen a su vez puede convertirse a escala de grises para simplificar la complejidad de la imagen (Cheng-Jin y Da-Wen., 2004).

La cámara con CCD es ampliamente utilizada en la clasificación de la calidad, detección de características físicas y en la estimación de propiedades en productos alimenticios. En el Cuadro 1 se muestra un resumen de las aplicaciones de las cámaras con CCD para la evaluación de la calidad de alimentos (Cheng-Jin y Da-Wen, 2004).

**Cuadro 1. Aplicaciones de las cámaras con CCD para la evaluación de la calidad de alimentos (Cheng-Jin y Da-Wen, 2004).**

<b>Categoría</b>	<b>Productos</b>	<b>Aplicaciones</b>
Pescadería	Pescado	Clasificación de pescado
Frutas	Manzana	Segmentación de defectos
	Cerezas	Análisis de la forma de la fruta
Cereales	Arroz	Clasificación de calidad
	Trigo	Clasificación
Carne	Carne	Usando características de textura como indicadores de ternura
Vegetales	Espárragos	Inspección de defectos
Otros	Queso	Evaluación de las propiedades funcionales
	Pizza	Evaluación de calidad

### **2.8.2.2 Pre-procesamiento de la imagen**

El propósito del pre-procesamiento de la imagen es mejorar los datos de la imagen para disminuir distorsiones o realzar algunas características de la imagen que son importantes para su futuro procesamiento y con esto crear una imagen mejor a la original. Existen dos propuestas para el pre-procesamiento de imágenes, el pre-procesamiento por pixel y el pre-procesamiento local.

El fundamento de estas dos técnicas es similar en donde se usa un filtro digital, para remover los ruidos de la imagen y mejorar el contraste en adición a este paso el color de la imagen es convertido a escala de grises y a esto se le conoce como intensidad de la imagen.

### **2.8.2.3 Segmentación de la imagen**

La segmentación de la imagen consiste en identificar regiones de la imagen con el propósito de separar aquellas regiones de interés del fondo; para la evaluación de la calidad de los alimentos existen cuatro propuestas para realizar la segmentación de la imagen pero sólo dos son las más utilizadas: la segmentación basada en el thresholding y la segmentación basada en la región. La primera consiste en separar objetos del mismo tono de gris del fondo y la segunda separar regiones que tengan un mismo tono en escala de grises del fondo (Cheng-Jin y Da-Wen., 2004).

### **2.8.2.4 Medición de las características del objeto**

Después de detectar aquellas zonas de interés, el siguiente paso es la extracción de las características del objeto bajo estudio que se pueden clasificar en cuatro clases: tamaño, forma, color y textura (Cheng-Jin y Da-Wen., 2004).

#### **2.8.2.4.1 Tamaño**

Comúnmente los parámetros utilizados para medir el tamaño de un objeto son el área, perímetro, longitud y diámetro; pero la medición más conveniente para evaluar este parámetro es el área. Por otra parte, el diámetro de un objeto se utiliza para discriminar entre dos objetos de formas diferentes.

#### **2.8.2.4.2 Forma**

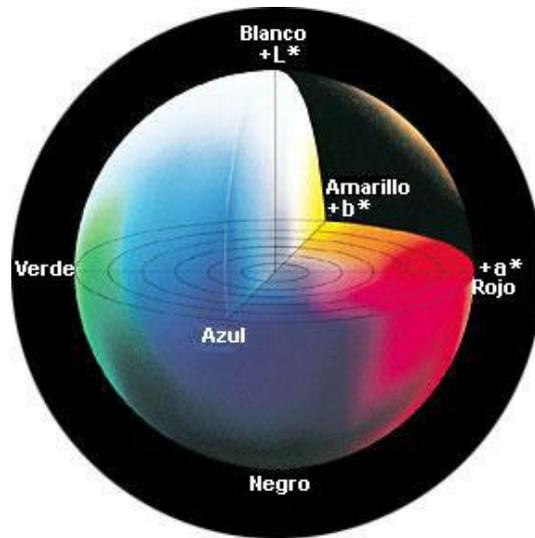
La medición de la forma es fácil, sí se utiliza el análisis de imágenes. Frecuentemente los objetos de una clase pueden distinguirse de otros por sus formas ya que estas son mediciones físicas características.

Miller (1992) aplico un sistema de imágenes digitales en el análisis de uvas de Florida para su clasificación en base a la forma, en esta aplicación 4 características fueron evaluadas: área, radio, circularidad y rango de diámetros (Cheng-Jin y Da-Wen, 2004).

#### **2.8.2.4.3 Color**

El empleo del análisis de imágenes para medir el color en alimentos es una técnica alternativa y no destructiva, y con la ventaja de que se pueden realizar mediciones de color en los distintos espacios de color y a su vez realizar conversiones entre los espacios.

Para realizar la medición de color en una imagen es necesario seleccionar un espacio de color, existen cuatro espacios de color que son los más utilizados  $L^* a^* b^*$ , RGB (red, green, blue), XYZ y el CMYK (cyan, magenta, yellow y black). El espacio de color  $L^* a^* b^*$  es el que más se utiliza para medir el color en alimentos, este espacio de color es una medición de color estándar internacional, adoptada por la "Commission Internationale d'Eclairage" (CIE) en 1976. Una de las ventajas de este espacio de color es que crea siempre un color constante, sin importar el tipo de dispositivo para generar la imagen. En este espacio  $L^*$  significa luminosidad y su rango es de 0-100, los parámetros  $a^*$  (de verde a rojo) y  $b^*$  (de azul a amarillo) son dos componentes cromáticos y su intervalo de valores va de -120 a 120 (Pedreschi y col., 2004; Papadakis, y Abdul 2000; Mendoza y Aguilera, 2004).



**Figura 3. Representación tridimensional del espacio de color  $L^*a^*b^*$  (Konica Minolta, 2007).**

#### 2.8.2.4.4. Textura

La textura de una imagen está caracterizada por la distribución espacial de los niveles de grises en una zona, y está definida por patrones repetitivos en las variaciones de la escala de grises de un pixel a otro. La textura de una imagen ha sido utilizada para describir propiedades tales como regularidad u homogeneidad. Existen distintas características de textura que se pueden extraer de una imagen a continuación se muestran algunas, es importante señalar que estas están basadas en niveles de grises (Pedreschi y cols., 2004).

##### ❖ Segundo Momento Angular.

El Segundo Momento Angular (ASM) es una característica que mide la homogeneidad de la distribución de los pixeles de una imagen. Una imagen con una distribución de pixeles homogénea presenta mayores valores de segundo momento angular mientras que una imagen con una distribución de pixeles no homogénea proporciona valores de segundo momento angular menores.

La fórmula que se utiliza para calcularla es:

$$f = \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^{Ng} \left( \frac{P(i, j)}{R} \right)^2$$

Donde: Ng es el número de tonos de grises de la imagen, y P (i, j) es la iesima matriz de dependencia espacial en escala de grises y R es una constante.

#### ❖ Entropía Digital.

La entropía de una imagen es una medida del desorden o aleatoriedad de la distribución de píxeles de una imagen, es un indicador de la complejidad de la imagen. Una imagen compleja presenta mayores valores de entropía mientras que una imagen con una distribución de píxeles ordenada o de menor complejidad proporciona valores de entropía menores. La entropía de una imagen puede estimarse desde una matriz de co-ocurrencia en escala de grises (GLMC, por sus siglas en inglés Grey Level Matix co-occurrence), se determina mediante la siguiente función:

$$f = -\sum_i \sum_j p(i, j) \text{Log}\{p(i, j)\}$$

Donde:  $p(i, j)$  es la frecuencia relativa de ocurrencia de dos valores de píxeles uno con intensidad  $i$  y el otro con intensidad  $j$ . Como ya se ha mencionado la entropía es la medida del desorden o aleatoriedad de una imagen, es decir, en texturas más complejas se pueden encontrar valores mayores de entropía

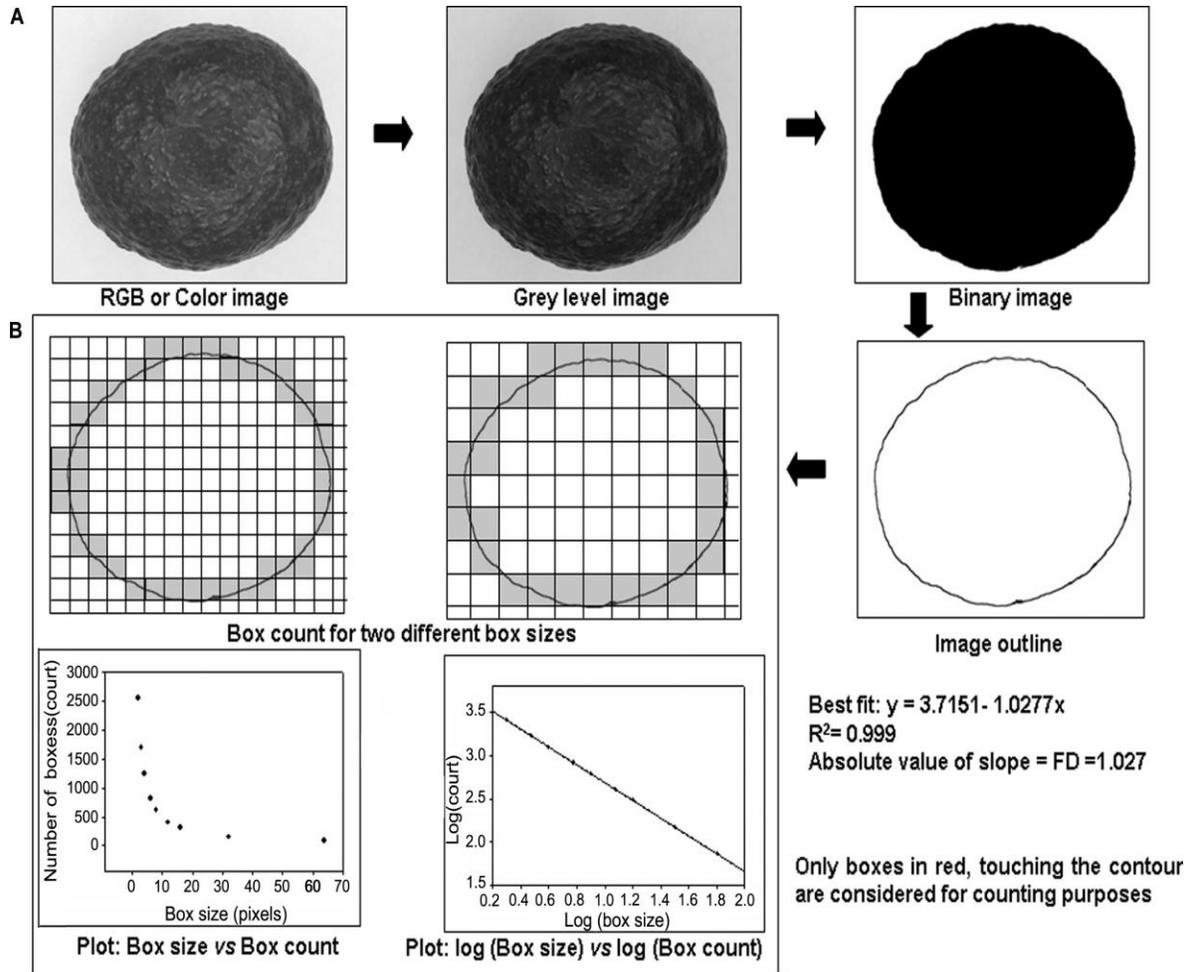
## ❖ Dimensión Fractal.

Fractal es una palabra inventada por Mandelbrot, que proviene del latín *fractus* que significa roto y el correspondiente verbo en Latin *frangere* que significa “romper para crear fragmentos irregulares”. La descripción de los objetos irregulares fue desarrollada ampliamente desde el punto de vista de la teoría fractal por Mandelbrot en su obra titulada *The Fractal Geometry of Nature*, en donde se refiere a la geometría de lo irregular o formas fragmentadas de objetos naturalmente comunes tales como líneas costeras, nubes y objetos matemáticos que tienen dimensiones no enteras, por lo tanto la dimensión fractal tiene valores no enteros (Chanona y cols., 2001).

Una definición intuitiva de la dimensión de un objeto, es el número mínimo de coordenadas necesarias para especificar la posición de un punto contenido en un objeto; esta definición de dimensión es llamada dimensión Euclidiana y se le denota con el símbolo  $E$  y siempre toma valores enteros, por ejemplo, un punto tiene una dimensión de uno, un área de dos, y un volumen de tres. Entonces se puede decir que 1, 2 y 3 son las dimensiones del perímetro, área y volumen respectivamente (Chanona y cols., 2001).

Cuando se determina la dimensión de objetos lisos o regulares se usa una relación logarítmica en un grafico de  $\log P$ ,  $\log A$ , o  $\log V$  vs.  $\log R$ , donde,  $P$  es el perímetro,  $A$  el área,  $V$  el volumen y  $R$  el radio. La pendiente de estas curvas es la dimensión fractal, que para objetos regulares toma el mismo valor de la dimensión Euclidiana y para objetos irregulares toma valores no enteros (Chanona y cols., 2001)

En términos matemáticos la geometría fractal se ocupa de analizar subconjuntos de espacios métricos llamados fractales, los cuales guardan una estructura autosimilar a diferentes escalas de observación. Para calcular la dimensión fractal de estos cuerpos existen distintos métodos, uno de ellos es el método de conteo de cajas el cual consiste en la determinación de perímetros o áreas de una imagen usando un algoritmo de geometría cuadrangular (caja o celda) de diferentes tamaños, con el cual se mide el perímetro o área que ocupa el objeto. En la Figura 4. se muestra el procedimiento general para el método de conteo de cajas. Los valores obtenidos del número de cajas ( $N$ ) contra el tamaño de la caja ( $r$ ); se representa en un gráfico logarítmico, y la pendiente de este gráfico es la dimensión fractal (Chanona, 2004). Teniendo imágenes en escala de grises se pueden formar superficies tridimensionales que representan a esas imágenes, y a estas superficies se les puede calcular la dimensión fractal que representaría el grado de complejidad de la superficie y por lo tanto de la imagen.



**Figura 4. Procesamiento de imagen (A) y un ejemplo del método de conteo de cajas (B), para determinar la dimensión fractal (FD) de contorno de la imagen de aguacate ejemplo tomado de Santacruz y cols.,2007**

### 2.8.2.5 Clasificación

Las características extraídas de cada región son analizadas y asignadas a una clase definida, la cual representa todos los posibles tipos de regiones esperadas en la imagen. Un clasificador está diseñado siguiendo una prueba supervisada, y clasificadores simples pueden ser implementados para comparar características medidas con valores umbral. Estas clasificaciones pueden ser estadísticas o mediante el uso de redes neuronales (Cheng-Jin y Da-Wen, 2004; Pedreschi, y cols., 2004).

### **3 JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de productos nuevos de aguacate a base de fruta deshidratada, de alta calidad, con una vida útil razonable, resultaría interesante para ampliar y diversificar su disponibilidad en el mercado. Aun cuando México es el principal productor de este fruto su calidad y precio tiene variaciones durante el año, por lo que es necesario crear una pasta de aguacate deshidratada la cual pueda ser rehidratada conservando las características de calidad del producto fresco.

Una alternativa para obtener este polvo es por medio de la liofilización este proceso es costoso debido a la velocidad lenta de secado y el uso de vacío y congelación. Sin embargo, se obtienen productos de alta calidad que no se obtiene con cualquier otro método de secado.

También es relevante que la rehidratación sea lo más rápido posible y que muestre las mismas características estructurales, químicas y cambios microestructurales de un alimento fresco, así como sus propiedades nutricionales y sensoriales. Para lograr esto es necesario estudiar el proceso de humectación (etapa de la rehidratación), aplicando diferentes técnicas de microscopía y análisis de imagen y fractal.

## 4. OBJETIVO

### General

Evaluar el proceso de humectación del liofilizado de aguacate criollo (*Persea americana Mill variedad Drimifolya*) mediante el análisis de imagen, y geometría fractal.

### Particulares

- 1) Determinar el grado de humectación y rehidratación del polvo liofilizado a través de análisis de imágenes por mojado directo.
- 2) Determinar las variaciones en los parámetros de cromaticidad  $a^*$   $b^*$  y  $L^*$  en partículas del liofilizado con diferente grado de humectación.
- 3) Determinar la dimensión fractal de textura y de contorno de las partículas del liofilizado de aguacate con y sin aceite.
- 4) Determinar la relación entre la dimensión fractal de contorno y el tamaño de partícula.
- 5) Determinar la cinética de extracción de aceite a diferentes tiempos y tamaños de partícula.
- 6) Obtener los parámetros de textura mediante análisis de imágenes (Entropía, segundo momento angular y dimensión fractal) para partículas de liofilizado a diferentes tiempos de extracción del aceite.
- 7) Determinar la dimensión fractal de textura de partículas sin aceite, secas y rehidratadas.

## 5 MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1 Materia prima

Pasta de aguacate variedad criollo (*Persea americana Mill var .Drimifolya*) liofilizada. El aguacate se obtuvo de un mercado de la ciudad de México. El fruto se lavó con jabón y agua corriente, se desmondó manualmente, la pulpa fue homogeneizada en un mortero para después llevar a cabo un tratamiento con microondas.

### 5.2.-Equipo

- Cámara digital modelo L110 de 8.2 Megapíxeles marca Samsung
- Microscopio óptico Nikon, eclipse 50 I, Japón.
- Microscopio estereoscópico, Nikon SMZ 1500, Japón.
- Termo balanza, Brainweigh, modelo MB300, USA.
- Balanza Analítica Ohaus Corporation Analytical Plus, EUA.
- Agitador de Mallas, RX-86, 19869 W. Tyler. USA.
- Microscopio electrónico de barrido JEOL, modelo JBM-5900LV.
- Cromatógrafo de Líquidos de alta resolución HP modelo 1050, Agillet.
- Cromatógrafo de gases marca Perkin Elmer, modelo Autosystem.
- Liofilizadora labconco, modelo 7751000

### 5.3 Programas de cómputo

- Image J 1.32j (National Institutes of Health, USA.)
- NIS-Elements F 2.30
- Sigmastat v.3.5 (Systat Software. USA)
- SigmaPlot v. 10 (SPSS inc. USA).
- DVDVideo Sorft
- Programa para captura de fotos y video Marca Steren

#### **5.4 Liofilización de la pasta de aguacate**

La pulpa obtenida se deshidrató empleando el método de liofilización, las muestras se congelaron durante 21 horas a -20° C y se liofilizaron durante 8 horas con una presión de  $125 \times 10^{-3}$  mBar y una temperatura del colector de -40 ° C.

#### **5.5 Análisis Proximal**

A la pasta de aguacate liofilizada se le realizó el análisis proximal con las siguientes técnicas: Humedad: NOM-086-SSA1-1994. Apéndice Normativo C.1.1.3.1; Cenizas: NMX-F-608-NORMEX-2002; Grasa NOM-116-SSA1-1994; Proteína: NMX-F-607-NORMEX-2002.

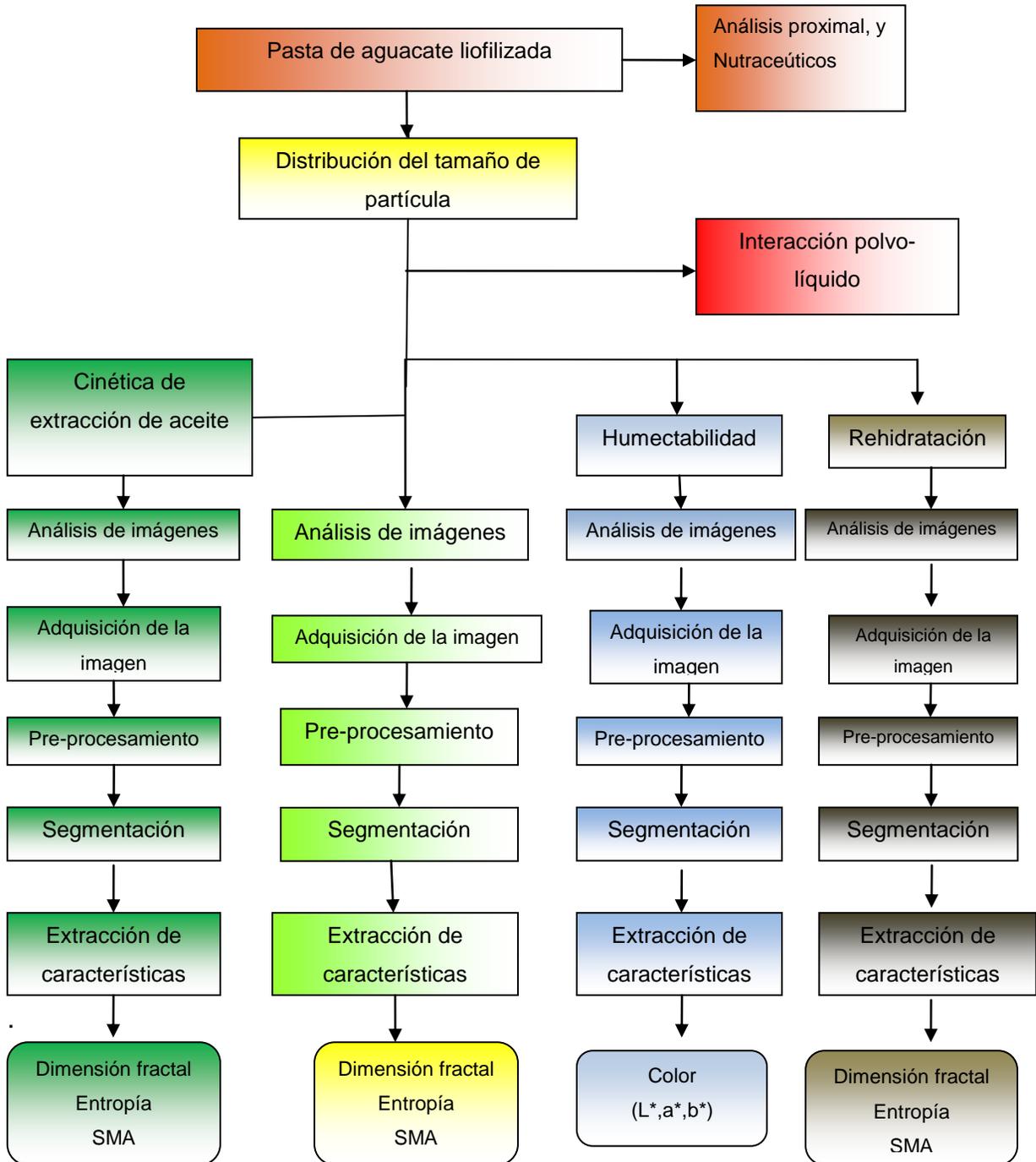
#### **5.5 Determinación de fitoquímicos**

Vitamina E NOM-091-SSA1-1995, Luteína (Ashton y col., 2006), perfil de ácidos grasos AOAC 18ed 2005 (963.22 y 969.33).

#### **5.6 Determinación de la extracción de aceite**

Se realizó por el método Rochwood el cual consistió en la inmersión de la muestra en cloroformo a diferentes tiempos con agitación constante (Gomez y Bates, 1970)

## 6. DESARROLLO EXPERIMENTAL



### **6.1 Acondicionamiento del liofilizado y distribución del tamaño de partícula por tamizado**

Se vertieron 200 g de muestra, en la parte superior de una serie de cinco tamices tyler estándar durante 5 minutos; éstos se colocaron de mayor a menor tamaño de malla y fueron agitados vertical y horizontalmente en el dispositivo que se tiene para este fin. Se calculó la fracción de masa para cada tamaño de partícula. El tamaño de las partículas se define como el promedio aritmético existente entre los tamaños de dos tamices (Aguilera y Stanley, 2001).

### **6.2 Interacción polvo-liquido**

Se utilizó una adaptación del método reportado por Ayala (2007). Se colocó una muestra de polvo entre porta y cubreobjetos. Éstos se instalaron en la platina del microscopio electrónico (Eclipse 50 L, Nikon, Japón) y se le adicionó una cantidad determinada de agua entre el cubre y el portaobjetos, y se registró el proceso de humectación a través de la adquisición de imágenes, utilizando el programa NIS-Elements F 2.30, el cual permitió adquirir las fotografías necesarias mismas que fueron obtenidas a diferentes tiempos.

### **6.3 Rehidratación**

Se utilizó una adaptación del método reportado por Ayala (2007) en el cual se colocó una partícula de polvo sobre un portaobjetos, ambos se instalaron en la platina del microscopio electrónico (Eclipse 50 L, Nikon, Japón), adicionando 1 mL de agua desde la parte inferior derecha del portaobjetos, se registró el proceso de rehidratación mediante la grabación de un video utilizando el programa para captura de imágenes y video marca Steren, Alemania, para determinar el momento en que el frente del agua toca a la partícula y ésta se rehidrata.

## **6.4 Determinación de Humectabilidad**

La prueba de humectación consistió en medir el tiempo requerido para humectar (mojar) 13 g de polvo depositados en la superficie de 100 mL de agua a 25 °C colocada en una caja petri de 17.5 cm (Jumah, y col. 2000 Niro, 2005). Se realizó esta prueba con 3 repeticiones para cada tamizado. También se efectuó otra prueba de humectabilidad la cual consistió en pesar 1 g de polvo de los diferentes tamaños de partícula, el cual se colocó sobre una charola, enseguida se le agregaron 1, 2, 3 y 5 mL de agua. Se adquirieron las imágenes respectivas para determinar el color. A estos polvos mojados se les determinó la humedad por medio de termobalanza.

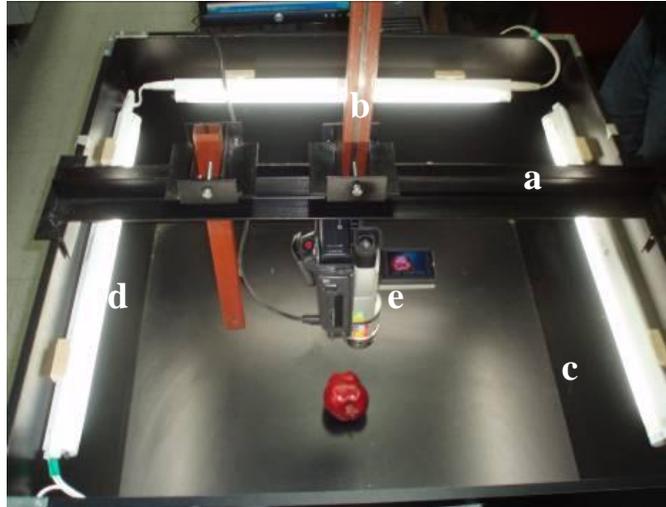
## **6.5 Análisis de imágenes**

### **6.5.1 Adquisición de las imágenes**

Para la determinación de humectabilidad las imágenes fueron capturadas usando un sistema de adquisición diseñado por Flores (2007), el cual consta de las siguientes partes: a) riel principal, b) soporte para el dispositivo de captura, c) paredes, d) fuentes de iluminación y e) dispositivo de captura. (En la Figura 5 se muestran las partes del sistema de adquisición de imágenes).

#### **❖ Sistema de iluminación y soporte estructural**

Las características del sistema de iluminación y las dimensiones del sistema de adquisición de imágenes son los mismos que empleó Flores (2007).



**Figura 5. Partes del sistema de adquisición de imágenes: a) riel principal, b) soporte para el dispositivo de captura, c) paredes, d) fuentes de iluminación y e) dispositivo de captura.**

❖ Dispositivo de captura

El dispositivo, de captura es una cámara digital a color modelo L110, marca Samsung de 8.2 Mega pixeles, fue colocada verticalmente sobre los polvos húmedos a una distancia de 17 cm de la base del sistema de adquisición de imágenes. Se tomaron 6 imágenes de los polvos a los diferentes niveles de humectación manteniendo las mismas características de captura para todas las imágenes (sin flash, sin zoom disparador automático, dual image stabilization).

Para la rehidratación de las partículas de polvo, los videos obtenidos se digitalizaron utilizando el programa DVD video soft, con el cual se obtuvieron fotos durante el proceso de contacto agua- partícula.

Para la determinación de la morfología de la partícula con aceite y sin aceite se analizaron muestras de cada uno de los polvos mediante microscopía electrónica de barrido (microscopio electrónico de barrido JEOL, modelo JBM-5900LV) (Alamilla y cols., 2005). Se capturaron las imágenes (4 imágenes con 20 partículas) para evaluar la dimensión fractal utilizando el programa Image J.

### **6.5.2 Pre procesamiento de imágenes y segmentación**

Todas las imágenes obtenidas fueron convertidas a escala de grises y fueron segmentadas por medio del “thresholding”.

### **6.5.3 Extracción de las características**

#### **➤ Entropía y segundo momento angular (SMA)**

Para determinar las características de textura del liofilizado de aguacate se utilizó el programa ImageJ v1 34. Para determinar las características de textura las imágenes se convirtieron a escala de grises de 8 bits y posteriormente se utilizó el comando GLCM texture en la que se determino los parámetros de textura en la dirección de  $0^{\circ}$  (Haralick y Shanmugam, 1973). Para determinar estos parámetros se utilizó ángulo de  $0^{\circ}$  ya que Flores (2007) demostró que no hay diferencias significativas entre los valores calculados a  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  y  $135^{\circ}$ .

#### **➤ Dimensión Fractal**

Por otra parte, las imágenes capturadas fueron analizadas con el programa Image J v1 34s (National Institute of Health, Bethesda, USA), las imágenes fueron convertidas a escala de grises de 8 bit. Se calculó la dimensión fractal con los comandos “Fractal Count”, “FracLac 2.3” y SDBC Standard box counting además de área, perímetro y diámetro de Feret.

#### **6.5.4 Color digital**

Para determinar el color se utilizó el comando RGB to CIE L\*a\*b\* stack del programa Image j el cual convierte la imagen RGB a los parámetros del espacio de color CIE L\*a\* b\*, posteriormente mediante el comando Histogram se realizó la medición del color de la imagen el cual proporciona un promedio del valor de cada parámetro (Papadakis y Abdul-Maleks, 2000; Flores, 2007).

#### **6.5.5 Análisis estadístico**

A los datos obtenidos de las determinaciones fisicoquímicas y del análisis de imágenes se les realizó un análisis estadístico que consistió en la determinación de un análisis de varianza unifactorial y bifactorial (ANOVA) y la prueba de Tukey con el software SigmaStat v. 10.

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **7.1 Caracterización de la pasta de aguacate criollo variedad Driimifolya.**

El aguacate es una buena fuente de energía y está libre de colesterol, además de proveer cantidades altas de beta carotenos y vitaminas. El 80 % de la composición de aguacate está representada por los lípidos los cuales son los responsables del sabor, la textura y el valor nutricional alto (Requejo y cols. 1999). Se ha observado que el contenido de agua del aguacate es gradualmente reemplazado por aceite, en el proceso de maduración. Por lo que el porcentaje de humedad es un parámetro que se relaciona de manera recíproca con el contenido de lípidos. Los resultados del análisis proximal llevado a cabo en el aguacate liofilizado se muestran en el cuadro 2.

**Cuadro 2. Análisis proximal del liofilizado de aguacate expresado en g/100g de pasta liofilizada.**

Determinación	Resultados (g/100g)
Humedad	2.48
Extracto etéreo	75.6
Cenizas	9.12
Proteína	10.2

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que el contenido de humedad es bajo, debido a que es un producto liofilizado los cuales contienen entre uno y cuatro por ciento, lo que hace que no se desarrollen bacterias ni moho. En cuanto al perfil de ácidos grasos ver Figura 6, se observó que el ácido graso que predomina en un 60 % es el ácido oleico (omega 9). Los aceites de canola, girasol, oliva y nuez contienen niveles importantes de ácido omega 9, los cuales son conocidos como ácidos alto oleico o grasas monoinsaturadas

Los aceites provenientes de estas fuentes han surgido como una alternativa más saludable y altamente funcional a los aceites de cocina parcialmente hidrogenados, que a menudo tienen un contenido alto de grasas trans y saturadas no saludables (ANIAME 2007). Por lo que el aceite de aguacate por su gran contenido de ácido oleico es utilizado como una buena fuente de ácidos monoinsaturados.

En cuanto a los ácidos grasos Linólenico (omega 3) se encuentra en un 0.86 %, este ácido graso lo podemos encontrar también en proporciones parecidas en los aceites de palma, oliva, maíz, girasol, coco y algodón. El ácido linoléico (omega 6) en el liofilizado de aguacate se presenta en un 12 % el cual también se encuentra en los aceites de soya, girasol y canola y en algunas semillas. Los ácidos grasos que se encuentran en menor proporción son el ácido mirístico y esteárico.

Con respecto al contenido de minerales los más importantes son magnesio y potasio, además de estar libre de sodio ([www.lafrutadelcorazón.com](http://www.lafrutadelcorazón.com)).

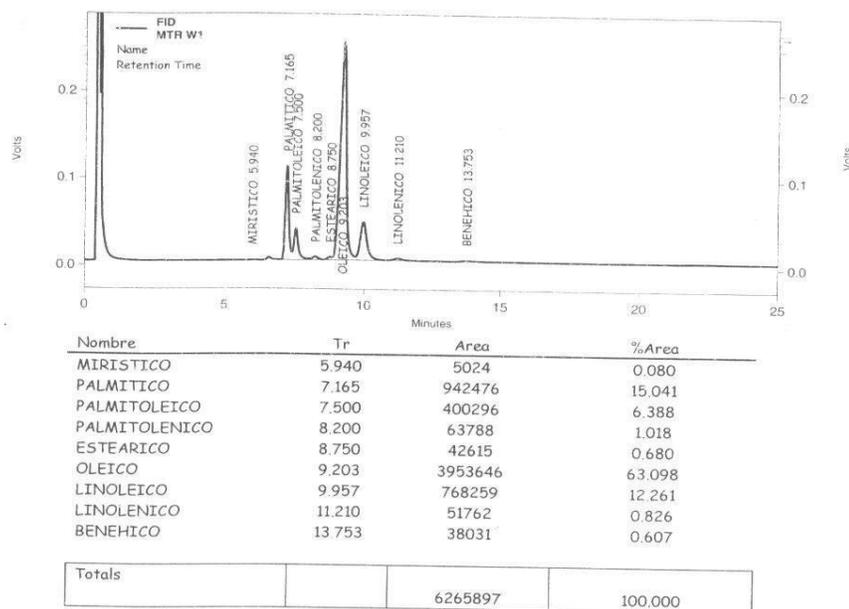
Los resultados obtenidos de la evaluación de fitoquímicos fueron 16 mg/100g de vitamina E, la cual funciona como antioxidante disminuyendo la formación de radicales libres. La luteína es un carotenoide, que ayuda a proteger los daños del ojo tales como el desarrollo de cataratas, para esta variedad de aguacate no se detectó luteína.

CROMATOGRAFIA DE GASES

ANALISIS: PERFIL DE AC. GRASOS

ORDEN DE TRABAJO: MTR W1

FECHA:10/22/08 2:08:19 AM



**Figura 6. Cromatograma del perfil de ácidos grasos del liofilizado de aguacate variedad criollo.**

## 7.2. Distribución del tamaño de partícula por tamizado

El tamaño de partícula es una propiedad importante en los alimentos en polvo y esto puede afectar a la mayoría de las propiedades del producto. Los tamaños de partícula recomendados para obtener mejores resultados en los procesos de instantaneización de los polvos son los menores a 0.4 mm (Shittu y Lawal, 2007). El tamaño de partícula, su forma y el contenido de grasa pueden afectar la humectación de los productos en polvo (Ortega-Rivas 2001). En el cuadro 3 se presentan los tamaños de tamices utilizados, su correspondiente apertura al igual que su fracción masa, para obtener estos datos se realizó la operación 5 repeticiones con una masa inicial de 200 g.

### **Cuadro3. Resultados del proceso de tamizado del polvo de aguacate.**

No. de tamiz	Apertura del tamiz	Fracción masa
12	1.68 mm	0.300±0.52
14	1.41 mm	0.250±0.09
18	1.00 mm	0.220±0.23
25	0.707mm	0.200±0.18
50	0.297 mm	0.030±0.07

De acuerdo a los resultados de la distribución del tamaño de partícula del polvo de aguacate encontramos que sólo el 3 % del polvo de aguacate tiene un tamaño de partícula mayor a 0.297 mm y menor a 0.707 mm. El mayor porcentaje del polvo fue retenido en los tamices No. 12, 14 y 25 con lo que el 77 % del tamaño de las partículas es mayor a 1.00 mm y menor a 1.68 mm y un 20 % del polvo tiene un tamaño de partícula de 0.707 mm. Esta distribución es la que presenta el polvo sin recibir ningún procedimiento para homogeneizar el tamaño de partícula.

### **7.3 Humectabilidad**

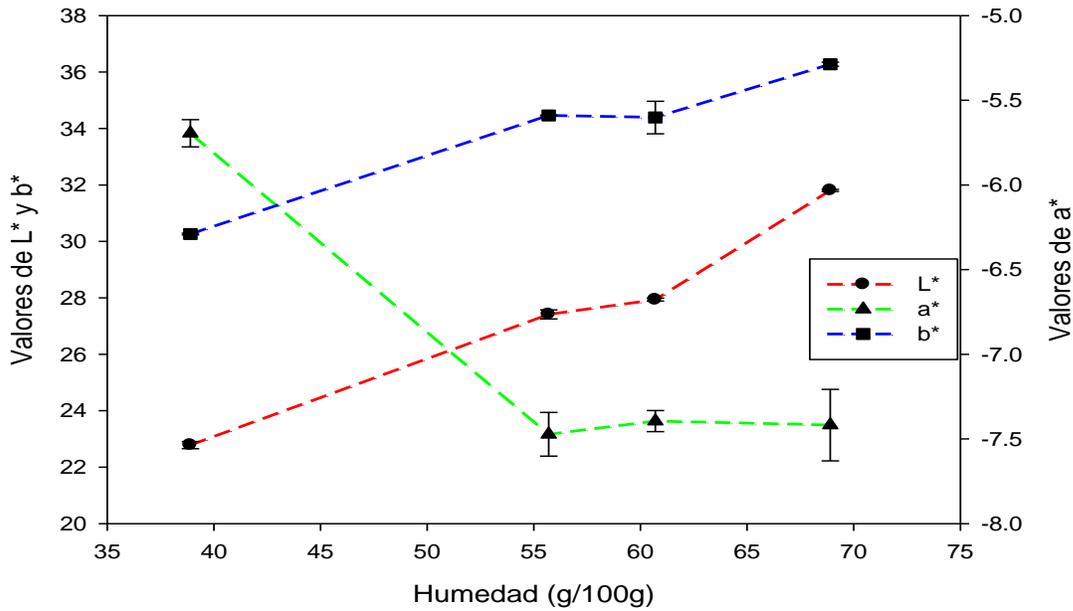
La humectabilidad o tiempo de humectación (Schubert, 1980), es considerada como el tiempo necesario que requiere todo el polvo para ser mojado por un líquido y que empiece la penetración del agua en la superficie. La morfología y homogeneidad de la partícula constituyen un factor importante para la humectación ya que dependiendo de la geometría de los poros y de la rugosidad de la superficie de la partícula, el agua se alojará en los espacios pequeños que no estén invadidos de aceite, mismo que se ubicará en los poros grandes. En el cuadro 4, se observa que a un tamaño de partícula menor, el polvo liofilizado tiene un tiempo de humectación menor debido a que la velocidad de humectación está relacionada directamente con el área superficial. Al ser el área, una función inversa del tamaño de partícula, cuanto menor sea éste, más rápido se humectará.

**Cuadro 4. Tiempo de humectación para el polvo de aguacate.**

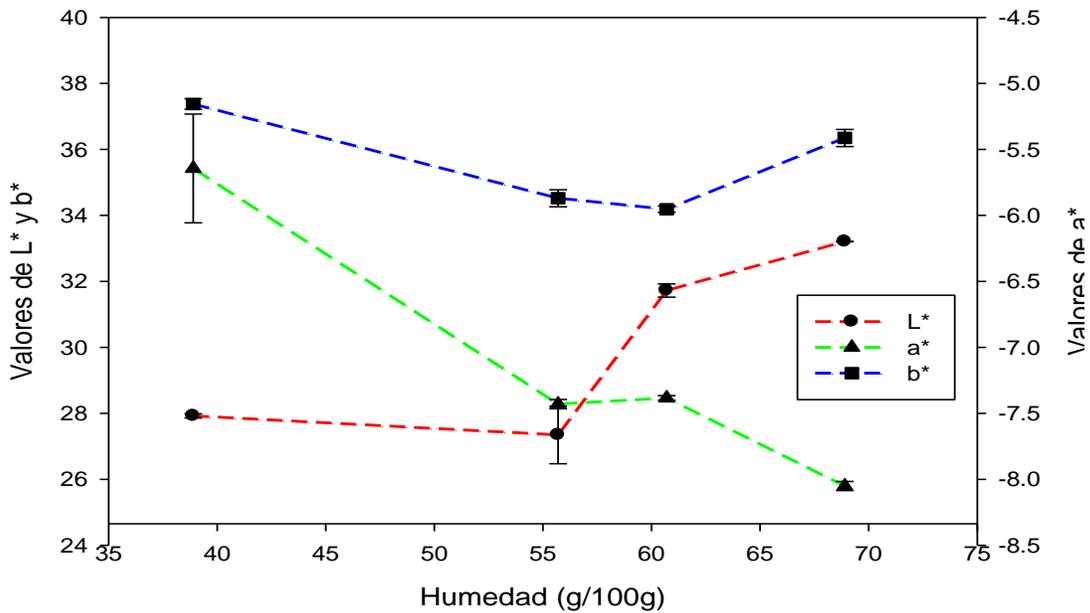
Tamaño de partícula (mm)	1.68	1.41	1.00	0.707	0.297
Tiempo (s)	1.23 ±0.25	0.13±0.01	0,10±0.01	0.07±0.01	0.06±0.01

#### 7.4 Color

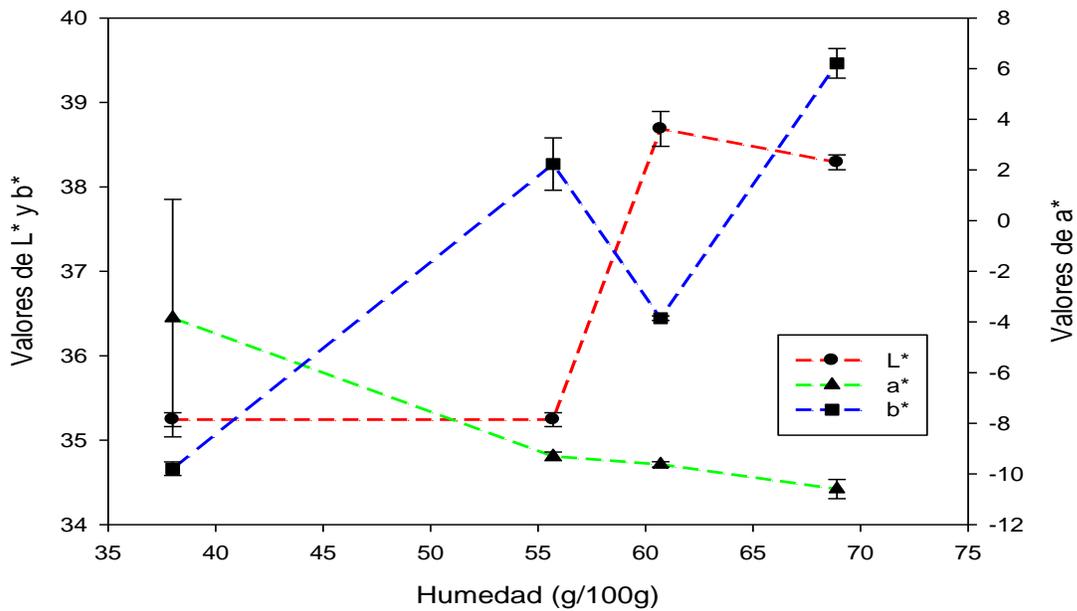
El color visual de los alimentos representa un parámetro de calidad muy importante y está dentro de las propiedades ópticas a evaluar en productos rehidratados. En las figuras 7, 8, 9,10 y 11 se muestran los gráficos de la interacción de las coordenadas cromáticas L\* (Lumionosidad), a\* (rojo (a+) y verde (a-)), y b\* (amarillo (b+) y azul (b-)), al momento de la humectación. En donde se puede ver que en los 5 tamaños de partícula empleados los valores de la coordenada a\* presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) con respecto al nivel de humectación presentándose una disminución de este valor; sin embargo, cuando se tiene un intervalo de humectación del polvo entre 55 y 70 (g/100 g) el valor de la coordenada de a\* no presenta esta disminución es decir se mantiene constante. Para los valores de la coordenada b\* estos valores aumentan directamente con el nivel de humectación, presentando diferencias significativas ( $P < 0.05$ ). Para la coordenada de cromaticidad L\* ésta presenta un incremento en sus valores desde un nivel de humectación de 55 hasta 70 (g/100g), presentando diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).



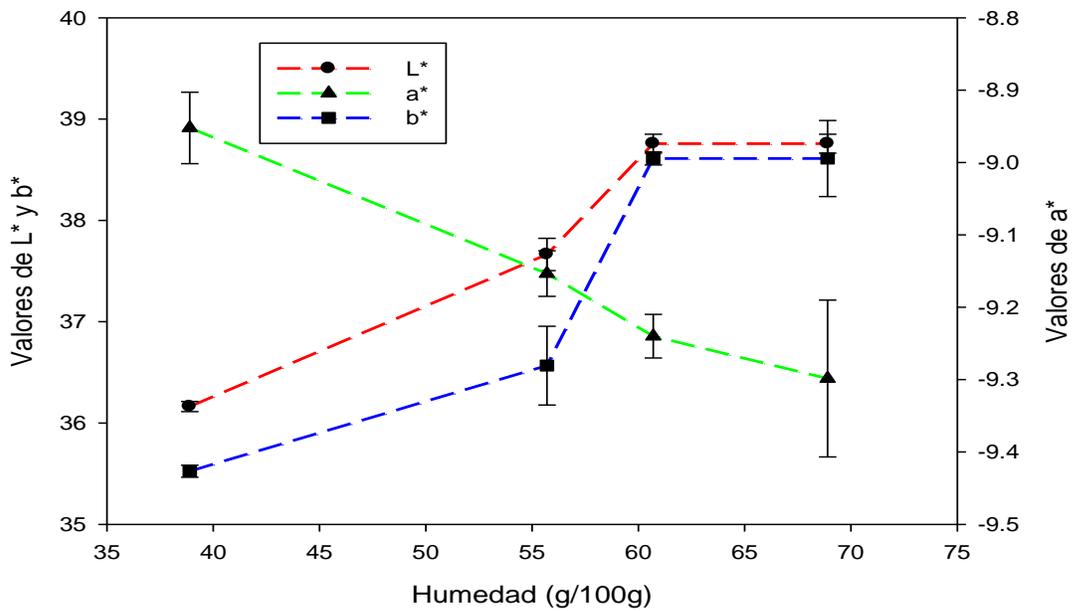
**Figura7** Cambios en los parámetros de color L\*a\*b\* a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 1,67 mm, n=6.



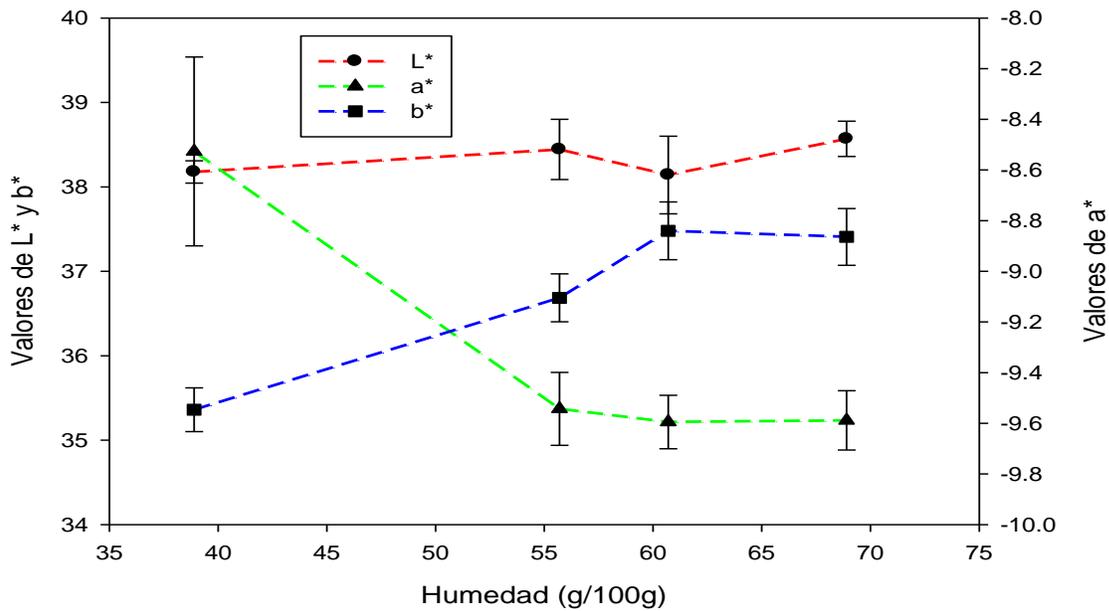
**Figura 8.** Cambios en los parámetros de color L\*a\*b\* a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 1,41 mm, n=6.



**Figura 9. Cambios en los parámetros de color L\*a\*b\* a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 1,00 mm, n=6..**



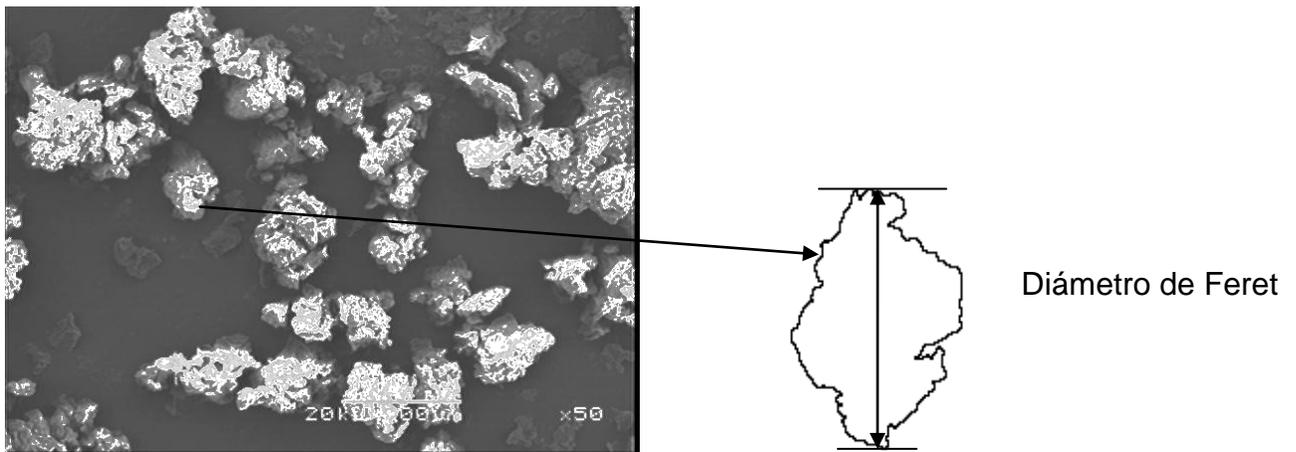
**Figura 10. Cambios en los parámetros de color L\*a\*b\* a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 0.707 mm, n=6..**



**Figura 11. Cambios en los parámetros de color L\*a\*b\* a diferentes niveles de humectación para un tamaño de partícula de 0.297 mm, n=6.**

### 7.5 Evaluación de la dimensión fractal para partículas con aceite

Para la evaluación de la dimensión fractal de contorno y Diámetro de Feret (distancia entre dos planos paralelos tangentes siempre en una dirección dada). Se utilizó el programa Image J empleando los comando descritos en el apartado 6.5.3



**Figura 12. Imagen de partículas obtenidas por microscopia electrónica de barrido e ilustración del diámetro de Feret.**

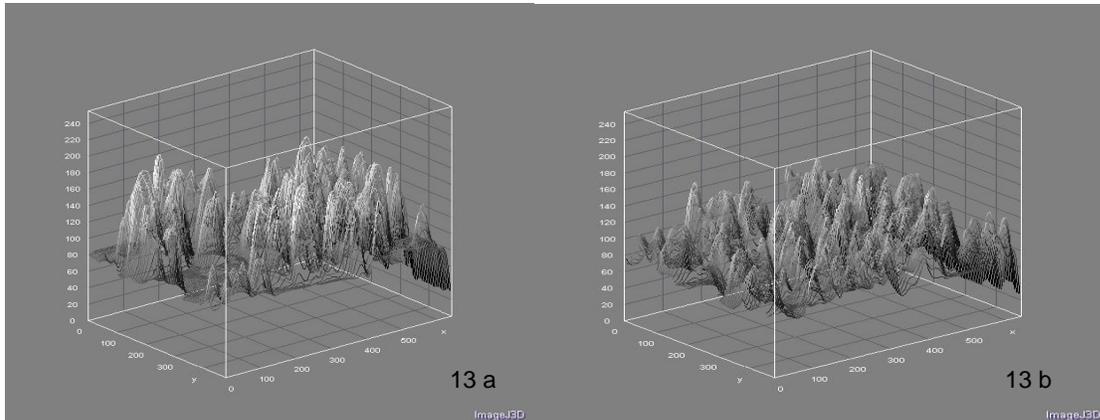
La dimensión fractal de contorno es una medida de la irregularidad del contorno de un cuerpo, es este caso de una partícula y representa la irregularidad de dicha partícula. Con los resultados obtenidos se observa que la dimensión fractal disminuye con respecto a la disminución del tamaño de partícula, ya que el contorno de las partículas se encuentra más homogéneo, encontrándose que existen diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

Además este comportamiento puede estar asociado también a que al disminuir el tamaño de la partícula existe una menor cantidad de píxeles que conforman el contorno de las partículas, por lo que dichos valores de dimensión fractal disminuyen. En el cuadro 5, se muestran los valores promedio de la dimensión fractal y el tamaño de partícula.

**Cuadro 5. Dimensión Fractal de contorno (Df) para diferentes tamaños de partículas.**

Tamaño de partícula (mm)	1.68	1.41	1.00	0.707	0.297
Df	1.507±0.30	1.439±0.29	1.334±0.27	1.216±0.22	1.206±0.19

Esta disminución de la dimensión fractal inicialmente nos indica que la superficie de las partículas del liofilizado de aguacate tiende a ser menos rugosas. Para poder comprobar esta idea fue necesario calcular la dimensión fractal de textura de las partículas, la cual nos podrá iniciar exactamente de manera cuantitativa la rugosidad que poseen las partículas. En la figura 13 a y 13 b se muestran imágenes de superficies de intensidad del contorno de partículas del liofilizado de aguacate a dos tamaños de partícula.



**Figura 13a y 13b Representación tridimensional de los cambios en el contorno de las partículas del liofilizado de aguacate con un tamaño de partícula de 1.68 y 0.297mm respectivamente.**

Para la realización de la medición del diámetro de Feret se emplearon las mismas imágenes utilizadas para la determinación de la dimensión fractal. Estos resultados se observan en las figuras 15, 16, 17, 18 y 19, respectivamente.

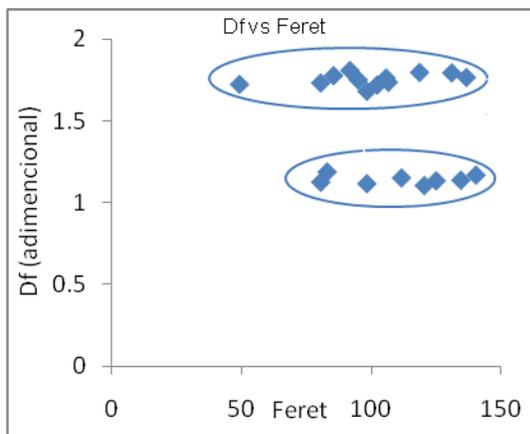


Figura 15. Gráfico diámetro de feret. tamaño partícula. de 1.68 mm

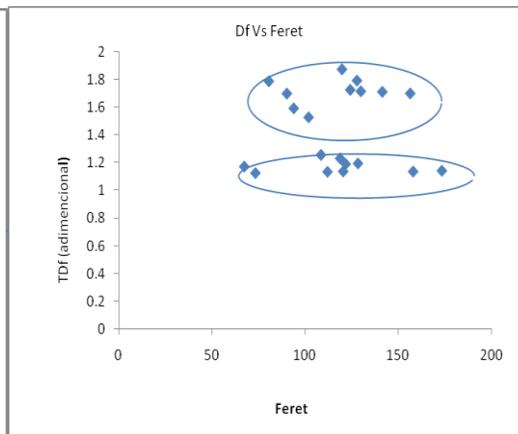


Figura 16. Gráfico de diámetro de feret tamaño de partícula 1.41 mm

↑ Irregulares  
↓ Regulares

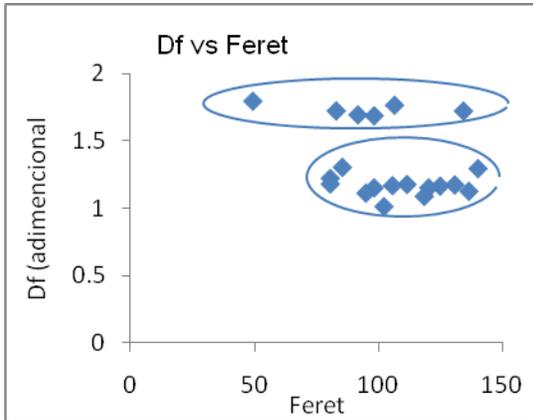


Figura 17 Gráfico diámetro de feret.  
tamaño de partícula 1.00 mm

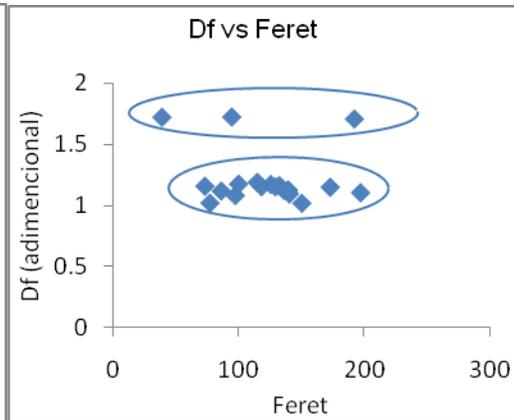


Figura 18. Gráfico de diámetro de feret  
tamaño de partícula 0.707 mm

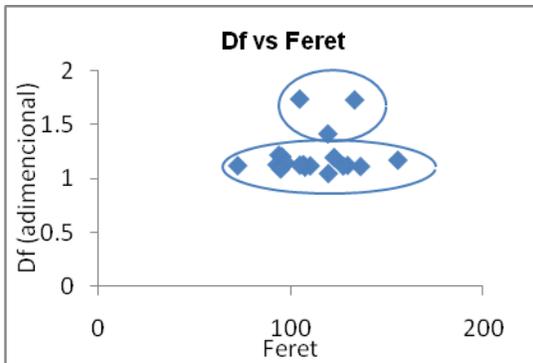


Figura 19 Gráfico de diámetro de feret.  
tamaño de partícula 0.297 mm

Con respecto a la dimensión fractal y al diámetro de Feret se observa que para un tamaño de partícula de 1.68 mm y 1.41mm, se encuentran dos grupos de partículas en donde el 60 % de las partículas tiene tendencia hacia la irregularidad, y el 40 % hacia la regularidad, para tamaños de partícula de 1.00 y 0.707mm se encuentran dos grupos de partículas donde el 30 % de las partículas tienden hacia la irregularidad y el 70 % restante tiende a lo regular, finalmente para un tamaño de partícula de 0.297 mm el 85 % de las partículas tiende hacia lo regular. Existiendo diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los diferentes tamaños de partícula.

En conclusión el diámetro de Feret y la dimensión fractal de contorno son dos parámetros de forma mediante los cuales se pudieron identificar grupos o conjuntos de partículas del liofilizado de aguacate con características diferentes. Estas diferencias en los valores de los parámetros señalados anteriormente nos proporcionan información relacionada a la facilidad con la cual estas partículas pueden ser rehidratadas o acerca de sus propiedades de rehidratación.

## 7.6 Cinética de extracción de aceite

De los 5 tamaños de partícula obtenidos se realizó una cinética de tiempo y % de extracción de aceite. La extracción de aceite se realizó con la técnica de Rochwood con tiempo desde 1 min hasta 720 min.

Se encontró que existe un patrón polinomial de segundo orden entre el tiempo de extracción del aceite y la capacidad de extracción (Cuadro 6). Con las pendientes obtenidas se calculó la capacidad máxima de extracción de aceite (Cpm) que fue de 81.3%

**Cuadro 6. Coeficientes de correlación y capacidad máxima obtenidos de las cinéticas.**

Tamaño de partícula (mm)	$r^2$	Capacidad máxima (Cpm)
1.68	0.9754	81.301
1.41	0.9629	81.301
1.00	0.956	81.301
0.707	0.9622	81.967
0.297	0.9668	81.301

## 7.7 Evaluación de la Dimensión fractal de contorno en partículas sin aceite

De la cinética se tomaron 4 puntos representativos (1 min, 60 min, 300 min y 600 min), para determinar la dimensión fractal de contorno de igual modo que en el apartado 6.5. En el cuadro 7 se observan los valores de Dimensión fractal y los 4 tiempos representativos.

**Cuadro 7. Evaluación de la dimensión fractal de contorno en partículas sin aceite a 4 tiempos representativos.**

Tamaño de partícula (mm)	1 min	60 min	300 min	600 min
1.68	1.7321±0.01	1.7267±0.01	1.6978±0.01	1.7559±0.01
1.41	1.7366±0.02	1.7433±0.03	1.7556±0.01	1.7711±0.03
1.00	1.7406±0.01	1.7736±0.01	1.7250±0.02	1.7777±0.02
0.707	1.7469±0.02	1.7339±0.01	1.7511±0.01	1.7647±0.02
0.297	1.7657±0.01	1.7679±0.01	1.7741±0.01	1.7104±0.09

Como se puede observar los valores obtenidos de la dimensión fractal tienen diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) entre los tamaños de partícula estudiados. Sin embargo, la dimensión fractal se mantiene similar en los 4 tiempos, esto es debido a que probablemente, al momento de extraer el aceite la partícula se vuelva regular.

Por lo tanto en comparación con la dimensión fractal obtenida con las partículas con aceite se observa que ésta es menor en comparación con la obtenida para las partículas sin aceite que es más grande y permanece constante. Para ambos análisis de dimensión fractal de contorno encontró que existen diferencias significativas ( $P < 0.05$ ).

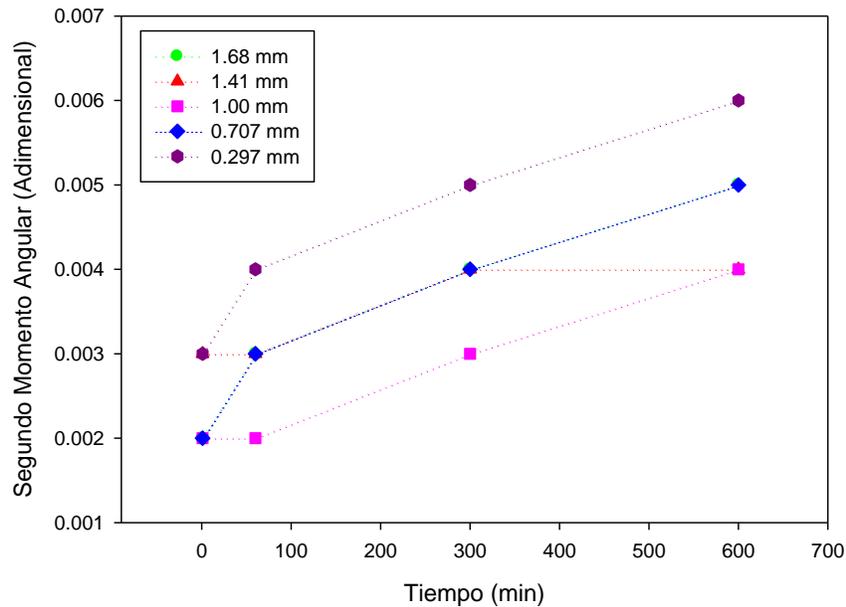
## **7.8 Características de textura**

### **7.8.1 Segundo Momento Angular (SMA) para partículas con y sin aceite**

Una de las características de textura que se relaciona con los cambios presentes en las partículas durante el proceso de extracción de aceite es el segundo momento angular, el cual es una medida de la homogeneidad de la imagen, por lo tanto, si una imagen es homogénea este parámetro de textura tendrá valores altos. (Fernández y col 2005).

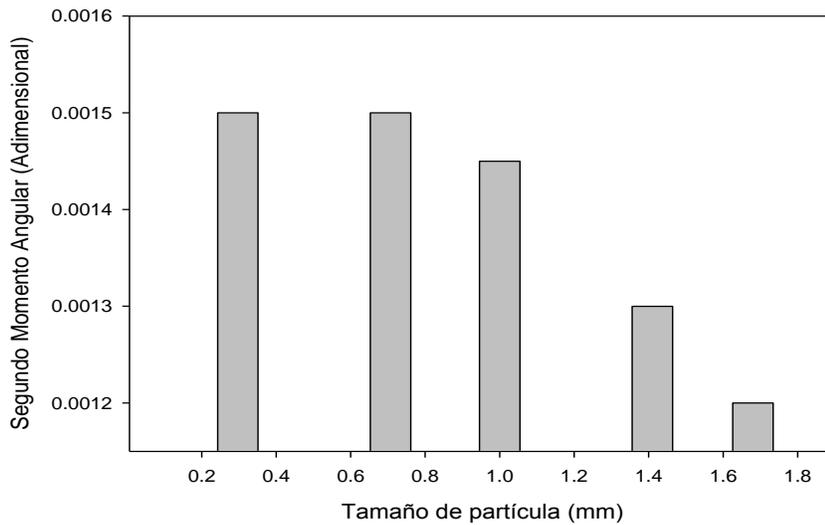
En la Figura 20 se muestran los valores promedio del SMA para cada uno de los tamaños de partícula en los cuales no hay diferencia significativa ( $P > 0.05$ ); se puede observar que el SMA aumenta proporcionalmente conforme aumenta el tiempo de extracción, este aumento es debido a que en la superficie de la partícula del liofilizado de aguacate, tiende a tener un menor contraste o disminuir la heterogeneidad esto provocado principalmente por la pérdida de aceite y a los cambios de las concentraciones de los pigmentos.

El brillo y el contraste son dos aspectos muy importantes en cuanto a determinación de parámetros texturales como el segundo momento angular. Un incremento en este valor, nos indica que las superficies de dichas partículas tienden a ser más homogéneas y este cambio puede estar relacionado con las propiedades de la rehidratación.



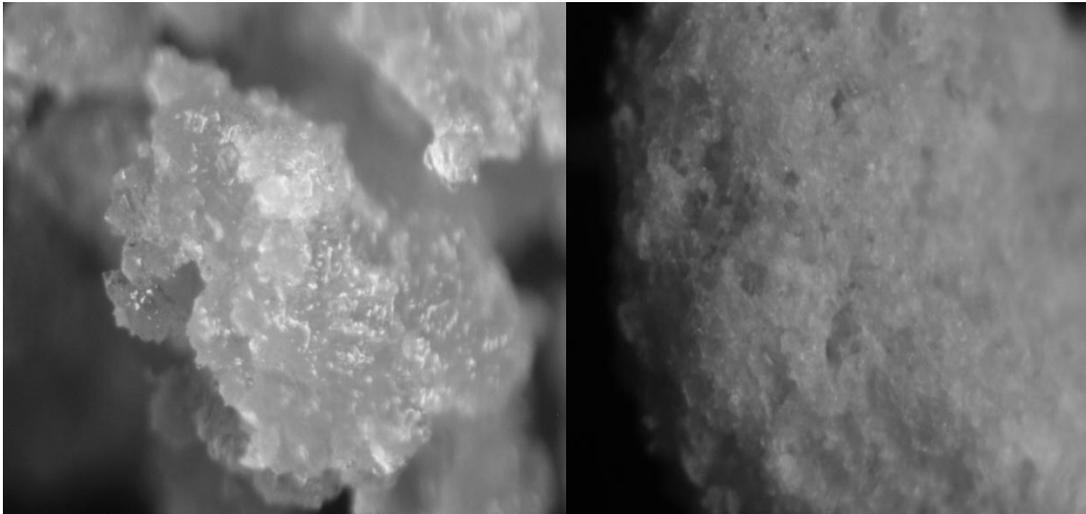
**Figura 20. Cambios del SMA a diferentes tiempos para partículas sin aceite.**

En la Figura 21 se muestran los valores promedio del SMA para cada uno de los tamaños de partícula en los cuales existe una diferencia significativa ( $P > 0.05$ ). Se puede observar que el SMA disminuye a los diferentes tamaños de partícula, esta disminución es debido a que la superficie de la partícula del liofilizado de aguacate, tiende a tener un mayor contraste o aumentar la heterogeneidad.



**Figura 21. Cambios del SMA a diferentes tamaños de partícula con aceite.**

Esto provocado principalmente por la gran cantidad de aceite que se encuentra en la superficie sin poder diferenciar los espacios porosos, este efecto se puede observar en la Figura 22. Sin embargo para la partícula que no contiene aceite se puede observar que la superficie de dicha partícula es homogénea y se pueden apreciar algunos espacios porosos ver Figura 23.



**Figura 22. Partícula con aceite.**

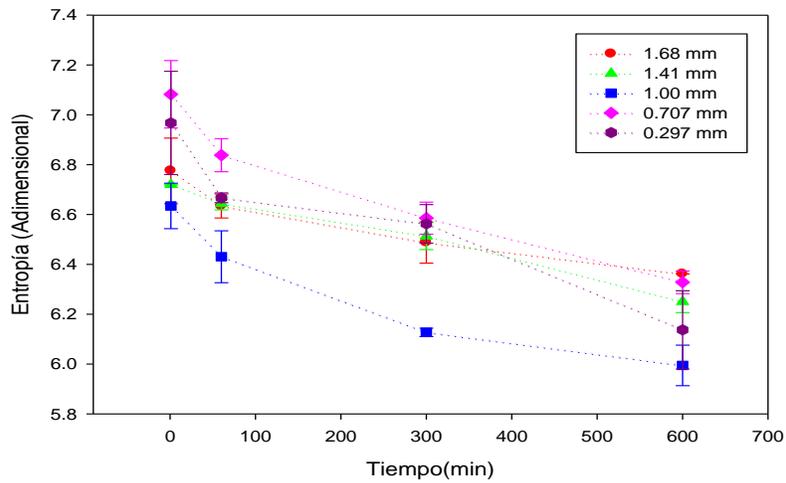
**Figura 23. Partícula sin aceite.**

### 7.8.2 Entropía

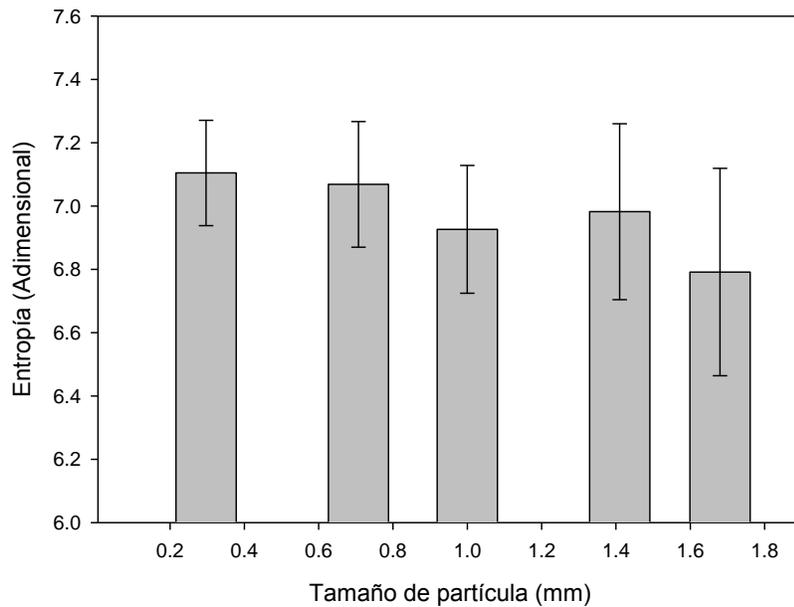
Otra de las características que se evaluó del análisis de imágenes es la entropía la cual es una medida del desorden de una imagen (Fernández y col., 2005). Se encontró que no hay diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre los valores promedio de entropía para las partículas con aceite y sin aceite ver figuras 24 y 25. Se observa que para las partículas que tiene aceite el valor de la entropía disminuye lo contrario a las partículas con aceite.

La entropía y el SMA son valores inversos ya que si una imagen tiene un alto valor de SMA significa que es muy homogénea y por lo tanto el valor de la entropía es pequeño (Haralick y cols., 1973).

Estos cambios en los parámetros de textura nos están indicando efectivamente que las partículas presentan diferentes rugosidades y que estos cambios en rugosidades son provocados por el fenómeno de extracción, y que existe una dependencia de la textura de las partículas con las propiedades de rehidratación además de la composición de las partículas.



**Figura 24. Cambios en los valores de Entropía a diferentes tiempos para partículas sin aceite.**



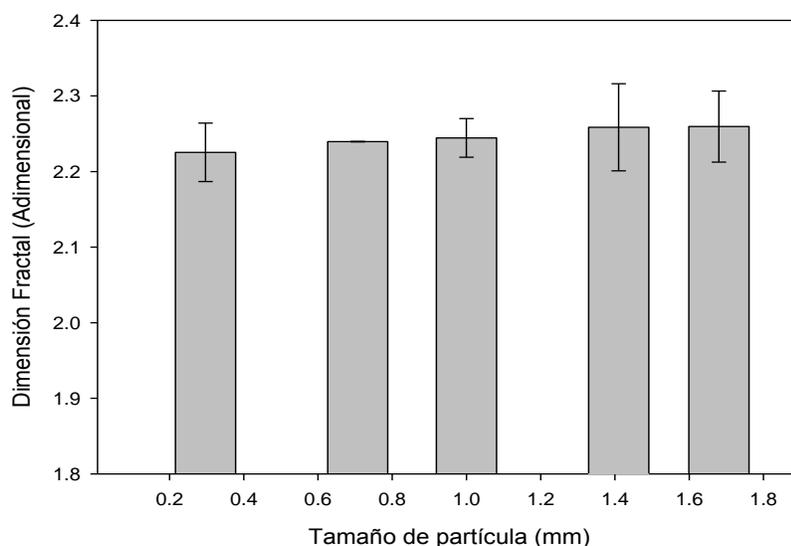
**Figura 25. Cambios en las valores de Entropía a diferentes tamaños de partícula para partículas con aceite.**

### 7.9. Dimensión fractal de textura con aceite y sin aceite.

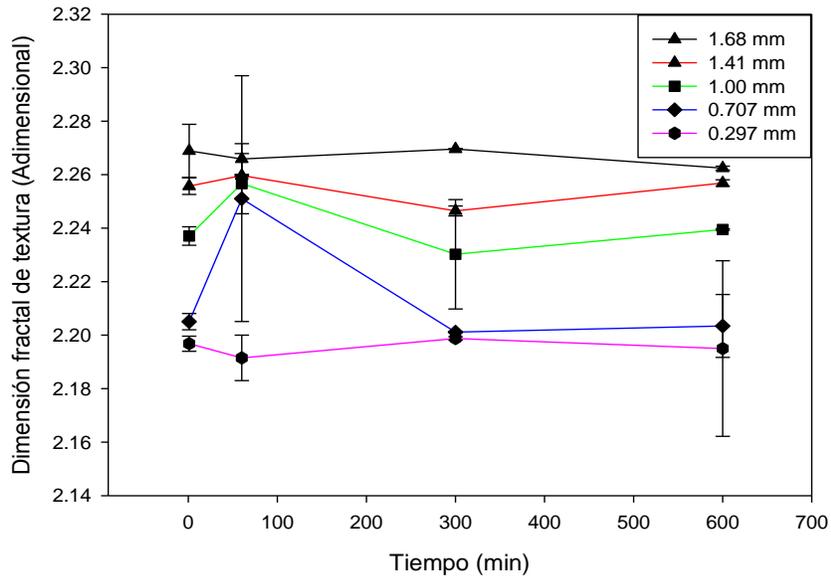
La dimensión fractal es una medida de la textura de la imagen, y representa la irregularidad de la textura de la imagen. En las Figuras 26, 27 y 28 se muestran los valores promedio de la dimensión fractal de las partículas del liofilizado de aguacate con aceite y sin aceite encontrándose que existen diferencias significativas ( $P < 0.05$ ), entre los valores de la dimensión fractal y el tiempo de extracción de aceite. También se encontró que no existen diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) entre los valores de dimensión fractal y el tamaño de la partícula con aceite.

Para ambos casos, el valor de la dimensión fractal es proporcional al tamaño de la partícula como ya se había descrito en el apartado 6.5.

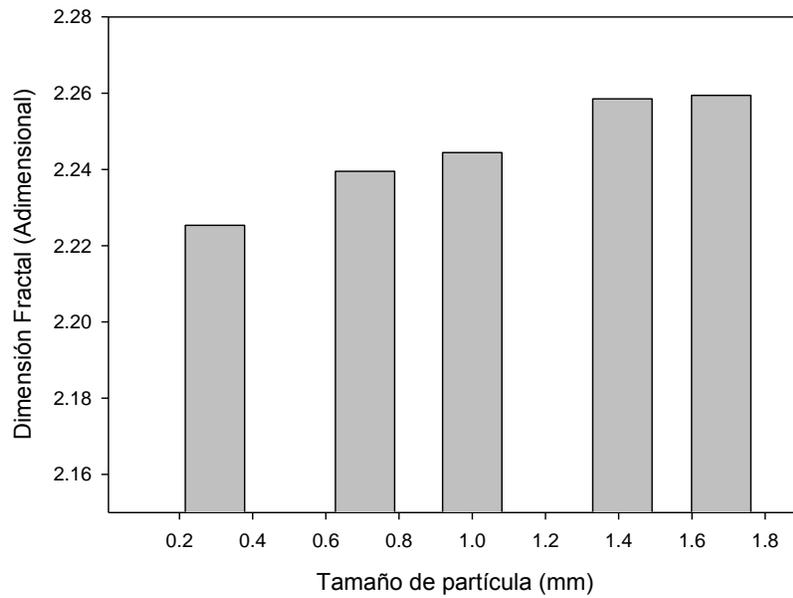
El comportamiento antes descrito nos señala que al aumentar el valor de la dimensión fractal de textura, la rugosidad en cierta medida de la superficie de las partículas es mayor, otra causa de este aumento es debido a que la cantidad de superficie analizada es mayor y por lo tanto el número de píxeles.



**Figura 26. Variación de la dimensión fractal en partículas sin aceite y tamaño de partícula.**



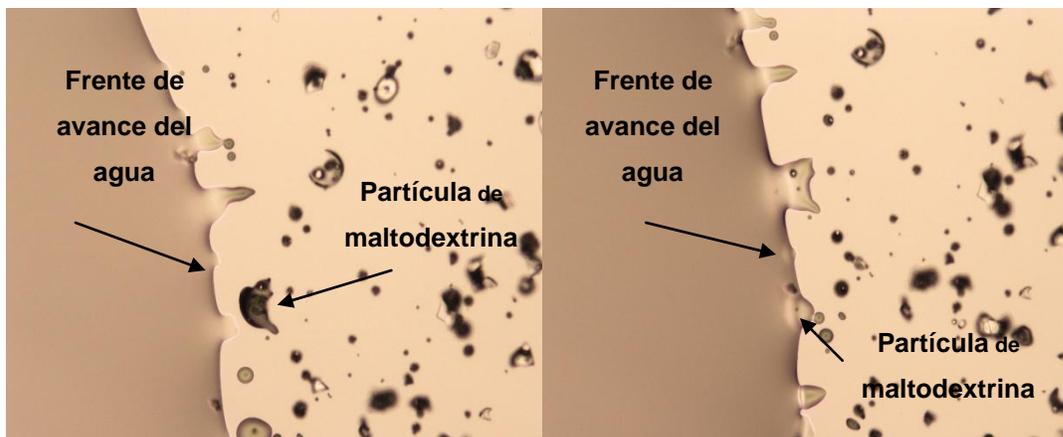
**Figura 27. Variación de la dimensión fractal de textura en partículas sin aceite**



**Figura 27. Cambios de los valores de dimensión fractal de textura. en partículas con aceite**

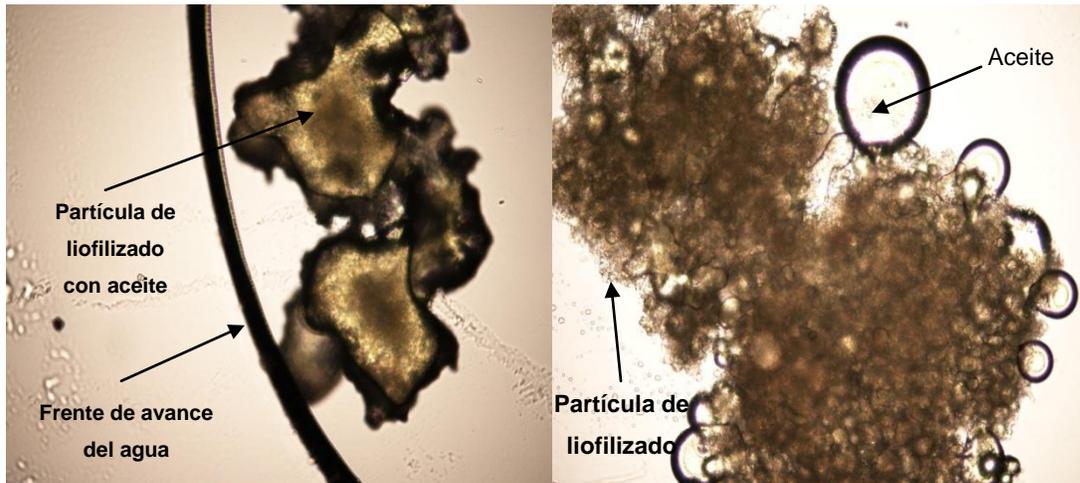
## 7.10 Interacción polvo líquido

Para poder ver la interacción que hay entre las partículas y el frente del agua; hay que tomar en cuenta que la rehidratación está compuesta de tres procesos simultáneos: imbibición del agua respecto al material deshidratado, el hinchamiento y la lixiviación de los sólidos solubles. También hay que tomar en cuenta la transferencia de materia ocurrida durante la rehidratación, se puede mencionar que el agua es absorbida más rápidamente al inicio del proceso y luego disminuye gradualmente, la absorción, hasta que el contenido de humedad alcanza un equilibrio, es decir que todos los espacios queden saturados con agua (Marin y Lemus, 2006). De las imágenes proporcionadas del proceso de rehidratación de la maltodextrina (ver Figura 28), se observa que la humectación empieza cuando el agua toca a las partículas de polvo donde comienza la absorción del agua hasta que alcanza su equilibrio llegando a una rehidratación total y la disolución completa de la partícula.



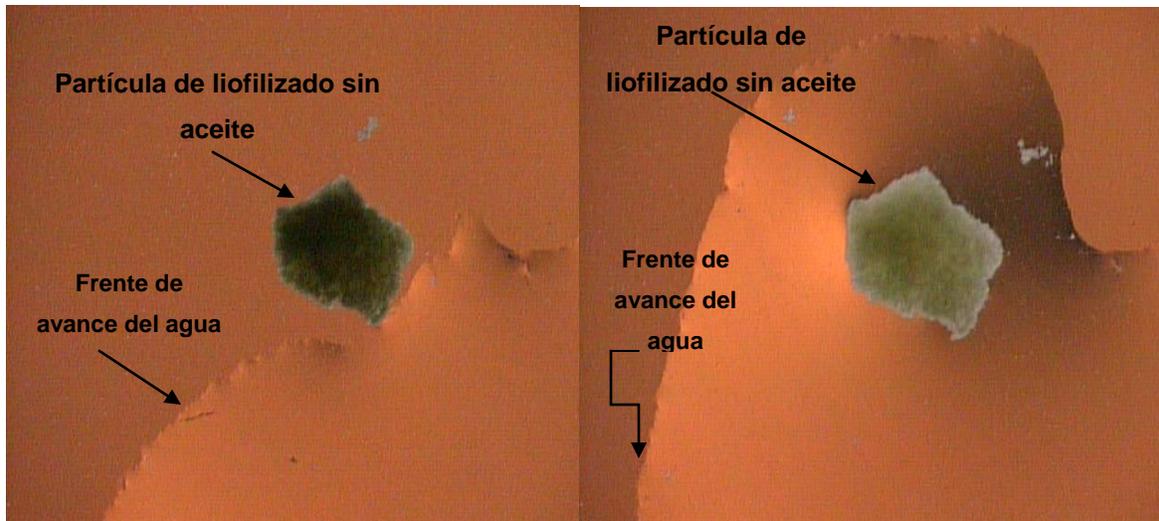
**Figura 28. Proceso de rehidratación de la partícula de maltodextrina  
aumento 10X.**

Para el proceso de humectación del liofilizado de aguacate hay que tomar en cuenta la interacción que hay entre las partículas, el aceite que contiene la partícula y el frente del agua. Esta interacción se muestra en la Figura 29.



**Figura 29. Proceso de humectación de una partícula del liofilizado de aguacate con aceite aumento 10x.**

En la figura 29 se puede observar que las partículas llevan a cabo un proceso de humectación, ya que la partícula probablemente contiene poros, los cuales no son regulares ni lisos donde probablemente esté depositado el aceite, por lo que al momento que el agua entra en contacto con las partículas de polvo se presentan dos fuerzas opuestas, una de ellas está dada por la presión capilar ( $P_k$ ) y la otra por la presión hidrodinámica ( $P_w$ ) (Ayala, 2007), una vez que ha vencido la  $P_k$  comienza el proceso de mojado. El siguiente paso para llevar a cabo la rehidratación es poder igualar la presión capilar ( $P_k$ ) y la presión hidrodinámica ( $P_w$ ) donde empieza el contacto del agua con las partículas, dando como resultado la entrada de agua a los espacios pequeños que no están invadidos por el aceite y el aceite se ubicará en los poros grandes. Así el agua llegará a ocupar cada vez más poros, pero no los que previamente están llenos de aceite.



**Figura 30. Proceso de humectación de una partícula de liofilizado de aguacate sin aceite**

Se puede observar en la Figura 30 que para el proceso de humectación de la partícula del liofilizado de aguacate sin aceite, al momento de que el agua toca a la partícula, ésta empieza a entrar por los espacios y poros de los más pequeños hacia los grandes con facilidad, debido a que estos espacios están parcialmente libres de aceite, los cuales se empiezan a saturar hasta llegar a un equilibrio es decir, donde todos los espacios extra e intracelulares quedan saturados por agua, llevándose a cabo la humectación.

### 7.8 Evaluación de la dimensión fractal de contorno en partículas secas y mojadas sin aceite.

Se realizó la evaluación de la dimensión fractal de contorno con las partículas secas y sin aceite observándose que para ambos tratamientos no existe una diferencia significativa ( $P>0.05$ ) en el tiempo de extracción de aceite y la partícula seca, ver cuadro 8.

**Cuadro 8. Evaluación de la dimensión fractal de las partículas secas sin aceite.**

Tamaño de partícula (mm)	1 min	60 min	300 min	600 min
1.68	1.7652±0.01	1.7805±0.01	1.7866±0.01	1.7980±0.01
1.41	1.7454±0.02	1.7778±0.02	1.7796±0.01	1.8029±0.01
1.00	1.7715±0.01	1.785±0.02	1.7882±0.02	1.7905±0.01
0.707	1.7481±0.01	1.7725±0.03	1.7769±0.02	1.7889±0.02
0.297	1.7671±0.03	1.7691±0.02	1.7712±0.02	1.7719±0.02

Con respecto a la evaluación de la dimensión fractal de las partículas mojadas sin aceite se observa, que existen diferencias significativas ( $P<0.05$ ), en los tiempos de extracción de aceite, Por lo que al aumentar el tiempo de extracción la dimensión fractal tiende a aumentar, esto probablemente se deba a que la partícula al estar en contacto con agua, ésta pueda seguir conservando su homogeneidad. Ver cuadro 9.

**Cuadro 9. Evaluación de la dimensión fractal de las partículas mojadas sin aceite.**

Tamaño de partícula (mm)	1 min	60 min	300 min	600 min
1.68	1.757±0.01	1.7786±0.01	1.7923±0.01	1.7934±0.02
1.41	1.725±0.02	1.757±0.02	1.767±0.02	1.8106±0.02
1.00	1.7642±0.01	1.782±0.01	1.7826±0.01	1.784±0.02
0.707	1.6667±0.02	1.7221±0.02	1.7494±0.02	1.7869±0.02
0.297	1.6416±0.01	1.6971±0.01	1.7115±0.01	1.7967±0.01

## 8. Conclusiones

- © El tiempo de humectación es menor para partículas pequeñas ya que tienen una superficie de contacto menor por partícula individual que las de mayor tamaño.
- © El parámetro de cromaticidad  $a^*$  (verde a rojo) disminuye, ya que el color se intensifica al momento de empezar la humectación.
- © La dimensión fractal y el tamaño de partícula son inversamente proporcionales. Ambos parámetros están correlacionados a través de una línea recta con ( $r^2=0.957$ )
- © En cuanto a la relación de la dimensión fractal y el diámetro de Feret, se presentaron dos grupos de partículas, uno de estos grupos con una dimensión fractal alta y otro grupo con una dimensión fractal menor; lo que permitió clasificar estos dos grupos de partículas en irregulares y regulares respectivamente.
- © Existe un patrón polinomial de segundo orden entre la extracción de aceite y el tiempo de extracción obteniéndose una capacidad máxima de extracción de aceite del 81.3%.

## Conclusiones

- © Los valores de segundo momento angular tienen una relación directamente proporcional al tiempo de extracción de aceite. Esta relación es causada por la disminución de la cantidad de aceite presente en la partícula.
- © Las partículas sin aceite, presentan valores de entropía bajos debido a que sin aceite las partículas presentan menor complejidad en la imagen y éstas son más homogéneas.
- © El liofilizado de aguacate se humecta y no se completan las otras etapas de la rehidratación en el tiempo que se empleó para el estudio.

## 9. Bibliografía

1. Abdullah (2007). Fundamentals of wettability. En Oilfield Review, 19 (2):pp44-61, Edit. Schlumberger, Germany.
2. Aguilera J., Stanley, D.W., (2001). Simultaneous Heat and Mass Transfer: Dehydration. Microstructural Principles Food Process Engineering (9): 373-407
3. Aguilera, J., Chiral, A & Fito,P (2003). Food Dehydration and Product Structure. Trens in Food Science and Technology. (14):432-437.
4. Aguilera, J.M; Stanley, D.W. (1999). Microstructural principles of food are processing and Engineering. 2da. edition. Aspen Publishing Co. Gaithersburg, Maryland USA.
5. Aguilera, J.M; Stanley, D.W. (2000). New dimensions in microstructure of food products. Trends in Food Science and Technology (11):3-9
6. Alamilla, L., Chanona P., Jiménez A., Gutiérrez L., (2005). Description of morphological changes of particles along spray. Drying. Journal of Food Engineering (67):179-184.
7. Arriola-Guevara,E., García-Herrera,T., Nungaray, J.(2006).Comprtamiento del aguacate Hass liofilizado durante la operación de rehidratación. Revista mexicana de Ingeniería Química (5):51-56.
8. Asociación Nacional de Industriales de Aceites y Mantecas Comestibles A.C. (2007) <http://www.aniname.com/pdf/losaceites vegetales/pdf>
9. Association of Analytical Communities. AOAC (2005). (963.22 y 969.33), 18 edición.
10. Ayala, E. (2007). Estudio sobre el mecanismo de rehidratación de materiales biológicos. Tesis de Maestría ENCB IPN México.
11. Barbosa-Cánovas G.V., Vega-Mercado, H. (2000). Deshidratación de Alimentos. Editorial Acriba, S.A Zaragoza España.
12. Bello, G.J. (2000).Ciencia Bromatológica En: principios generales de alimentos, pp249-257,441-447.España primera edición.
13. Burtz P., Hoffmann,C.,(2005).Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. Journal of Foods Science (9):131-141.

14. Chanona, P. J. J., Alamilla B. L., Gutiérrez L., (2001). Caos y geometría de fractales, herramientas auxiliares para evaluar la complejidad del entorno biológico. *Biotecnología*. 5 (3): 117-126
15. Chen-Jin., Da-Wen. (2004) Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation, *Trends in Food Science and Technology* (15): 230-249.
16. Claridades Agropecuarias Aguacate mexicano. Octubre (2002) <http://www.aserca.gob.mx/sicsa/claridades/revista/110/2002>.
17. Conrad (2005). Select Quality Attributes of Dried Foods. *Drying Technology* 23 (4):717-730
18. Fernández, L., Castillero, C., Aguilera, J. (2005). An application of image analysis to dehydratation of Apple dish. *Journal of Food Engineering* 67:185-193.
19. Flores, M., (2007). Determinación de estadios de madurez del plátano tabasco (*Musa spp*) a través de sistemas de visión por computadora. Tesis de licenciatura, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Departamento de Ingeniería Bioquímica.
20. Foust, A Apéndice B descripción de los sólidos en forma de partículas. En: *Principios de operaciones Unitarias, Segunda Edición*. Editorial CECSA (1993).
21. Gomez,R., Bates, R.P.(1970). Storage deterioration of freeze dried avocado pure and guacamole. *Journal Food Science* 4 (35): 472-475
22. Haralick,R., Shanmugam, K., (1973). Textural features for image classification IEEE. *Transaction on system man and cybernetics SMC*, 3 (6) 610-621.
23. HogeKamp S. Schubert H (2003) Rehydration of food powders, *Journal Food Science and Technology International*; 9 (3): 223-235.
24. Jha, Patel. Song (2002). Physic-chemical properties of instant Kheer mix Communication at the International Symposium on Spray Drying of Milk products 501-513
25. Jiménez, J.C (2005). Aplicación de la geometría fractal a agregados celulares de Beta vulgaris C. crecidos en suspensión. Centro de desarrollo de productos bióticos IPN., Yautepec, Morelos.

26. Jumah, R., Tashtausth, B., Shaker, R., Zrai, F. (2000). Manufacturing parameters and quality characteristics of spray dried. *Journal Drying Technology*, 18(4 & 5) 967-984.
27. Konicaminolta, Comunicación precisa de los colores. Espacio color L\*a\* y b\* (2007). <http://www.konicaminolta.eu/pedes/portil/index/htm>.
28. Kritchevsky D., Tepper A. (2003). Cholesterol vehicle in experimental atherosclerosis. *Avocado Oil Journal American Collage of Nutrition* 22 (1) 52-55.
29. Krokida M.K. Marinos-Kouris D (2003) Rehydration kinetics of dehydrated products. *Journal Food Engineering*. (57): 1-7.
30. Lamiont, E, Pouliot, M.H (1998). Hydration of whey powders as determined by different methods. *Journal of Food Science* 63 (4):1-4
31. Lewicki P.P. (1998). Some remarks on Rehydration of dried foods, *Journal Food Engineering* (36): 81-87.
32. Lewicki PP. (1998). Effect of pre-drying treatment, drying and rehydration on plant tissue properties: a review, *International Journal Food Properties*; (1): 1-22.
33. Lira C.J. 2002 *Introducción al tratamiento digital de imágenes 1er edición*. Editorial IPN-UNAM; FLE México pp 13-44
34. Lopez-G. (2007), *Genómica del fruto de aguacate criollo (Persea Americana Mill var drymifolia)*. <http://www.avocadosource.com/WACC/Resumen/1c-42.pdf>
35. Mandelbrot, B. B. (1977). *The fractal geometry of nature*. 1ª edition. W. H. Freeman and Company. Nueva York, Nueva York, U.S.A p. 5-19 y 25-46.
36. Marabi A. Dilak C. Shah J. Saguy I.S. (2004). Kinetic of solids leaching during rehydration of particulate dry vegetables, *Journal Food Science*; (69): 3.
37. Marin, B.E., Lemus, M.R. (2006). La rehidratación de alimentos deshidratados. *Revista Chilena de Nutrición* 33(3) 527-538
38. Mendoza, E., and Aguilera, J., (2004). Application of image analysis for classification of ripening bananas. *Journal of Food Science* (69): 9: E 471-E477.
39. Niro, Laboratorio de Investigación (2001) Niro Method No. A 14 <http://www.niro.com/>

40. Norma Oficial NMX-F-607-NORMEX-2002.
41. Norma Oficial NMX-F-608-NORMEX-2002
42. Norma Oficial Mexicana NOM-091-SSA1-1995. Apéndice Normativo A-7.
43. Norma Oficial Mexicana NOM-086-SSA1-1994. Apéndice Normativo C.1.1.3.1
44. Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-1994.
45. Oliveira, J. (1999). Processing Foods: In: Quality Optimization and Process Assessment. Editorial.CRC. Press France.
46. Ortiz M., Dorantes L., Galindez J (2004).Effect of o novel oil extraction method avocado (Persea Americana Mill) pulp microstructure.Plant Foods for Human Nutrition. (59): 11-14.
47. Ortega-Rivas, E.(2001). Food Powders. Part 1 pp 85-86, Aspen Publisher Inc, U.S.A.
48. Otwell, W: S; Gidding, G.G. (1980).Scanning electron microscopy of squid, lalgo paelei: raw cooked, and frozen mantle. Marine Fisheries Review.(42):67-78
49. Papadakis,S., Abdul-Maleks., (2000). A versatile and inexpensive Technique for measuring color or foods. Food. Technology 54(2):48-51.
50. Pedreschi, F., Mery D, Mendoza (2004). Classification of potato chips using pattern recognition Journal of Food Science 69 (6) E1-E5.
51. Peleg, M., Normand M.D (1987).Computer simulation of the attrition patterns of particulate and agglomerates foods. Journal Food Science 52(4) 943.
52. Perea, F, M.J; Domínguez, F:R: (2009). Estudio de la microestructura de alimentos mediante técnicas microscópicas. <http://www.ciasem2009.com.ar/>
53. Rahman.M.S. (2005). Dried food properties. Changes atread. Drying Technology (23 ) 695-715.
54. Ratti.C, (2000). Rehidratation and Reconstitution of Foods. In: Advances in foods dehydration pp 237-284, CRC Press. France
55. Requejo,L., Walt, A., Roughan, G., Shroeder, R., (1999). Avocado postharvest research 1998/99: seasonal changes in lipid content and fatty

- acid composition of Hass avocados, The Horticulture and Food Research Institute of New Zealand Ltd. pp:1-20.
56. Rodriguez Suppo F. (1992). El aguacate. AGT. Editor S.A México D.F 167 pp.76
57. SAGARPA (2007). <http://www.slap.sagrpa.gob-mx>
58. Sanchez-Perez (2007). Identificación de marcadores asociados a la Resistencia de aguacate raza Mexicana (*Persea Americana Mill var Drymifolia*) al oomiceto phytophota cinnamont. Rands. Tesis doctoral UMSNH pp 106.
59. SanJuan, N., Andrés, J., Clemente, G. (2001). Modelling of the Rehydration process brócoli florets. European Food Researches Technology, 212: 449-453.
60. Santacruz-Vázquez, C., Santacruz-Vázquez, V., Chanona-Pérez J., Jaramillo-Flores Ma., Welti-Chanes, J., Gutiérrez-López G. (2007). Fractal theory applied to foods science. Encyclopedia of Agricultural, Foods and Biological Engineering. 1(1):1-13.
61. Schubert, H (1987). Food Particle Technology Part 1 Properties of particles and particulate food systems Journal of Food Engineering 6(1)1-32
62. Schubert, H (1980). Instantiation of powdered food products, International Chemical engineering. (33) 28-45.
63. Shittu, T.A., Lawal, M.O. (2007). Factors affecting instant properties of powdered cocoa beverages. Food Chemistry 100 (1): 91-98
64. Toledo R.T. (1994) Dehydration Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd Edition. Editorial Champan & Hall, New York · London, p456-506.
65. Vega A. Lemus R (2006). Modelado de la cinética de secado de la papaya chilena (*Vasconcellea pubescens*), Revista Información Tecnológica; 27(3): 23-31.
66. Weerts A.H. Martin D.R. Lian G. Melrose J.R. (2006) Modeling the hydration of foodstuffs, Simulation Modeling Practice and Theory (13): 119-128.
67. Yan, H y Barbosa-Canovas G.V (2001). Density changes in selected agglomerated food powders due to high hydrostatic pressure. Lebensm- Wiss. 34(b) 495-501.

68. Yang, H Rodríguez J.J (2001) Capitulo 1 in Propiedades físicas de los alimentos en polvo. Washington State Univesity,,Puilman

69. Yano, T. (1996). Fractal nature of food materials. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry. 60 (5): 739-744.