

Determinación de los cambios morfométricos, a partir de la dimensión fractal y su relación con los parámetros fisicoquímicos de un producto de harina de trigo en forma laminar durante el proceso de freído por inmersión

Santacruz-Vázquez Claudia*; Santacruz-Vázquez Verónica; Luna Cerón Higinio
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Facultad de Ingeniería Química
Ciudad Universitaria. Puebla, México. CP. 72560.

(Recibido: 20 de enero de 2011; Aceptado: 10 de noviembre de 2011)

Se obtuvieron los parámetros fisicoquímicos contenido de humedad, contenido de aceite total, absorbido, porcentaje de expansión, porosidad y cambios morfométricos de la superficie de láminas de harina de trigo durante el proceso de freído. Se empleó un sistema de freído experimental, las temperaturas del aceite de freído fueron 140°, 160°, 180° y 200°C. Se observó que el uso de alta temperatura del aceite (200°C) generó una mayor deshidratación, mayor absorción de aceite, mayor expansión y porosidad del producto, parámetros que se relacionaron con los cambios morfométricos de la superficie de la muestra, reportando valores de la dimensión fractal normalizada de su textura (FD_N) entre 1.160 ± 0.002 .

Palabras clave: Freído; Porosidad; Cambios microestructurales; Dimensión fractal normalizada de la textura

Physicochemical parameters, moisture content, total oil absorbed content, expansion percentage, texture, porosity, and morphometric changes of the surface of wheat flour laminates during frying process were obtained. An experimental frying system was used. Frying oil temperatures were 140°, 160°, 180° and 200°C. It was observed that a frying oil temperature of 200°C generated a highest dehydrated, highest oil absorption, highest expansion and porosity of the final product phenomenon related to morphometric changes on the surface of the sample, with normalized fractal dimension of texture of images (FD_N) values between 1.160 ± 0.002 .

Keywords: Frying; Porosity; Microstructural changes; Normalized fractal dimension of texture

1. Introducción

El freído es una operación de cocimiento de alimentos por inmersión en aceite comestible caliente ampliamente empleada en la industria alimentaria; que presenta grandes ventajas en cuanto a la impartición de sabor, textura y apariencia apetecible en los alimentos [1, 2].

Durante el freído de los alimentos se presentan diversos fenómenos, entre ellos: cambios en las propiedades mecánicas y microestructurales del producto y cambios fisicoquímicos tales como cocimiento, gelatinización de almidón, oscurecimiento no enzimático, hidrólisis, deshidratación y agregación de biopolímeros, desnaturalización de proteínas, entre otras reacciones que afectan la calidad del producto final e imparten las propiedades sensoriales características de los alimentos fritos [2, 3, 4].

La operación de freído es una operación compleja, dado que se presentan fenómenos de transferencia de masa y calor en el alimento, mismos que se encuentran relacionados y controlados por las condiciones de operación en las que se desarrolla el proceso entre ellas, tiempo de freído, temperatura y viscosidad del aceite, tensión superficial y composición del material alimenticio [4, 5].

Aunque el freído es una operación ampliamente usada en la industria, el seguimiento y predicción de los parámetros de proceso de freído solo ha sido posible a través de grandes suposiciones y el empleo de modelos empíricos y semiempíricos, que describen procesos en condiciones muy específicas [6, 7].

Durante el freído, el alimento es puesto en contacto con aceite caliente cuya temperatura oscila entre 150° y 200° C, produciéndose una vigorosa formación de burbujas generadas por la evaporación y expansión del vapor de agua presente en el alimento al contacto con el aceite caliente. El efecto generado durante la formación de las burbujas se asemeja a un conjunto de chimeneas de vapor de agua que emergen desde el interior del producto hasta la superficie del aceite. Dichas burbujas se difunden por efecto de la gran presión interna generada por la evaporación del agua contenida en el alimento y desde la superficie del alimento se difunde en la fase aceitosa. No obstante a medida que transcurre el freído, la cantidad de burbujas disminuye, como consecuencia de la reducción de la humedad del producto [8, 9, 10]. Durante el proceso de freído, la presencia de procesos difusivos del vapor de agua desde el interior hasta el exterior del producto provoca cambios microestructurales en el tejido, que dan origen a grietas, poros y rugosidad de la superficie del producto final [11, 12].

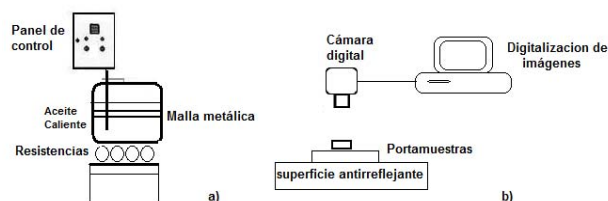


Figura 1. a) Diagrama que ilustra el equipo experimental empleado b) Diagrama que ilustra el equipo experimental empleado para la evaluación de los cambios morfométricos de la superficie del producto.

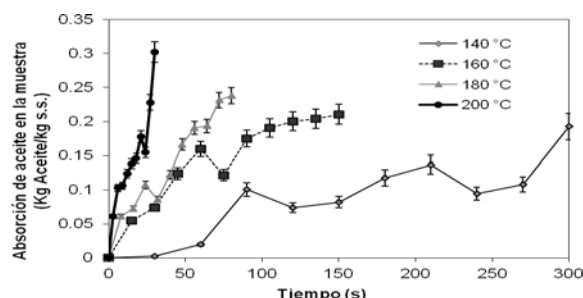


Figura 2. Absorción de aceite la muestra (Kg Aceite/Kg s.s.) en función del tiempo de freído.



Figura 3. Ilustración de la expansión de la muestra durante el freído.

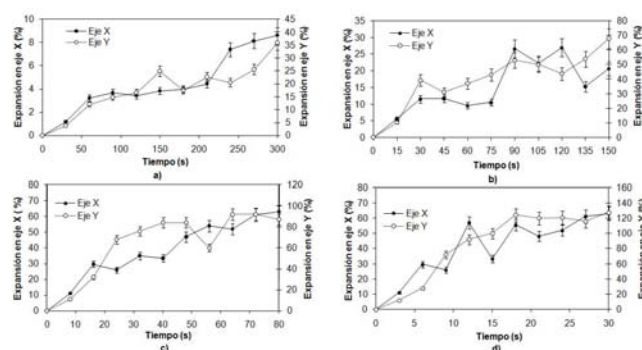


Figura 4. Porcentaje de expansión E_x , E_y de la muestra en función del tiempo y temperatura de freído a) 140°C b) 160°C c) 180°C d) 200°C

Actualmente el análisis de imágenes y el concepto de dimensión fractal son considerados herramientas de gran valor práctico para evaluar los cambios morfométricos de los alimentos procesados [13, 14], dado que se pueden obtener datos numéricos a partir de una imagen tales como circularidad, forma y orientación de poros [15], así como los cambios en la forma y textura de las imágenes [16, 17].

La textura fractal representa la distribución espacial de las variaciones de las sombras que se generan en las mismas imágenes [18, 19, 20] existiendo diferentes métodos para evaluarla, entre ellos se encuentra el método de Richardson (cuyo patrón son líneas de medición) o el método de conteo de cajas en el cual utilizan cuadros o cubos como patrón de medición [21]. La dimensión fractal de la textura de una imagen (DF), cuantifica su irregularidad y éste concepto ha sido empleado para determinar el efecto de las variables de operación de un proceso, asociados a los cambios de la microestructura del alimento [22]. Superficies lisas, sin rugosidad presentan valores numéricos próximos a 2 ($DF_{SDBC} > 2$), mientras que superficies altamente rugosas presentan un incremento en los valores de la dimensión fractal [16, 18]. El objetivo del presente trabajo es relacionar la variación de las propiedades fisicoquímicas como la impregnación de aceite, expansión volumétrica, cambio en la textura y porosidad con los cambios morfométricos que experimenta un producto extruido de harina de trigo durante el proceso de freído y su evaluación mediante el análisis de imágenes y la dimensión fractal normalizada de la textura de su imagen.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materia prima

La materia prima utilizada en el presente trabajo se adquirió en un supermercado local (Puebla, México). De acuerdo a la hoja técnica proporcionada por el productor, la materia prima fue elaborada con harina de trigo, almidón de maíz, sal yodada y bicarbonato de sodio (Palmex Alimentos, México). En la Tabla 1, se presenta la composición química de la materia prima.

2.2. Proceso de freído

Se empleó un sistema de freído experimental que consistió en el montaje de un recipiente de acero inoxidable con capacidad de 350 mL de aceite, acoplado a un sistema de calentamiento y control de temperatura (Thermolyne Cimarec 2, Barnstead International, EUA). Para la experimentación se utilizó aceite vegetal puro de cártamo (350.0 ± 0.5 mL, Oléico, México). La temperatura del aceite se determinó mediante un termómetro de inmersión digital con un rango de lectura de -50°C a 350°C (Testo, 905-T1, Buenos Aires, Argentina) con exactitud de $\pm 1^\circ\text{C}$. La experimentación se realizó manteniendo constante la temperatura del aceite (140° , 160° , 180° y 200°C) y una relación producto:aceite 1:50 (Figura 1a).

Tabla 1. Composición química del alimento extruido previo al freído.

Componente	Composición (g/100 g)
Grasa	3.17 ± 0.05
Carbohidratos Totales	87.26 ± 0.02
Fibra dietética	3.84 ± 0.06
Proteínas	5.20 ± 0.09

El alimento extruido se introdujo en el aceite caliente para su freído durante periodos específicos tal como se presenta en la Tabla 2. El tiempo de monitoreo y freído de las muestras para cada temperatura se determinó previamente, dado que la temperatura del aceite tiene un efecto importante del producto final en la expansión, en la textura y desarrollo del color.

2.3. Análisis de las muestras

2.3.1. Contenido de humedad en la muestra durante el freído

El contenido de humedad de las muestras se determinó mediante el método 20.013 de la A.O.A.C. [23] empleando una estufa de vacío (Lab Line, 1410-E, EUA). La determinación del contenido de humedad en las muestras en los tiempos de monitoreo propuestos se realizó por quintuplicado.

2.3.2. Absorción de aceite en la muestra durante el freído

La absorción de aceite en el producto durante el proceso de freído, se determinó usando el equipo de extracción sólido-líquido Soxhlet (SEV, México) utilizando hexano (Meyer, México) como solvente [9, 10]. Se reportó el contenido total de aceite absorbido expresado en g aceite/g s.s y las pruebas se realizaron por quintuplicado reportando el promedio aritmético.

2.3.3. Porcentaje de expansión del producto durante el freído

Las dimensiones del producto durante el freído se determinaron utilizando un calibrador vernier (Serie 522, Mitutoyo, Japón). Se obtuvieron mediciones de las dimensiones de diez muestras para cada uno de los tiempos de monitoreo de los tratamientos estudiados. El promedio aritmético de cada determinación fue empleado en las ecuaciones (1) y (2), para la determinación del grado de expansión en el eje X y eje Y respectivamente [8].

$$E_x = \left(\frac{dx(t) - dx_0}{dx_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$E_y = \left(\frac{dy(t) - dy_0}{dy_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

En las cuales:

E_x = Porcentaje de expansión del producto en el eje X

E_y = Porcentaje de expansión del producto en el eje Y

dx_0 = Dimensión inicial de la muestra en el eje X (mm)

$dx(t)$ = Dimensión de la muestra en el eje X (mm) a un tiempo (t) de freído

dy_0 = Dimensión inicial de la muestra en el eje Y (mm)

$dy(t)$ = Dimensión de la muestra en el eje Y (mm) a un tiempo (t) de freído

2.3.4. Evaluación de los cambios morfométricos de la superficie del producto durante el freído

Los cambios morfométricos de la superficie del producto durante el freído, se evaluaron mediante la obtención de la dimensión fractal normalizada de la textura superficial de las imágenes de las muestras sometidas al proceso de freído para los cuatro tratamientos (Figura 1b). Las muestras se depositaron en el sistema de freído, previo calentamiento del aceite a la temperatura estudiada; transcurrido el tiempo de freído, las muestras fueron retiradas del aceite y escurridas para eliminar el exceso de aceite. Posteriormente se eliminó el aceite de la superficie del producto secando con papel absorbente. La adquisición de las imágenes se realizó utilizando un sistema de captura de imágenes en tiempo real el cual consistió en una cámara (Cannon Power Shot A650, Japón) adaptada al sistema de freído, colocada a 35 ± 2 cm del recipiente de aceite formando un ángulo de 90° entre el lente de la cámara y el recipiente que contiene el aceite y la muestra, además de colocar una superficie antirreflejante en los alrededores del sistema de captura de imágenes para eliminar interferencias con la luz del entorno.

Las imágenes obtenidas fueron transferidas a una computadora para su digitalización con una resolución de 1200×1600 píxeles y procesamiento en archivo con formato TIFF [28]. Los cambios morfométricos se determinaron mediante la obtención de la dimensión fractal normalizada de la textura superficial de las imágenes obtenidas de las muestras (Ecuación 4) [17]:

$$DF_N = \frac{DF}{DF_0} \quad (4)$$

En la cual:

DF_N = Dimensión fractal normalizada de la textura de la imagen al tiempo (t) de freído

DF = Dimensión fractal de la textura de la imagen de la muestra al tiempo (t) de freído

DF_0 = Dimensión fractal de la textura de la imagen de la muestra al tiempo (t=0) de freído

La DF y DF_0 fue calculada a partir de las imágenes digitales, para lo cual se utilizó el Software Image J 1.34 (National Institute of Health, NIH, EUA), específicamente empleando el algoritmo propuesto por Per Henden

Tabla 2. Temperatura y tiempo de monitoreo empleados en el proceso de freído de la muestra.

Temperatura del aceite (°C)	Tiempos de proceso (s)
140	30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300
160	15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150
180	8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80
200	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30

(Versión 1.0, 2006) [29] que utiliza el método de conteo de cajas (Scanning Differential Box Counting Method). El principio utilizado para determinar la dimensión fractal a partir del método de conteo de cajas, se basa en la obtención de una imagen digital que es interpretada como un plano cartesiano en tres direcciones, siendo los ejes X y Y (en píxeles) el área de la imagen y cada par coordenado una posición en el plano y el eje Z corresponde a los valores de la intensidad luminosa de la imagen en escala de grises cuyos valores se encuentran entre 0 y 255. En el procedimiento de cálculo, la imagen es dividida en volúmenes (cajas) virtuales de tamaño r , el software realiza el conteo del número de cajas interceptadas (Nr) de tamaño (r), y realiza iteraciones simultáneas disminuyendo el número de tamaño de caja. Los tamaños de caja utilizados fueron de 4, 5, 10, 13, 20, 26, 52, 65, 130 y 260 píxeles. La dimensión fractal de la textura de la imagen de la muestra al tiempo t de freído obtenida a través del método de conteo de cajas que realiza el software se determina a partir de la pendiente obtenida de la regresión lineal por mínimos cuadrados del gráfico logarítmico de Nr vs. $(1/r)$ (Ecuación 5) [30].

$$DF = \frac{\log(Nr)}{\log(1/r)} \quad (5)$$

En la cual:

DF = Dimensión fractal de la textura de las imágenes de la muestra al tiempo (t) de freído

Nr = Número de cajas interceptadas

(r) = Tamaño de la caja

2.3.5. Densidad real

La densidad real (ρ_s) de la muestra durante la cinética de freído se determinó a partir del peso neto de la muestra pulverizada previamente entre su volumen neto, según el método de picnometría de helio (AccuPyc 1340, Micrometric, EUA) [6, 25, 26] previo pesaje de la muestra en una balanza analítica (Voyager, Ohaus, EUA) reportando el promedio aritmético de cinco réplicas [6, 25, 26].

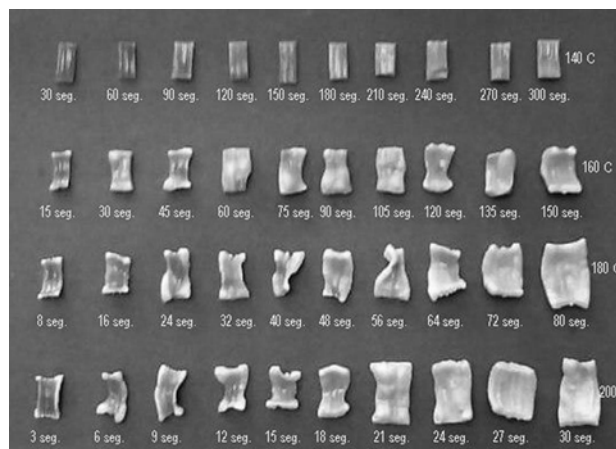
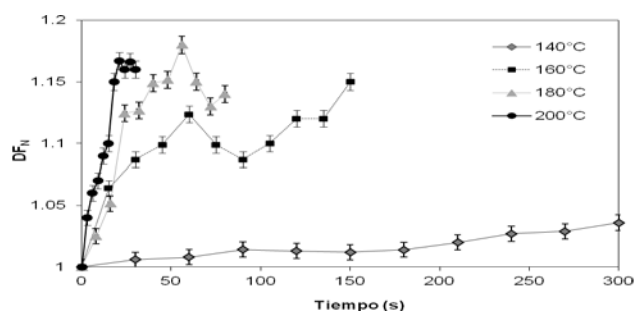
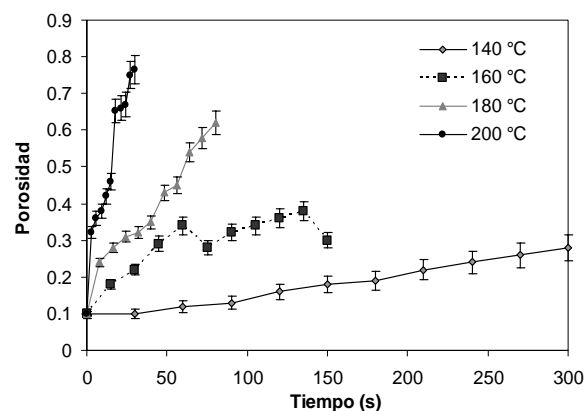
**Figura 5.** Galería de imágenes de las muestras a diferentes tiempos de proceso y diferentes temperaturas de aceite de freído.**Figura 6.** Efecto del tiempo y temperatura del aceite de freído en la dimensión fractal normalizada de la textura del producto freído a las diferentes temperaturas en estudio.**Figura 7.** Datos de porosidad de producto en función del tiempo de proceso y temperatura del aceite utilizado en el freído.

Tabla 3. Valores promedio del contenido de humedad y contenido total de aceite absorbido en la muestra al final del proceso de freído.

Temperatura del aceite de freído (°C)	Contenido de humedad final (Kg H ₂ O/Kg s.s.)	Cantidad de aceite absorbido en el producto (Kg aceite/Kg s.s.)
140	0.165±0.002	9.45±0.3
160	0.158±0.001	10.26±0.1
180	0.080±0.004	12.02±0.6
200	0.068±0.002	14.70±0.3

2.3.6. Densidad aparente

Se determinó la densidad aparente de la muestra durante la cinética de freído (ρ_b kg/m³), usando la técnica de desplazamiento con tolueno (Meyer, México). Se obtuvo el cociente del peso de la muestra entre el volumen de tolueno desplazado. La prueba se realizó por quintuplicado, reportando el promedio aritmético [6, 25, 26].

2.3.7. Porosidad de la muestra durante el freído

La porosidad del producto (ϕ) a los diferentes tiempos de freído y diferentes temperaturas del aceite se determinó de acuerdo a la ecuación 3, [25].

$$\phi = 1 - \left(\frac{\rho_b}{\rho_s} \right) \times 100 \quad (3)$$

En la cual:

ϕ = Porosidad del producto al tiempo (t) de freído

ρ_b = Densidad aparente del producto al tiempo (t) de freído (Kg/m³)

ρ_s = Densidad real del producto al tiempo (t) de freído (Kg/m³)

2.3.8. Análisis de microestructura interna del producto durante el freído

Para determinar los cambios microestructurales en el interior del producto después del proceso de freído, se realizaron tres cortes micrométricos de 1.5±0.1 mm con un bisturí a lo largo del eje Y de la muestra en tres diferentes posiciones (extremos superior e inferior y centro de la muestra) para su posterior análisis microscópico. El microscopio empleado en la experimentación es un microscopio estereoscópico (Stemi 2000, Carl Zeiss, Alemania) con una amplificación de 4X, el cual tiene acoplado una cámara (Cannon Power Shot A650, Japón), un sistema estándar de iluminación consistente en dos lámparas de cuello de ganso de 6V y 15 W Carl Zeiss, Alemania) y una superficie anti-reflejante como pantalla para eliminar interferencias con la luz del entorno. Cada una de las imágenes obtenidas de los cortes de los productos fritos fue transferida a una computadora (HP Pavilion dv7, E.U.A.) para su digitalización con una

resolución de 1200X1600 pixeles y procesamiento en archivo con formato TIFF [27, 28].

2.3.9. Textura del producto durante el freído

La textura del producto frito se determinó utilizando un texturómetro (Texture Analyzer TA-XT2, NY, EUA), mediante la técnica de penetrometría [3, 4], utilizando una punta de muestreo de 0.5 cm de diámetro a una velocidad de descenso de 6 mm/s. Siendo el parámetro de medición la fuerza máxima de ruptura expresado en Newtons (N) y reportando el promedio aritmético de cinco réplicas [24].

2.3.10. Análisis estadístico de los datos

Los datos experimentales, se sometieron a un análisis de varianza considerando un nivel de confianza del 95 %. Los cálculos correspondientes se efectuaron con el programa estadístico SPSS para Windows versión 9.0 a un nivel de significancia de 0.05.

3. Resultados

3.1. Contenido de humedad y Absorción de aceite en la muestra durante el freído

En la Tabla 3, se presenta el contenido de humedad y el contenido de aceite total absorbido (b. s.) en el producto al término de la cinética de freído a las diferentes condiciones estudiadas. El contenido de humedad inicial del producto de harina de trigo antes de iniciar la cinética de freído fue de 0.206±0.001 Kg H₂O/Kg s.s., presentando una reducción del 19%; 23.3%; 61.6% y 66.99% del contenido de humedad inicial de las muestras para los tratamientos a 140°, 160°, 180° y 200°C respectivamente al final del proceso de freído.

El contenido de humedad del producto al final del proceso se redujo por la evaporación del agua, siendo esta reducción dependiente de la temperatura del aceite empleada. De los resultados presentados en la Tabla 3 se observa la existencia de una relación entre la cantidad de aceite absorbido en el producto y la temperatura del aceite empleado, dado que a mayor temperatura (200°C), se obtuvo una cantidad de aceite absorbido en el producto significativamente mayor ($P < 0.05$) que la obtenida a temperaturas de 140°, 160°C y 180°C.

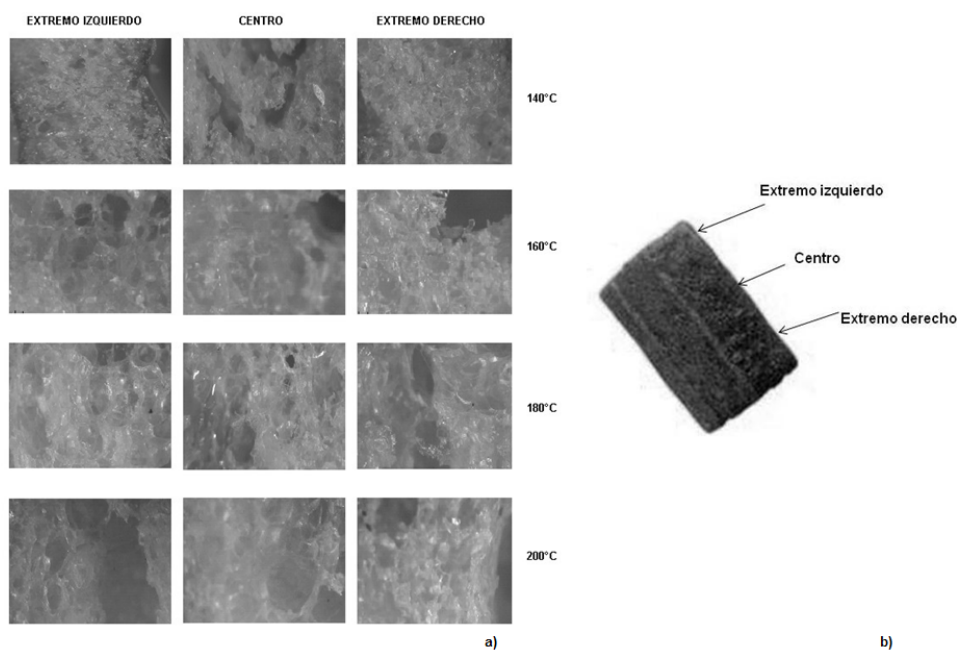


Figura 8. a) Galería de las micrografías obtenidas a diferentes condiciones de proceso y en las tres posiciones de corte de la fritura b) Esquema de las posiciones de corte realizadas en el producto frito para la obtención de micrografías.

Los resultados experimentales permiten establecer que la cantidad de aceite absorbido en el producto fue afectada por el contenido de humedad final de la muestra (Tabla 3), resultados congruentes con los reportados por otros autores [24, 31].

Las representaciones gráficas de la absorción de aceite en el producto en función del tiempo de freído se presentan en la Figura 2, en estas puede observarse que bajo las condiciones ensayadas la ganancia de aceite en el producto depende de la temperatura de freído, siendo mayor a temperatura de 200°C y menor a temperatura de 140°C. Se observa en la Figura 2, que los tiempos de freído son significativamente menores (50 segundos) al emplear altas temperaturas del aceite (200°C), en comparación el uso de bajas temperaturas (140°C-300 segundos), dado que la temperatura tiene un efecto importante en la expansión del producto, en la textura y en el desarrollo del color, atribuible a una combinación de reacciones de Maillard y formación de componentes volátiles del aceite [35].

3.2. Porcentaje de expansión del producto durante el freído

Durante el freído se presentó un fenómeno de expansión del alimento atribuible a la formación de vapor a partir de la humedad contenida en el producto, mismo que provoca un aumento de la presión de vapor de la humedad en el interior, lo que conlleva a su rápida expansión y a un incremento en sus dimensiones a lo largo de los ejes X-Y (Figura 3). El incremento en sus dimensiones fue cuantificado por el porcentaje de expansión E_x y E_y ,

mismos que se determinaron mediante las ecuaciones (1 y 2) previamente presentadas.

En la Figura 4 se presenta el porcentaje de expansión de la muestra (E_x y E_y) en función del tiempo de freído. De la Figura 4, se observa que la expansión en el eje Y (E_y), es significativamente ($P < 0.05$) mayor que la expansión a lo largo del eje X (E_x), dicho comportamiento se presenta en las muestras procesadas a las diferentes condiciones estudiadas.

A temperatura de 140°C el valor máximo de expansión en el eje X es de 8%, valor significativamente menor que el obtenido a temperatura de 160° (20%), 180° (61%) y 200°C (63%), verificándose la expansión máxima E_x del 63% a tiempos de freído de 30 s y temperatura de 200°C. En cuanto a la expansión de la muestra a lo largo del eje Y (E_y) se observa que a temperatura de 140°C el valor máximo de expansión en el eje Y es de 35%, valor significativamente menor que el obtenido a temperatura de 160° (69%), 180° (82%) y 200°C (128%), verificándose la expansión máxima E_y del 128% a tiempos de freído de 30 s y temperatura de 200°C.

3.3. Evaluación de los cambios morfométricos de la superficie del producto durante el freído

Durante el freído, se presentaron cambios morfométricos de la muestra, como resultado del proceso de expansión, los cuales consistieron en la formación de contornos irregulares, superficies cóncavas y convexas y cambios en la topografía de la superficie del producto durante el freído, tal como se aprecia en la galería de imágenes de la Figura 5.

Los cambios morfométricos en el producto y su superficie se deben a la salida del vapor de agua desde su interior que generan grietas, poros y ampollas de diferentes tamaños en la superficie del producto. Los cambios en la superficie del producto fueron cuantificados mediante la dimensión fractal normalizada de la textura superficial (DF_N). A partir de estos datos, se observa que los valores de DF_N aumentan en función del tiempo de freído de modo que la topografía de la muestra se torna más compleja y con ello se presenta un incremento de los valores de DF_N (Figura 5).

El uso de una baja temperatura de aceite de freído produjo una textura fractal de la muestra menos irregular obteniéndose valores de DF_N de 1.035 ± 0.004 , los cuales son significativamente menores ($P > 0.05$) que los obtenidos para los tratamientos a 160° , 180° y 200°C , (1.151 ± 0.004 , 1.142 ± 0.004 y 1.160 ± 0.002) respectivamente, resultados que concuerdan con la galería de imágenes de la muestra durante el freído en los diferentes tratamientos (Figura 6).

3.4. Cambios en la porosidad del producto durante el freído

Uno de los factores a los cuales se le atribuye la irregularidad de la superficie del producto frito es el incremento de la porosidad interna por lo que este parámetro se determinó a lo largo de la cinética de freído a los diferentes tratamientos. Las representaciones gráficas de la porosidad en función del tiempo de freído para las muestras bajo las condiciones estudiadas se presentan en la Figura 7 en estas puede observarse que bajo las condiciones ensayadas existe un incremento de la porosidad cuando se emplea en el freído una mayor temperatura del aceite (200°C), siendo evidente este comportamiento durante los primeros segundos del proceso. La porosidad registrada en las muestras al final del freído fue 80% para 200°C , 63% para 180°C , 25% para 160°C y 23% para 140°C . El análisis estadístico efectuado a través de la prueba t-Pareada, mostró que existe diferencia significativa entre las curvas de porosidad de las muestras sometidas a los tratamientos en estudio para un intervalo de confianza del 95%.

El incremento de la porosidad de la muestra registrado durante el freído permite una mayor impregnación de aceite en el producto, tal como se presenta en las muestras procesadas a 200°C . Dicho comportamiento es atribuible a mecanismos de capilaridad y de tensión superficial entre el aceite y la estructura de la muestra, dado que la impregnación de aceite en la matriz alimenticia se debe a efectos de capilaridad y succión interna [21].

3.5. Análisis de microestructura interna del producto freído

En la Figura 8, se presentan las micrografías del producto obtenidas al final del proceso de freído para cada temperatura de tratamiento obtenidas a partir de

Tabla 4. Datos de textura del producto a diferentes temperaturas del aceite utilizado en el freído.

Temperatura del aceite de freído ($^\circ\text{C}$)	Textura (N)
140	30.44 ± 0.06
160	23.56 ± 0.04
180	12.766 ± 0.01
200	8.73 ± 0.08

observaciones en un microscopio estereoscópico de tres cortes micrométricos del producto a lo largo del eje Y.

A partir de las micrografías de la Figura 8a, se observa que la mayor distribución de poros se encuentra en los extremos izquierdo y derecho del alimento, lo que propicia un torsión en el producto y una distribución anisotrópica de poros a lo largo del eje Y.

A una temperatura de freído de 140°C , se observa una distribución aleatoria de poros pequeños en el interior del producto frito, mientras que a temperaturas de 180° y 200°C se observan poros de mayor tamaño en las tres diferentes posiciones de corte.

3.6. Textura del producto durante el freído

La porosidad y distribución de tamaño de poros en la matriz sólida del alimento también influyen significativamente en las propiedades mecánicas y de textura del producto. En la Tabla 4, se presentan los valores del esfuerzo máximo de penetración del producto al final de la cinética de freído.

La temperatura del aceite empleado durante el freído influye de manera significativa en la textura del producto, dado que a temperatura de 140°C se observó un esfuerzo de penetración mayor que los reportados para los otros tratamientos, debido probablemente a la baja porosidad registrada en el producto para estas condiciones de freído. Relación inversa que también se presentó en los productos procesados a 200°C , en los cuales el bajo esfuerzo de penetración fue consecuencia de la alta porosidad de la matriz. En la Tabla 4 se observa que existió diferencia significativa en la textura del producto procesada a las diferentes temperaturas del aceite ($P < 0.05$).

De los resultados experimentales se concluye que el uso de alta temperatura en el aceite de freído (200°C) para procesar productos de harina permite obtener productos cuya textura es más frágil y crujiente, que conforme el contenido de humedad de la muestra disminuye, la porosidad y la dimensión fractal normalizada de la textura se incrementa, además de presentar una mayor incorporación de aceite en el alimento.

4. Conclusiones

Los resultados permiten comprobar que la temperatura del aceite empleada en el proceso de freído afecta a la deshidratación de la muestra, así como también a otras

propiedades inherentes al material tales como la porosidad y la capacidad de acumulación del aceite en la muestra.

Los fenómenos de expansión, formación de poros, irregularidad superficial y la textura, son factores determinantes en la absorción de aceite y reducción de agua y pueden ser considerados al momento de interpretar modelos descriptivos del proceso de freído y tomados en cuenta para el desarrollo de alimentos su las características finales.

Agradecimientos

El presente trabajo se efectuó en el laboratorio de Investigación en alimentos (106C/104) y se agradece el financiamiento otorgado por la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado a través del proyecto de investigación “Diseño, construcción y operación de un microsistema de freído-secado de alimentos vegetales”, con clave de registro 00216. 2008.

Referencias

- [1]. D. Vitrac, D. Dufour, G. Trystram, A. L. Raoult-Wack. *Journal of Food Engineering*. **53**, 161 (2002).
- [2]. F. Pedreschi, C. Cocio, P. Moyano, E. Troncoso. *Journal of Food Engineering*. **87**, 200 (2008).
- [3]. D. Sukumar, N. K. Rastogi, A. G. Gopala Krishna, B. R. Lokesh. *Science and Technology*. **42**, 1054 (2009).
- [4]. A. Alvis, C. Vélez, M. Mendoza, M. Villamiel, H. Villada. *Food Control*. **20**, 321 (2009).
- [5]. R. G. Moreira, J. Palau, X. Sin. *Food Technology*. **49**, 146 (1995a).
- [6]. R.G. Moreira, J. Palau, X. Sin. *Journal of Food Process Engineering*. **18**, 307 (1995b).
- [7]. M. Mellema. *Trends in Food Science and Technology*. **14**, 364 (2003).
- [8]. M. L. Kawas, R. Moreira. *Journal of Food Engineering*. **47**, 97 (2001).
- [9]. R. G. Moreira, J. Palau, X. Sun. *Journal of Food Engineering*. **31**, 485 (1997).
- [10]. F. Mendoza, P. Dejmek, J. M. Aguilera. *Food Research International*. **40**, 1146 (2007).
- [11]. J. M. Aguilera, D. W. Stanley, *Microstructural principles of food processing and engineering*, 2nd ed: (NY, USA, 1999).
- [12]. J. C. Russ, *Image analysis of food microstructure*, 1st ed:(Washington, D. C., USA, 2004).
- [13]. J. Chanona, L. Alamilla, R. Farrera, R. Quevedo, J. M. Aguilera, G. Gutiérrez. *Food Science and Technology International*. **9**, 207 (2003).
- [14]. L. Alamilla, J. Chanona, A. Jiménez y G. Gutiérrez. *Journal of Food Engineering*. **67**, 179 (2005).
- [15]. S. Panyawong y S. Devahastin. *Journal of Food Engineering*. **78**, 151 (2007).
- [16]. R. Quevedo, M. Jaramillo, O. Díaz, F. Pedreschi y J.M. Aguilera. *Journal of Food Engineering*. **95**, 285 (2009).
- [17]. S. Kerdpi boon, W. L. Kerr y S. Devahastin. *Food Research International*. **39**, 1110 (2006).
- [18]. C. Santacruz, V. Santacruz, J. Chanona, M. E. Jaramillo, J. Welti, G. Gutiérrez, in: *Encyclopedia of Agricultural, Food and Biological Engineering*, Ed. D. Heldman (NY, USA, 2007). p. 1-13.
- [19]. V. Santacruz, C. Santacruz, J. Welti, R. Farrera, L. Alamilla, J. Chanona, G. Gutiérrez. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. **7**, 55 (2008).
- [20]. N. A. Valous, F. Mendoza, D. Sun, P. Allen. *Food Research International*. **42**, 353 (2009).
- [21]. R. Quevedo, F. Mendoza, J. M. Aguilera, J. Chanona, G. Gutiérrez. *Journal of Food Engineering*. **84**, 509 (2008).
- [22]. J. M. Aguilera, L. Cadoche, C. López, G. Gutiérrez. *Food Research International*. **34**, 939 (2002).
- [23]. AOAC, *Official Methods of Analysis of AOAC International*, 16th ed:(Arlington, VA, USA, 1995).
- [24]. R. B. Suárez, L. A. Campañone, M. García, N. E. Zaritzky. *Journal of Food Engineering*. **84**, 383 (2008).
- [25]. N. Wang, J. C. Brennan. *Journal of Food Engineering*. **24**, 61 (1995).
- [26]. J. E. Lozano, E. Rostein, M. J. Urbicain. *Journal of Food Science*. **48**, 1497 (1983).
- [27]. R. Quevedo, C. López, J. M. Aguilera. *Journal of Food Engineering*. **53**, 361 (2002).
- [28]. J. M. Aguilera, L. Cadoche, C. López, G. Gutiérrez. *Food Research International*. **34**, 939 (2001).
- [29]. Per Henden <http://rsb.info.nih.gov/ii>
- [30]. S. Kerdpi boon, S. Devahastin. *Drying Technology*. **25**, 135 (2007).
- [31]. M. H. Gamble, P. Rice, J. D. Seldman. *Journal Food Science Technology*. **22**, 233 (1987).