

Mecanismo de desagregación en gránulos de almidón

A. Herrera-Gómez*

CINVESTAV-Querétaro

Libramiento Norponiente 2000, Querétaro, 76230 México

M. Canónico-Franco

Universidad Autónoma de Querétaro

Cerro de las Campanas, Querétaro, 76010 México

G. Ramos

CICATA-IPN

José Siurob 10, Col. Alameda Querétaro, 76040 México

El almidón es el principal constituyente en los cereales (60-75% en peso). Las alteraciones que sufre al ser cocido en condiciones de agua limitada son en parte responsables de las propiedades reológicas de muchos alimentos. En el presente trabajo se presenta una metodología para el estudio de la cinética de desagregación de gránulos de almidón cocidos en presencia de agua limitada. El análisis fue realizado a partir de la distribución del tamaño de los agregados de almidón medido a través de la dispersión de luz láser. A pesar de que este sistema consiste de partículas ligadas débilmente, la metodología permitió una gran reproducibilidad en el estudio de los procesos de desagregación. El análisis de las distribuciones de tamaño de agregado mostraron la existencia de clases de agregados de diferentes tamaños, en una estructura tipo fractal. En base a estos resultados se propuso un mecanismo de reacciones en serie de primer orden, y se obtuvieron las velocidades de desagregación de las diferentes clases de agregados en función de la temperatura de cocimiento.

Palabras Clave: Almidón; Agregación; Distribución de tamaño de partícula; Clases de agregados; Dispersión de luz

Starch is the main one constituent in the cereals (60-75% in weight): The alterations that it undergoes as it is cooked under limited water conditions, are partly responsible for the rheological properties of many of our foods. In this work it is presented a methodology that allowed for the study of the kinetics of desegregation of granules of starch cooked in presence of limited water. The analysis was done through the measurement of the size distribution of the starch aggregates using laser light scattering. Even that the system consisted of loosely bounded particles, a great reproducibility was achieved. The analysis of the distributions of particle size showed the existence of classes of aggregates of different sizes, under a fractal-type structure. Based on these results, a mechanism of reactions in series of first order was proposed, and the desegregation speed of each aggregate class was obtained as a function of cooking temperature.

Key words: Starch; Aggregation; Particle size distribution; Light scattering

1. Introducción y Antecedentes

A pesar del alto grado de tecnificación de la industria alimenticia, aquella basada en el almidón como materia prima aún incluye un importante componente artesanal. Una de las áreas que requiere mayor atención, es la predicción de las propiedades del producto final a partir de las características de la materia prima durante el proceso de fabricación [1]. Con herramientas de esta índole sería posible un mejor control en línea de producción, así como el diseño de productos con propiedades específicas. Este grado de predicción podría lograrse después de entender los mecanismos que describan las interacciones y los cambios físico-químicos y estructurales de la materia prima bajo distintos tratamientos. La complejidad de la estructura del almidón hace a esta labor ardua [2]. La necesidad de técnicas que caractericen cuantitativamente la materia prima durante su procesamiento fue lo que motivó el

trabajo aquí presentado. En las etapas iniciales del proceso de fabricación, las interacciones almidón-almidón son responsables de la formación de agregados y determinan la consistencia de la masa [3, 4, 5]. Bajo la hipótesis de que las propiedades reológicas y la agregación de los gránulos de almidón son causados por el mismo tipo de cambios físico-químicos y estructurales [5, 6], se exploró a la agregación de gránulos de almidón como una técnica de caracterización para describir cambios en los productos de almidón en las etapas iniciales de fabricación. Estudios en este campo se han concentrado en la distribución de

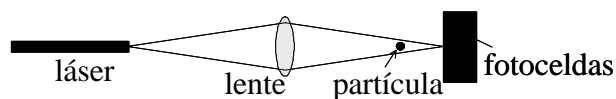


Figura 1. Arreglo experimental para la medición de distribución de tamaño de partícula a través de la dispersión de luz láser.

*aherrera@gro.cinvestav.mx

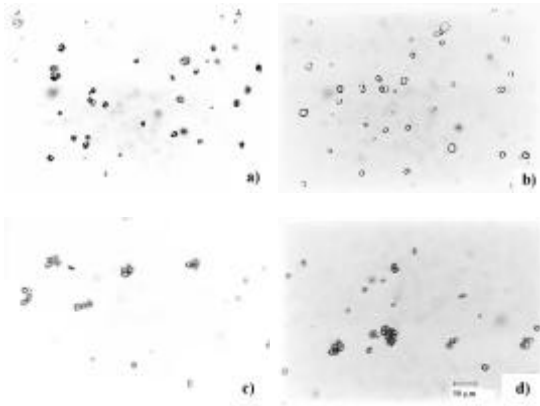


Figura 2. Fotografías de microscopía óptica de almidón cocido a 63°C dispersado en solventes con distinta constante dieléctrica: a) agua b) glicerina c) etanol, d) isopropanol.

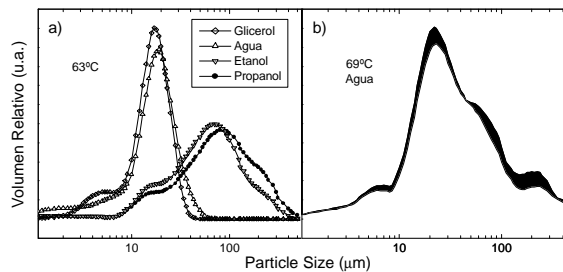


Figura 3. a) Distribución de Tamaño de Partícula para muestras de almidón cocidas a 63 °C y dispersadas en glicerina, agua, etanol y alcohol isopropílico. b) Rango de valores de la distribución para muestras preparadas en diferentes días bajo las mismas condiciones (69 °C, dispersión en agua), mostrando la reproducibilidad en las mediciones.

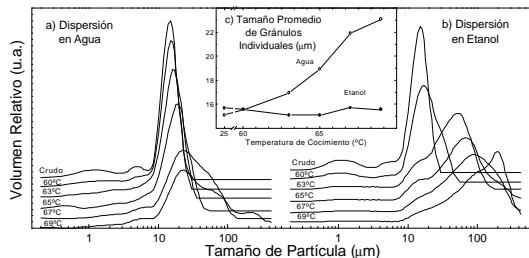


Figura 4. Distribuciones de tamaño de partícula para muestras de almidón cocidas a diferentes temperaturas por espacio de 5 minutos y dispersadas en a) agua y b) etanol. c) Tamaño promedio de los gránulos individuales en función de la temperatura de cocción.

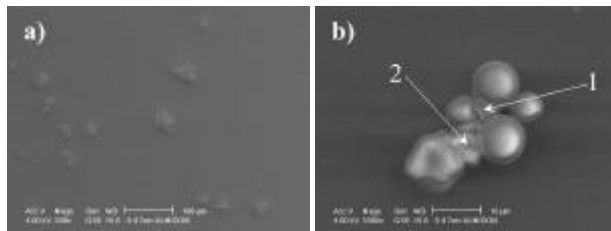


Figura 5. a) Imagen ESEM de almidón cocido a 65°C y dispersado en etanol. Es posible observar, además de los gránulos individuales, agregados de dos tipos diferentes. b) Esta figura ilustra el papel de un gránulo pequeño en la aglutinación de cuatro gránulos pequeños.

tamaño de los gránulos individuales [7, 8, 9 10 11, 12] y de grits [13, 14]. La agregación se cuantificó utilizando dispersión de luz por partículas, técnica que es capaz de proveer en forma rápida y detallada la distribución de tamaño de los agregados [15]. Con esta herramienta y el protocolo desarrollado, se obtuvo información con más precisión y reproducibilidad de la que se lograría con Tamizado y Análisis de Imagen [16, 17]. En este trabajo se propone un procedimiento para medir la población y tamaño de los agregados de almidón, y se demuestra la correlación y sensibilidad de la agregación con los parámetros de cocimiento. Se propone, además, un mecanismo que describe la formación de agregados.

En estudios relevantes sobre la formación de geles de almidón, se han encontrado evidencias de que la amilosa es responsable de la unión entre gránulos cuando se dispersan en agua por encima de la temperatura de gelatinización, y que la viscosidad del material está correlacionada con el tamaño inicial de los gránulos [18, 19]. Sin embargo, las condiciones a las que se somete al almidón en la preparación de masa son muy diferentes: la cocción se lleva a cabo en una geometría empaquetada donde el acceso al agua es limitado y el grado de gelatinización es menor [20, 21]. En este trabajo se estudió la interacción gránulo-gránulo en condiciones más acordes a la industria alimenticia.

Las propiedades del almidón varían de lote a lote y dependen de las condiciones de crecimiento, cosecha y almacenamiento. El control de calidad basado en la evaluación del producto final es costoso. La industria del almidón requiere de técnicas rápidas y sensibles a cambios en la masa, que permitan realizar ajustes en los parámetros de producción [1]. El presente trabajo establece las bases para el desarrollo de técnicas de caracterización temprana para la industria de alimentos.

2. Metodología

2.1. Preparación de Muestras

Las muestras se prepararon a partir de un mismo lote de almidón comestible de maíz (Productos de Maíz S.A. de C.V., México). El paquete se homogenizó y se conservó a temperatura ambiente en un lugar seco durante el periodo que requirieron los experimentos. El contenido inicial de humedad estimado por pérdida de peso en estufa fue del 10%. Las muestras consistieron de 1.00g de almidón mezclado con 0.80mL de agua a temperatura ambiente, resultando en muestras con contenido de humedad del 50%.

2.2. Cocimiento

La uniformidad de la temperatura es de especial importancia durante el cocimiento del almidón en condiciones limitadas de agua. Esto es debido a que los gránulos de almidón que se cuecen primero absorben el agua de sus alrededores, limitando la disponibilidad de

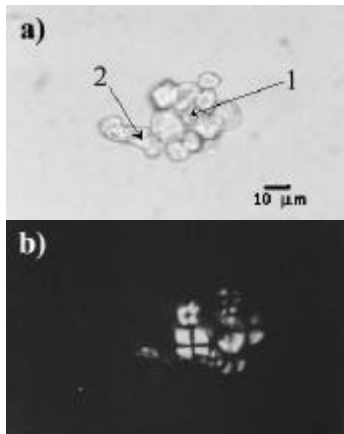


Figura 6. Imagen de un agregado obtenida con un microscopio óptico en a) campo normal y b) con luz polarizada.

agua a los gránulos aún crudos y así exacerbando las diferencias en el grado de cocción. Para minimizar gradientes de temperatura durante el cocimiento, la muestra se extendió en forma de una película delgada dentro de una pequeña bolsa de polietileno. Las bolsas fueron selladas y la muestra fue cocida por 5min en un baño controlado a temperaturas de 60, 63, 65, 67 y 69°C para cubrir todo el rango de gelatinización [22], y enfriadas inmediatamente a temperatura ambiente para detener el cocimiento. En estas condiciones, en el rango 62-63°C el porcentaje de gránulos gelatinizados (cuantificados por microscopía óptica polarizada) semeja al correspondiente a masa de maíz para la fabricación de tortilla [23].

2.3. Microscopía Óptica y Electrónica

Se emplearon dos técnicas microscópicas: Microscopía Electrónica de bajo Vacío (ESEM) y Microscopía Óptica. Las imágenes fueron preparadas dispersando típicamente 0.1 g de muestra en 100 mL de dispersante. Para microscopía óptica la solución se agitó con un agitador magnético durante 6 minutos y se colocaron dos gotas en un portaobjetos. Las ampliaciones para la observación fueron de 45 y 100x y las imágenes se adquirieron con una cámara fotográfica comercial de 35mm marca Reflex. La determinación de birrefringencia se realizó en tres imágenes conteniendo alrededor de 80 gránulos cada una. Para microscopía electrónica la muestra se agitó durante 1.5min para conservar agregados de mayor tamaño. Para la observación se depositaron dos gotas en el un portaobjetos conductor y después de evaporar el solvente, se introdujeron a la cámara de bajo vacío del ESEM. Se eligieron valores bajos de vacío, energía y corriente para minimizar las modificaciones en las muestras.

2.4. Cuantificación de Agregados

Para la determinación del tamaño de partícula se empleó la técnica de dispersión de luz láser [15] usando un

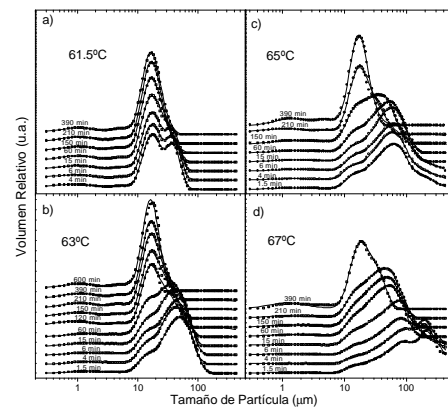


Figura 7. Evolución de la distribución de tamaño de los agregados inducida por agitación a temperatura ambiente.

granulómetro comercial (Cilas 400). Esta técnica se usa con éxito en industrias tales como la del cemento [24] y aerosol [25], y más recientemente en la industria alimenticia [26]. Un haz de luz láser ilumina una región donde se encuentran las partículas suspendidas y un arreglo de fotoceldas provee la dependencia angular de la luz dispersada (ver Figura 1). A través de un software el patrón de dispersión es transformado en una distribución de tamaño de partícula. Los cálculos son realizados usando la teoría de dispersión de Mie o alguna aproximación a ésta. Estos cálculos consideran que las partículas dispersantes de luz tienen una geometría esférica. Cuando las partículas no son esféricas, los resultados deben de interpretarse a través de diámetros efectivos que dependen de los detalles de la geometría de las partículas.

El grado de detalle en la distribución de tamaño de partícula que la dispersión de luz provee es mucho mayor del que se puede obtener por tamizado, y permite la realización de estudios que serían imposibles a través de este último [16, 17]. Otra metodología empleada es el Análisis de Imágenes [27, 28], la cual ofrece una mayor resolución que por tamizado, pero los tiempos para la acumulación de información pueden ser largos.

En este estudio se suspendieron 0.90g de la muestra en 30 mL de dispersante, se agito con un agitador magnético a una velocidad controlada por distintos tiempos que variaron desde 1.5min hasta 10h. La dispersión así obtenida se hizo pasar por una malla No. 80 para retener partículas mayores que 500 μm y después se colocó en el depósito del granulómetro con 400 mL de dispersante. Para cada dispersante se escogieron condiciones cercanas al óptimo indicado por el fabricante. Los dispersantes empleados fueron líquidos con diferente constante dieléctrica: agua ($D=78.54$), glicerina ($D= 42.5$), etanol ($D=24.3$) e isopropanol ($D=18.3$).

2.5. Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo de las curvas obtenidas para la

distribuciones de tamaño de partícula fue realizado a través de un programa Aanalyze [29] capaz de efectuar una deconvolución usando curvas gaussianas, permitiendo variar la posición y ancho (FWHM) de los picos.

2.6. Calorimetría

Para evaluar el fenómeno de gelatinización, se llevó a cabo un estudio de las propiedades térmicas de los gránulos de almidón con calorimetría diferencial de barrido (DSC). Previo al análisis, las muestras de 10 mg fueron colocadas en cápsulas de aluminio (Perkin-Elmer) y selladas herméticamente utilizando una prensa mecánica. Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido (Perkin Elmer Modelo Pyris I) conectado a una computadora para control y análisis de datos. El equipo fue calibrado con estándares de Indio y Zinc tanto para la temperatura de fusión como para el área del pico correspondiente a la entalpía de fusión. Las muestras se corrieron por duplicado y se utilizó una celda vacía para obtener la línea base de operación. Se llevó a cabo un barrido en el rango de 40 a 100 °C una razón de 5°C/Min.

3. Resultados y Discusión

3.1. Efecto del Líquido Dispersante en la Agregación de Gránulos de Almidón

Utilizando líquidos de distinta polaridad se encontró que las características de agregados varían considerablemente cuando se dispersan en líquidos de diferente constante dieléctrica. La Figura 2 muestra imágenes de campo claro obtenidas por microscopía óptica para suspensiones en agua, glicerina, etanol e isopropanol de almidón cocido a 63°C.

Las suspensiones en agua y glicerina mostraron principalmente gránulos sencillos, mientras que las suspensiones en etanol y en isopropanol mostraron además agregados de diferentes tamaños. La Figura 3a muestra la distribución de tamaño de partícula para muestras de almidón cocidas a 65 °C y dispersadas en los solventes mencionados. La ordenada representa la distribución en volumen respecto al logaritmo del tamaño ($dV/d(\log x)$), mientras que la abscisa representa los diámetros efectivos. Para el agua y la glicerina el pico predominante centró alrededor de 16µm, que corresponde al tamaño de gránulos individuales de almidón de maíz [30,31]. También se observaron picos a menores tamaños que probablemente correspondan a los corpúsculos grasos y proteicos presentes en los granos de maíz. Estos no fueron observados en los alcoholes debido posiblemente a que son disueltos por estos líquidos. Para los dispersantes de menor polaridad (etanol e isopropanol) la mayor parte del volumen correspondió a agregados, en consistencia con las observaciones microscópicas. Estos resultados también sugirieron que los gránulos se mantienen unidos por interacciones de tipo polar, y que los solventes con mayor polaridad son más eficientes para causar una mayor

disgregación.

3.2. Reproducibilidad

El muestreo apropiado de polvos requiere de un protocolo elaborado, ya que la fuerza de gravedad causa la segregación del polvo por tamaños [32]. A través de homogeneizar a los polvos de manera apropiada, y de cocerlos uniformemente, fue posible obtener resultados altamente reproducibles. Esto permitió observar tendencias claras de las distribuciones al variar las condiciones experimentales. La Figura 3b muestra el rango de valores del volumen relativo de muestras preparadas en días diferentes bajo las mismas condiciones. Mediciones con resultados similares se realizaron para otras combinaciones de temperatura de cocimiento y de solvente.

3.3 Efecto de la Temperatura de Cocimiento

La distribución de tamaño para las muestras dispersadas en alcohol mostró una marcada dependencia con la temperatura de cocimiento (Figura 4). Para la dispersión en agua el pico correspondiente a gránulos individuales dominó, y a mayores temperaturas presentó un desplazamiento hacia tamaños mayores debido a la absorción de agua (Figura 4c).

3.4. Mecanismo de Agregación

En las curvas de distribución de partícula es posible distinguir picos y hombros bien definidos que sugieren la existencia de varios tipos de agregados de gránulos de almidón (Figura 3 y Figura 4). Esto se advirtió en forma cualitativa en imágenes ESEM de agregados, que muestran gránulos individuales y agregados con tamaños distintivos (Figura 5a). Evidencias de existencia de tipos o clases de agregados de almidón ha sido reportada previamente [33, 34].

Una posible explicación del origen de diferentes tipos de agregado surgió al observar el papel que juegan los gránulos gelatinizados en la conformación de los agregados. Mientras que la mayor parte de los gránulos en la periferia del agregado mostrado en la Figura 6 manifestaron birrefringencia, el gránulo aglutinante (marcado como “1”) pareció estar gelatinizado.

Considerando que las muestras se cocieron en forma empaquetada, es probable que los agregados se formen alrededor de aquellos gránulos con un mayor grado de gelatinización. La competencia por el agua durante el proceso de gelatinización hace menos probable que dos gránulos adyacentes logren gelatinización.

La estructura formada por gránulos aglutinados alrededor de un gránulo gelatinizado forma un primer tipo de agregados, mientras que el segundo tipo esta formado por uniones de los primeros agregados entre sí. El gránulo marcado como “2” en la Figura 6 es un ejemplo de un gránulo gelatinizado actuando como enlace entre un agregado de primer tipo y otros gránulos.

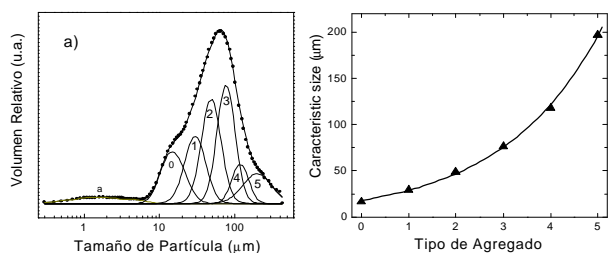


Figura 9. a) Descomposición de una curva de distribución en tipos de agregados. El pico marcado con la letra a corresponde a corpúsculos de proteína o lípidos, el marcado con el 0 al gránulo sencillo de almidón y los del 1 al 5 a los distintos clases de agregados. b) Tamaño representativo de las clases de agregados graficada en función del número de clase.

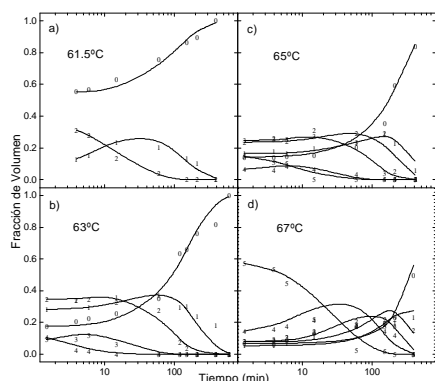


Figura 10. Evolución de las poblaciones de los diferentes tipos de agregados. Ya que los gránulos individuales (marcados con el número 0) no se fraccionan, su población sólo aumentó con el tiempo de agitación. En contraste, la población de agregados de mayor tamaño (marcados con el 4 y 5) para cada temperatura sólo disminuyó con la agitación. Los agregados intermedios (marcados con el 2 y 3) sufren un comportamiento no monótono debido a que su población es incrementada por la fractura de agregados de mayor tamaño, y disminuida por su propia disgregación.

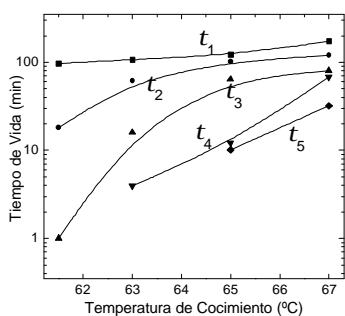


Figura 11. Tiempo de vida de los agregados en función de temperatura de cocimiento.

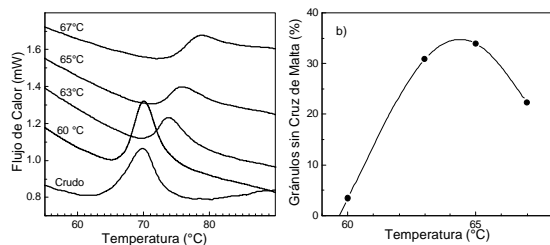


Figura 12. a) Entalpía de gelatinización en función de la temperatura de precocido por DSC. b) Porcentaje de gránulos que no presentan cruz de malta.

El número de sitios de interacción entre dos gránulos está relacionado a la superficie de contacto que a su vez depende de la capacidad de deformación de los gránulos. El papel aglutinante de los gránulos gelatinizados no sólo se debe a su mayor número de puntos de interacción, sino a que adquieren una mayor capacidad de deformación y pueden interactuar con otros gránulos a través de un área mayor (Figura 5b).

3.5. Cinética de Desagregación

La cinética de desagregación aportó información valiosa para explicar el mecanismo de agregación. La agitación causó la eventual desaparición de los agregados y un crecimiento continuo de la población de gránulos individuales (Figura 7).

Es interesante observar que la evolución de la población de algunos agregados no fue monótonamente decreciente, sino que en ciertos periodos su población aumentó con el tiempo. La comparación entre las curvas de distribución con 1.5 y 6min de agitación en muestras cocidas a 65°C permite observar que el volumen asociado a agregados de tamaño alrededor de 70μm creció debido a la destrucción de agregados de mayor tamaño (Figura 8).

La destrucción de estos últimos no se vio reflejada en el aumento en la población de gránulos aislados, sino que casi la totalidad de ese material pasó a formar parte de otros agregados. Esto indicó que la destrucción de los grandes agregados no es a través del desmoronamiento gradual al liberar gránulos individuales, sino a través de grandes fracturas para favorecer la formación de otros agregados de menor tamaño.

3.6. Protocolo de Análisis de la Distribución de Tamaño de Agregado

Estos fenómenos sugirieron una metodología para obtener la información que se manifiesta en la estructura de las curvas de distribución de tamaño de agregado. Bajo este esquema, las curvas fueron descritas por picos representativos de los distintos tipos de agregados (Figura 9a). Es importante mencionar que, aunque esta distribución podría ser ajustada con un número mejor de picos, la exigencia de que el mismo conjunto de picos ajustara todos los espectros de la Figura 7 impuso condiciones mucho más estrictas que llevaron a la necesidad de considerar los picos mostrados en la Figura 9a. El ajuste a todas las curvas usando estos picos corresponde a las líneas continuas de la Figura 7. El análisis de la cinética de desagregación para muestras cocidas a distintas temperaturas exigió conjuntos de picos prácticamente idéntico entre si, indicando que los mismos tipo de agregados existen en muestras cocidas a las distintas temperaturas en el rango considerado.

3.7. Configuración de los Agregados

Los tamaños representativos (T) de los picos mostrados en

la Figura 9a fueron graficados en función del número de tipo (Figura 9b). Fue interesante observar un comportamiento sumamente regular y, más aún, una dependencia de tipo exponencial ($T \approx 18.1 \times 1.6^n$, donde n es el tipo de agregado). El tamaño representativo de cada agregado fue 1.6 veces el del anterior en una estructura tipo fractal. Como $1.6^3 \sim 4$, el volumen representativo de cada tipo de agregado fue aproximadamente cuatro veces el volumen del anterior.

Esto no implica que no existieron agregados lineales formados por dos o más componentes, sino que fueron rápidamente destruidos y no observados. Aquellos agregados que encuentran suficientes aglutinantes para formar una estructura más compacta, tal como un tetraedro, tienen un tiempo de vida más grande. La teoría de los fractales ha sido utilizada para describir la interacción entre gránulos de almidón [35, 36, 37] así como la estructura de la agregación de otros polvos. Aunque podría ser arriesgado usar este término para describir la configuración de los agregados, la existencia de distintos tipos de agregados y la destrucción de unos para formar otros acumula evidencia en esta dirección. Sin embargo, el resto del análisis aquí presentado no depende del tipo de configuración. Lo importante en la discusión que prosigue es la posibilidad de describir a las curvas de distribución en función de picos espaciados regularmente en la escala logarítmica del tamaño de partícula.

3.8. Análisis Detallado de la Cinética de Desagregación

La Figura 10 muestra la evolución de la población de los distintos tipos de agregados.

Bajo este esquema se propusieron las siguientes ecuaciones para representar la evolución de la población de los agregados V_i , (V_0 corresponde a los gránulos individuales):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} V_0 &= -\frac{V_0}{t_1} & \frac{d}{dt} V_2 &= -\frac{V_2}{t_2} + \frac{V_3}{t_3} & \frac{d}{dt} V_4 &= -\frac{V_4}{t_4} + \frac{V_5}{t_5} \\ \frac{d}{dt} V_1 &= -\frac{V_1}{t_1} + \frac{V_2}{t_2} & \frac{d}{dt} V_3 &= -\frac{V_3}{t_3} + \frac{V_4}{t_4} & \frac{d}{dt} V_5 &= -\frac{V_5}{t_5} \end{aligned} \quad (1)$$

t_i son el tiempo de vida medio de los agregados. En estas ecuaciones están implícitas varias hipótesis sobre el mecanismo de desagregación:

- El fraccionamiento de los agregados es de carácter aleatorio. La velocidad de fractura es proporcional al número de agregados sin contener efectos de envejecimiento.
- La disgregación es a través de fracturas, de manera que la población de los agregados de tipo i es alimentada sólo por la disgregación de los agregados de tipo $i+1$.
- Una vez fracturados los agregados, estos no se vuelven a formar. Una probabilidad finita de reconformación de agregados se habría visto reflejada en una distribución en equilibrio donde conviven varios tipos de agregados, y no en la desagregación última

encontrada a largos tiempos de agitación. La ausencia de reconformación se debe a que el alcohol es capaz de interaccionar con las superficies expuestas.

El sistema de ecuaciones diferenciales 0 fue resuelto analíticamente y se encontraron los valores de los t_i que mejor reprodujeran el comportamiento de la población de los agregados mostrado en la Figura 10. El cálculo de la cinética, representado por las líneas continuas, reproduce remarkablemente el comportamiento de los datos experimentales.

El tiempo de vida de los agregados de menor tamaño no cambió drásticamente con la temperatura de cocción (Figura 11). Esto puede observarse directamente en los datos de la Figura 7, donde se muestra que estos agregados pequeños estuvieron presentes a tiempos largos de exposición a la agitación para todas las temperaturas consideradas. Esto indicó que el aumento en la temperatura en el rango considerado no cambió radicalmente el grado de gelatinización, sino que el efecto principal radicó en el número de gránulos gelatinizados. El incremento en la temperatura aumentó la probabilidad de que un gránulo no gelatinizado sea vecino de más de un gránulo gelatinizado, dando lugar a la creación de agregados de mayor tamaño. Considerando que el tiempo de vida de los agregados de mayor tamaño depende del número promedio de gránulos gelatinizados que los aglutinan, es explicable que el tiempo de vida de estos agregados haya mostrado una dependencia más fuerte con la temperatura de cocimiento (Figura 11).

4. Comparación con otras Técnicas Experimentales

La entalpía de gelatinización fue estimada por DSC (Figura 12a) [38]. El comportamiento de la entalpía coincide con un aumento en la agregación para temperaturas por encima de los 60°C y con la poca proporción de gránulos sin birrefringencia (Figura 12b) a esa temperatura. La interacción almidón-almidón, responsable de la textura de la masa, es determinado por cambios locales (Sección 0), mientras que DSC mide cambios globales. La determinación de cruz de malta es una técnica muy empleada para cuantificar gelatinización [39]. El conteo por cruz de malta puede llevar a resultados contradictorios porque los gránulos muy gelatinizados pueden escapar a la vista bajo el microscopio (Figura 12b). La formación de agregados está relacionada con el número de gránulos gelatinizados (ver Secciones 0 y 0), y puede ser considerada como una manera más rápida y representativa de la cuantificación de gránulos gelatinizados.

5. Conclusiones

A través del protocolo de medición aquí propuesto, la dispersión de luz puede ser utilizado para obtener, en forma reproducible, la dependencia de la agregación de gránulos de almidón con los parámetros de cocimiento. La agregación disminuyó al utilizar como dispersante líquidos de alta polaridad. Se encontró que la agregación es sumamente sensible al grado de cocimiento del almidón si

se utiliza alcohol como dispersante. La agregación de gránulos de almidón pudo ser explicada a través de la formación de clases de agregados, en los que agregados forman entre si otros agregados de mayor tamaño. Durante el cocimiento del almidón, la gelatinización aleatoria de gránulos promovió la formación de agregados de distintas clases de tamaño. La descomposición de los agregados fue a través de fracturas que dan lugar a agregados de menor tamaño. La cinética de desagregación pudo ser explicada a través de un modelo de destrucción aleatoria con tiempos de vida bien definidos para las distintas clases de agregados. El hinchamiento de gránulos precocidos continuó cuando entraron en contacto con agua adicional, pero se detuvo cuando la dispersión fue realizada en alcohol.

Agradecimientos

Los autores deseamos expresar nuestro agradecimiento a Juan Manuel Figueroa Estrada y a Feliciano Sánchez Sinencio por su apoyo en la realización de este trabajo, y a Servando Aguirre Tostado, Gonzalo Velázquez de la Cruz, Marcela Gaytán Martínez, Eduardo Morales Sánchez, Fernando Martínez Bustos, Juan Vélez Medina, Rivelino Flores Farías y Gerónimo Arámbula Villa por su asistencia técnica.

Referencias

- [1] P. Aggarwal, D. Dollimore. *Instrumentation Science & Technology* **27**,191 (1999).
- [2] T. Otan, T. Yoshimo, S. Hagiwara, T. Maekawa. *Starch/Starke* **52**, 150 (2000).
- [3] H. Larsson, and A.C.Eliasson. *Journal of Texture Studies* **28**,487 (1997).
- [4] D. Zhang, W.R. Moore. *J. Sci. Food Agric* **74**,490 (1997).
- [5] D. Sahai, M. O. Buendia, and D. S. Jackson. *AACC Annual Meeting*. (2000).
- [6] Y. Mao and R.A. Flores. *AACC Annual Meeting*. (2000).
- [7] C.M.L. Franco, S.J. doPreto, D.Q. Tavares. *Starch* **50**, 193 (1998).
- [8] S. Sahlstrom, E. Brathen, K. Autio. *Journal of Cereal Science* **28**, 157 (1998).
- [9] P.M.S. DaSilva, J.C. Oliveira, M.A. Rao. *Cereal Chemistry* **73**, 536 (1996).
- [10] Kanatani, and Y. Iwasaka. *AACC Annual Meeting* (2000).
- [11] M.A. Rao, J. Tattiyakul. *Carbohydrite Polymers* **38**, 123 (1999).
- [12] M.Ö. Raeker, C.S. Gaines, P.L. Finney, and T. Donelson. *Cereal Chem* **75**, (5) 721-728 (2000).
- [13] M.N. Khan, M.C. Des Rosiers, L.W. Rooney, R.G. Morgan, and V.E. *Cereal Chem* **59**, 279 (1982).
- [14] Desrumaux, J.M. Bouvier, and J. Burri. *Journal of Food Science* **63**, 857 (1998).
- [15] M.F. Devaux, F. Le Deschault de Monredon, D. Guibert, B. Novales, and N. J. Abelcassis *Sci. Food Agric* **78**, 237 (1998).
- [16] R.P. Loveland. *Spie Milestone Series MS* **163**, 389-421 (000).
- [17] F.M. Etzler and R. Deanne. *Particle & Particle Systems Characterization* **14**, 278 (1997).
- [18] J. Shim, and S.J. Mulvaney. *J. Sci. Food Agric* **81**, 706 (2001).
- [19] M.A. Rao, P.E. Okechukwu, and J.C. Oliveira. *Carbohydrate Polymers* **33**, 273 (1997).
- [20] Fankem, G. DeStefano, P. Piacquadio, V. Sciancalepor *Tecnica Molitoria* **51**, 1085 (2000).
- [21] D. Sahai and D.S. Jackson. *Starch/Stärke* **46**, (12) 457-463 (1994).
- [22] T.R. Noel, G. Ring Stephen. *Carbohydrate Research* **277**, 203 (1992).
- [23] R.L. Pflugfelder, L.W. Rooney, and R.D. Waniska. *Masa. Cereal Chem.* **65**, 262 (1988).
- [24] M. Bumiller, A. Malcolmson. *World Cement* **29**, 50 (1998).
- [25] N.N. Wang, X.H. Yu. *In-situ laser measurement of droplet size of aerosols. Review of Laser Engineering* **26**, 42-5 (1998).
- [26] D. Sahai, M.O. Buendia, D.S. Jackson. *Cereal Chem.* **78**:14. (2001).
- [27] K.A. Harrigan. *Cereal Foods World.* **42**:30. (1997).
- [28] D.B. Bechtel, J.D. Wilson, and C. S. Gaines. *AACC Annual Meeting*. (2000).
- [29] Herrera-Gómez. *Internal Report, CINVESTAV-Qro. (Registration number S.E.P. 03-1999-051710412300, México)* (1999).
- [30] D.G. Peterson, R.G. Fulcher. *Food Research International* **34**, 357 (2001).
- [31] P.M.S. DaSilva, J.C. Oliveira, M.A. Rao. *Journal of texture studies* **28**, 12 (1997).
- [32] D. Hirshfeld, D.C. Rapaport. *Physical Review. E* **56**, 2012 (1997).
- [33] L. Farmakis, J. Sakellaraki, A. Koliadima, D. Gavril, G. Karaiskakis. *Starch/Starke.* **52**, 275 (2000).
- [34] D.J. Gallant, B. Bouchet, P.M.Baldwin. *Carbohydrate Polymers* **32**, 177 (1997).
- [35] S. Hsu, S. Lu, and C. Huang **65**, 215-220 (2000).
- [36] S. Pikus, J. Jamroz, E. Kobylas. *Int. Agrophysics* **14**, 93-98 (2000).
- [37] P. Roger, L.A. Bello-Perez, P. Colonia. *Polymer* **40**, 6897 (1999).
- [38] D.K. Fisher. and D.B. Thompson. *Cereal Chemistry* **73**, 344 (1997).
- [39] M.H.Gomez, J.K. Lee, C.M.,McDonough, R.D.,Waniska, and L.W. ,Rooney. *Cereal Chem* **69**, 275 (1992).