Artículo Original / Original Article

Optimización del proceso de fritura por inmersión de la arepa con huevo utilizando metodología de superficie de respuesta

Optimization of the deep fat frying process of arepa con huevo using response surface methodology

RESUMEN

Los alimentos fritos son consumidos debido a sus características de palatabilidad y textura. Sin embargo, una limitante es el contenido de grasa que adquieren, lo cual es catalogado como un riesgo para la salud. Por lo tanto, se han desarrollado estrategias para controlar el proceso de fritura y obtener productos con bajos contenidos de grasa. La arepa con huevo (AH) es un alimento autóctono y consumido en Colombia. El objetivo de este estudio fue optimizar la fritura de AH, analizando la relación temperatura-tiempo sobre los atributos de calidad. Las muestras se formularon con masa de maíz y huevos de gallina, en forma de placa circular. La inmersión se realizó en aceite de palma®, utilizando un diseño central compuesto rotatable. La humedad disminuyó con el aumento de los factores. Las muestras fritas a temperaturas altas y tiempos cortos absorbieron el menor contenido de grasa. La luminosidad disminuyó con el aumento de la temperatura, mientras que la variación del color y la dureza aumentaron con el tiempo del proceso. La deseabilidad máxima fue de 0,84 obteniendo la mejor combinación de los factores a 180,8 °C y 364,8 s. La optimización de la fritura hace posible obtener AH con bajo contenido de grasa.

Palabras clave: Arepa con huevo; Fritura por inmersión; Absorción de aceite; Luminosidad; Dureza.

ABSTRACT

Fried foodstuffs are consumed by their characteristics of palatability and texture. However, one of the main disadvantages is the high oil content that these acquire, which is classified as a risk for health. Hence, strategies have been developed in order to control frying process and obtain products with a lower fat content. The arepa con huevo (AH) is an autochthonous and consumed foodstuff in Colombia. The objective of this study was to optimize the frying of AH, analyzing the temperature-time relationship on quality attributes. The samples were made in the form of a circular plate and were formulated with maize dough, and hen's eggs. The process was performed in refined palm oil® and a rotating composite

José Torres^{1,2}, Armando Alvis², Luis Gallo¹, Diofanor Acevedo¹,
Piedad Montero¹, Francisco Castellanos³.

1. Grupo de Investigación Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena. Cartagena (Colombia).
2. Grupo de Investigación Procesos y Agroindustria de Vegetales. Facultad de Ingeniería. Universidad de Córdoba. Montería (Colombia).
3. Grupo de Investigación Alimentos y Agroindustria. Facultad de Ingeniería. Universidad de Caldas. Manizales (Colombia).

Dirigir correspondencia a: José Torres.
Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena,
Avenida Consulado, Calle 30 No. 48-152. 130015.
Cartagena, Bolívar (Colombia).
Teléfono: +56 9 62792452.
E-mail: jtorresg3@unicartagena.edu.co

Este trabajo fue recibido el 14 de julio de 2017.
Aceptado con modificaciones: 14 de septiembre de 2017.
Aceptado para ser publicado: 25 de octubre de 2017.

central design was applied. Moisture decreased when increasing factors. The samples fried at high temperatures and short times had lowest oil uptake. The luminosity decreased with increasing temperature, whereas the color variation and the hardness increased with the time of the process. The desirability was 0.84 point where the best combination of factors was at 180.8 °C and 364.7 s. The optimization of the deep fat frying makes it possible to obtain AH with a low oil content.

Keywords: Arepa con huevo; Deep fat frying; Oil uptake; Lightness; Hardness.

INTRODUCCIÓN

La fritura por inmersión es uno de los procesos más antiguos y comunes en la preparación de alimentos, conocido por décadas como una técnica culinaria que usan los cocineros en restaurantes y las personas en los hogares, además es una operación unitaria en el sector industrial que se utiliza para elaborar productos de consumo masivo, como papas fritas, aperitivos de vegetales, palitos de pescado, pollo frito y formulaciones con mezclas de almidones nativos o modificados, gluten y harina de cereales u oleaginosas utilizadas como recubrimientos¹⁻⁴.

Se ha descrito que los alimentos fritos adquieren características organolépticas y sensoriales únicas que no es posible conseguir con otras técnicas de procesado, debido a las temperaturas altas y a las cualidades que aporta la grasa⁵⁻⁸. Sin embargo, en la actualidad las relaciones entre las grasas saturadas con la obesidad y las enfermedades coronarias, se han convertido en una fuerza impulsora para reducir el consumo de alimentos procesados, entre ellos las frituras¹. La industria utiliza productos bajos en grasa, pero muchos de estos no son aceptados por los consumidores, ya que el sabor y la crocancia son diferentes a los tradicionales⁹. A pesar de esto, esa industria genera en el mercado mundial millones de dólares cada año con las ventas de productos fritos para ciertos grupos poblacionales, en especial los juveniles¹⁰.

La finalidad de la fritura es combinar tiempos de cocción reducidos y temperaturas altas para producir en los alimentos atributos únicos de color, sabor y textura¹¹. La temperatura y el tiempo suelen ser los factores más importantes en el proceso. En las formulaciones amiláceas, se ha señalado que a temperaturas elevadas y tiempos cortos, la absorción de grasa se reduce, ya que la formación de la corteza se acelera y actúa como una barrera física. Además, esto podría ocasionar que la temperatura interna no sea la suficiente para gelatinizar el almidón de la microestructura y por tanto, se obtendrían productos con una corteza externa crocante y un centro crudo con almidón no gelatinizado^{1,12-14}. Por otra parte, un tiempo prolongado ocasionaría una absorción de grasa elevada, mayor deterioro de la microestructura y quemaduras superficiales; por ello, se ha investigado en la optimización de las condiciones de proceso específicas para cada matriz alimentaria, a fin de obtener productos fritos con la mejor calidad⁶.

La metodología de superficie de respuesta (MSR), es un conjunto de técnicas estadísticas usadas para encontrar las condiciones óptimas de procesamiento de los productos, sin aumentar los costos de los experimentos y para mejorar los sistemas en los que una o varias respuestas de interés están influenciadas por diversas variables independientes¹¹. Ésta se ha aplicado con éxito para optimizar la fritura de alimentos tales como galletas de arroz¹⁵, kokoro el cual es un bocadillo de maíz y harina de semilla de frijol típico de Nigeria¹⁶, aperitivos a base de gluten-harina de yuca¹⁷, en formulaciones a base de trigo combinado con polvo de pan duro^{14,18} y en postre de Tulumba consumido en Turquía¹⁹.

Estos investigadores coinciden en afirmar que la MSR es una de las mejores herramientas para la optimización del proceso de fritura.

La arepa con huevo (AH) es uno de los alimentos fritos típicos más reconocidos e importantes en Colombia, se elabora con masas de maíz amarillo (hidratada) y huevos de gallina. Este producto forma parte de la cultura gastronómica ancestral de la Región Caribe Colombiana, debido a su elevado consumo en los sectores poblacionales intermedios y vulnerables⁷. El procesamiento actual de la AH es mediante fritura atmosférica, el cual no está tecnificado y se requiere controlar la calidad físico-química del producto. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue optimizar las condiciones de temperatura y tiempo del proceso de fritura por inmersión de la AH utilizando metodología de superficie de respuesta, para obtener un producto final con un bajo contenido de grasa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Las AH se elaboraron con masa precocida de maíz (variedad cariaco amarillo, ZmCol-CIM-3132), con un contenido de humedad de $59,5 \pm 4,4\%$, ésta fue comprada a una empresa local en Cartagena (Colombia). Los huevos de gallinas criollas, el cloruro de sodio y el aceite de palma comercial®, adquiridos en un supermercado local. Este último se utilizó debido a su alta resistencia térmica a la oxidación durante el calentamiento, su bajo costo y utilización en los restaurantes que elaboran el producto.

Formulación del producto

Las masas se almacenaron a 12 °C, en un refrigerador doméstico (marca Frigobar Igloo 1.7ft FR-180, Daewoo Electronics USA). Se utilizaron las técnicas tradicionales observadas de los vendedores del producto en el municipio de Luruaco (Atlántico-Colombia) y se modificó con una sola etapa de fritura, como se realiza en los restaurantes y hoteles de la ciudad de Cartagena de Indias. La formulación se estandarizó mediante ensayos de laboratorio, teniendo en cuenta las recomendaciones de un cocinero experto en alimentos fritos. El producto se formuló con 80,4% de masa maíz, 18,1% de huevo y 1,5% de cloruro de sodio. La masa se homogenizó por 10 min en una amasadora profesional (modelo 5K5SS, KitchenAid Inc., USA) con un batidor plano K5AB a 40 rpm. El producto se moldeó con su geometría tradicional ($10 \pm 0,5$ cm de diámetro y $2,5 \pm 0,1$ cm de espesor), utilizando un molde circular (modelo Practi Pay Tupperware® USA), el cual poseía un área cóncava donde se colocó la masa preparada y se adicionó el huevo entero crudo sin cáscara.

Fritura por inmersión

Se utilizó una freidora eléctrica en acero inoxidable de 7 L de capacidad, la cual poseía tres termopares (tipo J de acero inoxidable AISI 304L) con 0,25 mm de diámetro cada uno, para el control de la temperatura del aceite, centro

y la superficie del producto ($\pm 0,05$ °C). Ésta se acopló a un computador portátil (modelo Aspire E11, Intel® Core™ i5, Acer Inc., Taiwán), un sistema de adquisición de datos (INTECH Micro 2100-A16 Rev. 1.3, Nueva Zelanda) y un controlador PID (RKC HA 900 Instrumentos inc., USA). Antes de la fritura, una placa circular de maíz se colocó en el molde a 25 °C y se le agregó un huevo entero crudo, de inmediato otra placa circular se utilizó para sellar el producto y dejar el huevo en medio de las capas de maíz. La freidora se llenó y el aceite se calentó a 170 °C por 1 h antes del proceso. La fritura se realizó a temperaturas de 165 y 195 °C, con ciclos de tiempos entre 275 y 445 s. Las AH se sumergieron con un cestillo metálico cubierto por una rejilla de acero inoxidable para garantizar la inmersión total. La relación producto/aceite fue 1:4 peso/volumen (250 g L⁻¹) y el aceite se renovó cada 3 h de uso continuo. Después de cada tiempo de fritura, las AH se retiraron de la freidora colocándose en una canasta circular de malla metálica, donde se dejaron escurrir por gravedad durante 1 min a 25 °C y se depositaron en los desecadores por 9 minutos hasta los análisis finales. Todos los ensayos de fritura se realizaron por triplicado.

Diseño experimental

En la fritura de las AH, se aplicó un diseño central compuesto rotatable, conformado por cuatro puntos factoriales (-1 +1, +1 +1, +1 -1, -1 -1), cuatro puntos axiales ($-\alpha$ 0, 0 α , α 0, 0 $-\alpha$) y cinco puntos centrales, para un total de 13 corridas experimentales, con el fin de examinar el comportamiento no lineal de las variables dependientes en el dominio experimental y obtener las superficies de respuestas. Se utilizó la ecuación 1.

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (1)$$

dónde N es número total de ensayos, 2k son los puntos axiales, n_0 son puntos centrales y k es el número de factores (en este estudio $k = 2$). Los niveles bajos y altos de los factores temperatura (X_1), tiempo (X_2) y la selección de las variables respuestas más influyentes, se escogieron teniendo en cuenta ensayos de fritura preliminares (fase

de cribado), con un experimento factorial completo 2x2 y por referencias bibliográficas en productos similares fritos por inmersión^{16,18,19,21,31}. Los puntos axiales superiores e inferiores, se eligieron con base al valor $\alpha = (4)^{1/4} = \pm 1,4241$ que definió la rotabilidad del diseño; todos los niveles se codificaron (Tabla 1). Las variables respuestas fueron: contenido de humedad, absorción de grasa, cambios de color (L^* , a^* , b^* , ΔE) y fuerza máxima de ruptura (N). Los datos experimentales de las respuestas se ajustaron a modelos de regresión múltiple, esquematizados en la ecuación 2, utilizando el método de mínimos cuadrados. La significación estadística de los términos se examinó mediante ANDEVA al 5% para cada respuesta:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \Sigma \quad (2)$$

dónde Y son las respuestas, β_0 es el intercepto, X_1 es la temperatura (°C), X_2 es el tiempo (s); β_1 , y β_2 los coeficientes para el efecto lineal. β_{11} , β_{22} los coeficientes para el efecto cuadrático, β_{12} el coeficiente para el efecto de la interacción de los factores y Σ el error aleatorio.

Proceso de optimización

La optimización de los parámetros se realizó mediante métodos gráficos de acuerdo a lo obtenido con los modelos de regresión y utilizando la deseabilidad máxima del sistema de múltiples respuestas. Ésta es una función cuyo rango de valores varía en el intervalo [0 - 1] y resulta de promediar las medias geométricas de las deseabilidades individuales de cada variable respuesta. Como se expresa en la ecuación 3.

$$D_n = (d_1, d_2, \dots, d_n)^{1/n} \quad (3)$$

dónde $d_1, d_2, \dots, d_n$ son las respuestas y n es el número total de respuestas en la medición. El valor más alto de D_n indica la mejor combinación del sistema. Para las variables contenido de humedad, absorción de grasa, cambios de color (ΔE), fuerza máxima de ruptura (N) se buscó la minimización, mientras que para L^* y los valores cromáticos a^* y b^* se examinaron los valores máximos. En los modelos de regresión se eliminaron los términos no significativos,

Tabla 1

Matriz de diseño central compuesto rotatable (DCC-R) con puntos axiales y puntos centrales codificados.

Variables	Símbolo codificador	Niveles				
		$\alpha_1 = -1,4241$ (axial)	-1 (bajo)	0 (central)	+1 (alto)	$\alpha_2 = +1,4241$ (axial)
Temperatura (°C)	X_1	165,9	170	180	190	195,2
Tiempo (s)	X_2	275,2	300	360	420	445,9

utilizando el diagrama de pareto estandarizado y se llegó a la ecuación final de cada respuesta considerando un coeficiente de determinación R^2 ajustado entre 0,80 a 0,95; una prueba de falta de ajuste con un valor-p mayor que 0,05% y un coeficiente de variación (CV) menor al 10%.

Determinación del contenido de humedad y grasa al producto

Los análisis se realizaron a las AH después del proceso de fritura. Las muestras se homogeneizaron, utilizando una trituradora de alimentos (Oster® OHB 126X 800 W12, Wisconsin, EE.UU.). La humedad (g agua g⁻¹ sólidos secos), se calculó por secado en horno convector LT04/5 a 105 °C hasta peso constante (método 925.10) AOAC (20). Posteriormente a las muestras secas, se les determinó el contenido de grasa (g grasa g⁻¹ sólidos secos), por gravimetría utilizando el equipo extractor Soxhlet, con éter de petróleo (fracción 40-60 °C), ya que este es el mejor agente de extracción directa de la grasa a partir de materiales secos (método 920.39) AOAC²⁰. Todos los resultados se expresaron sobre la base del peso seco libre de grasa.

Evaluación de color

Los cambios de color se analizaron en la parte externa de las AH, utilizando un colorímetro de reflectancia de laboratorio CR-5 (modelo Konica Minolta Sensing Americas, Inc. USA), con iluminante D65 y un ángulo de tono 10° para el observador. Los parámetros se evaluaron en el espacio CIEL*a*b, en cuanto a la luminosidad L* (claro 100° y oscuro 0°), cromaticidad a* (rojo - verde) y b* (amarillo - azul). Así mismo, se calculó el cambio general del color (ΔE) respecto al producto antes de la fritura, utilizando la distancia euclidiana como se muestra en la ecuación 4.

$$\Delta E = \sqrt{((L^*-L)^2 + (a^*-a)^2 + (b^*-b)^2)} \quad (4)$$

dónde L* a* b* son los valores de cada tratamiento y L, a, b corresponden al producto antes de la fritura.

Fuerza máxima de ruptura (N)

Los ensayos se realizaron a las AH enteras recién fritas (con un tiempo de 10 ± 3 min), se utilizó un analizador de textura (modelo TA.TX2i®.plus, Stable Micro System Co. Ltd., UK) acoplado al software Texture Expert Exceed versión 2.64, y equipado con una celda de carga de 50 N, dos soportes metálicos de acero inoxidable separados a una distancia de 40 mm (donde se colocó la muestra) y una sonda cilíndrica estándar del mismo material de 4 mm de diámetro (P/4) moviéndose a una velocidad 10 mm s⁻¹. La fuerza máxima necesaria para atravesar la costra del producto se expresó en Newton (kg m.s⁻²) y se escogió como indicador de la dureza.

Análisis estadístico

Las mediciones de contenido de humedad, absorción de aceite, y análisis de color se realizaron por triplicado en cada tratamiento. Mientras que los ensayos de fuerza máxima de ruptura se efectuaron seis veces para cada tratamiento alrededor de la parte central. Todos los datos se expresaron como el promedio con su desviación estándar. El análisis estadístico se realizó con el programa Statgraphics Centurión (versión 16.2.04, StatPoint Technologies Inc., USA) mediante ANDEVA de dos vías, porque fueron dos factores (Temperatura y Tiempo) y con el test de comparaciones múltiples HSD Tukey al 5%.

RESULTADOS

Efecto de la fritura en el contenido de humedad y grasa

La humedad de las AH mostró una relación inversa y significativa, respecto al aumento de la temperatura y el tiempo del proceso ($p < 0,05$), variando de $62,7 \pm 1,4$ a 170°C y 300 s, hasta $29,8 \pm 1,1$ cuando la fritura se realizó a 190°C y 420 s (Figura 1). Al comparar los datos a una temperatura fija (180°C) se observó que la humedad fue $55,7 \pm 1,2$; $46,5 \pm 1,9$ y $40,52 \pm 1,9$ (g agua g⁻¹ sólidos secos) a los tiempos de 300, 360 y 420 s, respectivamente. Mientras que al contrastar la humedad a un mismo tiempo

Figura 1. Efecto de las condiciones de tiempo y temperatura de fritura en el contenido de humedad (▲) y absorción de grasa (●) de las arepas con huevo.

de fritura (360 s), se observó que varió de $55,3 \pm 1,7$ a 170°C , hasta $35,68 \pm 1,35$ a 190°C . Estos resultados indican que la humedad de las AH se reduce significativamente con el incremento del tiempo y la temperatura de fritura, siendo este último factor el más influyente. Resultados similares han sido reportados para matrices alimentarias amiláceas fritas por inmersión y demuestra que este tratamiento térmico actúa como un proceso común de secado^{8,17,19,21,22}.

El contenido de grasa de las AH también fue afectado significativamente por las condiciones de fritura utilizadas. Se encontró que para una misma temperatura, la grasa aumentó al incrementarse el tiempo, y para 170°C pasó de $32,0 \pm 1,5$ a $45,7 \pm 1,8$ (g grasa g⁻¹ sólidos secos) cuando el proceso se realizó a 300 y 420 s, respectivamente. En las AH, se encontró que para un mismo tiempo de fritura, el contenido de grasa fue menor con el incremento de la temperatura. En la fritura a 360 s, el contenido de grasa fue de $36,9 \pm 1,9$ a 170°C ; $35,8 \pm 1,6$ a 180°C y $29,9 \pm 1,3$ a 190°C .

Efecto de la fritura en el color

La cromaticidad a^* aumentó de $3,1 \pm 0,1$ en el producto crudo (a 25°C) hasta $28,9 \pm 1,5$ en las muestras fritas a $195,2^\circ\text{C}$ (Tabla 2). Esto indica que el producto se tornó más rojo en su parte superficial, debido quizás a las reacciones propias de los pigmentos de la masa de maíz, y posiblemente a la adherencia superficial de la grasa más deteriorada a temperaturas altas. Los valores b^* mostraron un comportamiento diferente, se observó que éste fue aumentando proporcional a las condiciones de fritura, pasando de $15,1 \pm 0,1$ a 25°C hasta un máximo de $49,5 \pm 1,4$ a 180°C y 360 s. Sin embargo, se observó un descenso de esta variable cuando la temperatura fue $195,2^\circ\text{C}$, llegando a un valor de $33,9 \pm 1,8$. Esto indica que respecto a la masa cruda, se producen diversas reacciones en el producto que ocasionan una tonalidad amarilla, y que al sobrepasar el umbral de 180°C dicho parámetro tiende a disminuir, lo que puede ser debido al incremento de las reacciones de caramelización de los azúcares reductores

Tabla 2.

Cambios de color de las arepas con huevo en función del tiempo y la temperatura.
†Producto inicial. †† Mediciones al tratamiento óptimo.

25 °C-0 s† $a^* = 3,1 \pm 0,1$ $b^* = 15,1 \pm 1,3$ $L^* = 75,0 \pm 3,4$ $\Delta E = 0$	170 °C-420 s $a^* = 15,1 \pm 1,1$ $b^* = 42,7 \pm 1,9$ $L^* = 41,3 \pm 1,4$ $\Delta E = 37,1 \pm 2,4$	180 °C-360 s $a^* = 18,4 \pm 1,9$ $b^* = 41,4 \pm 1,7$ $L^* = 51,2 \pm 1,3$ $\Delta E = 29,8 \pm 1,9$	180 °C-360 s $a^* = 18,1 \pm 1,1$ $b^* = 41,3 \pm 1,4$ $L^* = 51,1 \pm 1,9$ $\Delta E = 28,1 \pm 1,2$	190 °C-300 s $a^* = 26,6 \pm 1,1$ $b^* = 43,8 \pm 1,4$ $L^* = 42,8 \pm 2,8$ $\Delta E = 40,2 \pm 2,1$

165,9 °C-360 s $a^* = 4,5 \pm 0,9$ $b^* = 22,1 \pm 1,6$ $L^* = 65,6 \pm 2,8$ $\Delta E = 26,4 \pm 2,6$	180 °C-275,2 s $a^* = 12,7 \pm 1,8$ $b^* = 40,9 \pm 1,4$ $L^* = 62,5 \pm 2,9$ $\Delta E = 30,1 \pm 2,1$	180,8 °C-364,7 s†† $a^* = 18,7 \pm 0,3$ $b^* = 44,6 \pm 2,9$ $L^* = 50,6 \pm 1,7$ $\Delta E = 30,1 \pm 0,9$	180 °C-360 s $a^* = 18,2 \pm 1,8$ $b^* = 42,7 \pm 1,9$ $L^* = 51,7 \pm 1,7$ $\Delta E = 29,7 \pm 1,1$	195,2 °C-360 s $a^* = 28,9 \pm 1,5$ $b^* = 33,9 \pm 1,8$ $L^* = 32,3 \pm 1,9$ $\Delta E = 52,4 \pm 2,2$

170 °C-300 s $a^* = 7,5 \pm 0,5$ $b^* = 25,1 \pm 1,5$ $L^* = 61,8 \pm 1,9$ $\Delta E = 30,2 \pm 2,3$	180 °C-360 s $a^* = 16,4 \pm 1,6$ $b^* = 42,3 \pm 1,5$ $L^* = 55,4 \pm 1,4$ $\Delta E = 28,9 \pm 1,2$	180 °C-360 s $a^* = 18,6 \pm 1,8$ $b^* = 49,5 \pm 1,4$ $L^* = 51,4 \pm 1,3$ $\Delta E = 28,2 \pm 1,5$	180 °C-445,9 s $a^* = 25,5 \pm 1,8$ $b^* = 43,5 \pm 1,9$ $L^* = 41,2 \pm 2,7$ $\Delta E = 45,6 \pm 2,9$	190 °C-420 s $a^* = 27,5 \pm 1,1$ $b^* = 35,3 \pm 1,8$ $L^* = 34,8 \pm 2,6$ $\Delta E = 51,3 \pm 2,8$

en la superficie de las AH y tal vez a un ligero deterioro de la grasa de fritura adherida en la parte externa, lo cual influiría el color final del producto.

Se observó que L^* disminuyó con el incremento de las temperaturas y los tiempos de fritura, pasando de $75,0 \pm 3,4$ en el producto a 25°C , hasta $32,3 \pm 1,9$ a $195,2^\circ\text{C}$. Mientras que para el tratamiento óptimo este valor se ubicó en $50,6 \pm 1,7$. Las mayores variaciones de ΔE , se observaron en los tratamientos de $195,2^\circ\text{C}$ a 360 s y 190°C a 420 s, donde este parámetro fue de $52,4 \pm 2,2$ y $51,3 \pm 2,8$, respectivamente.

Efecto de la fritura en la fuerza de ruptura

Se observó que el aumento de los factores (temperatura y tiempo) provocó un incremento en los valores de la fuerza máxima de ruptura ($p < 0,05$), variando de $0,8 \pm 0,1$ a $165,9^\circ\text{C}$, hasta $4,1 \pm 0,2$ N a $195,2^\circ\text{C}$ para un mismo tiempo de fritura de 360 s. Al comparar a una temperatura fija (180°C), esta variable respuesta aumentó desde $0,9 \pm 0,19$ N a $2,7 \pm 0,3$ N entre los $275,2$ s y $445,9$ s, respectivamente. Estos resultados confirman que tanto la temperatura como el tiempo de fritura son factores influyentes en el aumento de la dureza superficial de las AH.

Proceso de optimización

Los efectos estimados indicaron que las interacciones cuadráticas de los factores temperatura–tiempo (X_1 y X_2) y temperatura–temperatura (X_1 y X_1) fueron significativos en la respuesta contenido de humedad ($p < 0,05$). El propósito de optimizar la humedad en las AH fue obtener un valor mínimo, siendo en este caso 28% a $185,9^\circ\text{C}$ y $415,1$ s. El

contenido de grasa fue afectado por la interacción lineal y cuadrática del factor temperatura (X_1 , X_2), ($p < 0,05$). Así mismo, se observó un efecto significativo del tiempo cuadrático (X_2^2), siendo esto indicador que un aumento excesivo del tiempo de proceso repercutirá en una absorción de grasa elevada. En esta investigación se buscó minimizar el contenido de grasa de las AH, siendo el valor óptimo de $29,3\%$ a $186,9^\circ\text{C}$ y $400,3$ s. Los coeficientes de los modelos de regresión de segundo orden que describen el contenido de humedad y absorción de grasa de las AH se muestran en la tabla 3.

Los cambios de L^* , a^* , b^* y ΔE fueron influenciados por la temperatura (X_1), tanto en sus efectos lineales como cuadráticos, lo cual refleja que las AH cambian su color durante el procesado térmico. Por ello, es necesario tener un control exacto de las condiciones de temperatura utilizadas, para evitar variaciones indeseables que afecten estos atributos de color del producto. En la maximización se obtuvo un L^* de $59,4$ a $165,9^\circ\text{C}$ y $302,4$ s, mientras que para a^* las condiciones máximas estuvieron en $182,35^\circ\text{C}$ y $445,9$ s con un valor de $23,1$ y para la cromaticidad b^* el punto máximo fue $51,3$ a $186,1^\circ\text{C}$ y $445,9$ s. Para ΔE se encontró un valor mínimo de $26,6$ a $177,8^\circ\text{C}$ y $355,4$ s. Los coeficientes de los modelos de regresión que describen los cambios de color en las AH se muestran en el tabla 3.

La fuerza de ruptura fue influenciada por la interacción lineal y cuadrática del factor temperatura (X_2), indicando que las AH requirieron más energía para romperse cuando se deshidrataron en mayor proporción, es decir, a temperaturas de fritura altas aumentó la dureza del producto. La significancia

Tabla 3
Coeficientes de los modelos de regresión ajustados a las variables respuestas de las arepas con huevo fritas por inmersión

	(g g-1 sólidos secos)		Cambios de color				Fuerza de ruptura (N)
	Humedad	Aceite	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	ΔE	
β_0	2647,5	3858,4	-646,8	1376,9	1299,9	4080,2	21112,8
β_1	-24,4	-40,3	-8,9	0,6	-0,7	40,5	227,8
β_2	-1,8	-0,5	-0,2	-13,9	-1,8	2,7	-6,4
β_{12}	$3,1 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$12,5 \times 10^{-3}$	$5,9 \times 10^{-3}$	0,2
β_{11}	$6,2 \times 10^{-2}$	0,12	$3,2 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-4}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$9,9 \times 10^{-3}$
β_{22}	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$-1,2 \times 10^{-3}$	NS	$2,7 \times 10^{-3}$	$-2,4 \times 10^{-3}$	NS
R ²	0,91	0,99	0,87	0,92	0,94	0,85	0,91
Valor-p	0,001 [†]	0,003 [†]	0,002 [†]	0,004 [†]	0,002 [†]	0,003 [†]	0,004 [†]
P.F.A	0,087 ^{††}	0,156 ^{††}	0,459 ^{††}	0,346 ^{††}	0,264 ^{††}	0,113 ^{††}	0,299 ^{††}
CV (%)	5,54 [§]	4,88 [§]	6,79 [§]	1,98 [§]	8,04 [§]	1,71 [§]	3,14 [§]

[†]Valor-p, significativo al 1%. ^{††}Valor-p, no significativo al 5%. [§]Coeficiente de variación (CV) menor al 10%. NS = no significativo. P.F.A= prueba de falta de ajuste.

de los coeficientes del ANDEVA, mostró que los cambios de esta variable respuesta se pueden describir satisfactoriamente mediante la ecuación encontrada (tabla 3). En la minimización se obtuvo un óptimo individual de 1,45 N a 175,2 °C y 320,2 s. En esta investigación se encontró que la prueba de falta de ajuste en todos los casos, mostró una significancia mayor al 5% y los coeficientes de determinación ajustados (R^2) estuvieron por encima de 0,80; además los CV fueron menores al 10 %, lo cual indica que los modelos obtenidos describen en forma eficaz los datos experimentales.

Gráficas de superficies de respuestas

Teniendo en cuenta la función deseabilidad máxima del sistema de múltiples respuestas, se encontró un valor óptimo global de 0,84 punto donde la mejor combinación de los niveles de los factores fue de 180,8 °C y 364,7 s. Obteniendo las variables respuestas minimizadas: contenido de humedad (33,9 %), absorción de grasa (29,5 %), cambios de color ΔE (30,1) y fuerza máxima de ruptura (1,78 N); mientras que las variables maximizadas a^* , b^* y L^* fueron 18,7; 44,6 y 50,6, respectivamente, lo cual se muestra en la figura 2.

Figura 2. Superficie de respuesta de la optimización de la fritura de las arepas con huevo: a) humedad; b) aceite; c) luminosidad (L^*); d) cromaticidad a^* ; e) cromaticidad b^* ; f) cambio de color ΔE ; g) fuerza de ruptura y h) deseabilidad máxima.

DISCUSIÓN

Dentro de los factores estudiados, el más influyente en la absorción de grasa de las AH fue el tiempo de fritura. Quizás porque un tiempo mayor a una temperatura fija, facilitaría la acumulación de grasa en la parte externa, la cual ingresaría en mayor proporción durante el enfriamiento^{1,9,14}.

Coker et al.²³, durante la optimización de la fritura de galletas de yuca enriquecida con harina de pescado, indicaron que el contenido de grasa aumentó y la humedad disminuyó con el aumento del tiempo, encontrándose diferencias estadísticas al inicio y final del proceso ($p < 0,05$). La influencia del tiempo en el incremento de la absorción de grasa de matrices amiláceas fritas por inmersión, fue discutido por Moreira et al.⁵, Gamble et al.²⁴ y Bouchon et al.²⁵ en chips de papas. Estos autores señalaron que una pequeña cantidad de grasa ingresa al alimento durante la inmersión, debido a que el vapor de agua ejerce una presión opuesta. Además señalaron que en la inmersión la absorción de grasa y la pérdida de humedad no son fenómenos sincrónicos e indicaron que durante el enfriamiento la grasa de la superficie es succionada al interior de la corteza porosa (al disminuir la presión en los poros por el escape del vapor de agua). En la fritura de tortillas elaboradas con harina de maíz, Moreira et al.²⁶, demostraron que la distribución del tamaño del poro desarrollado fue el principal factor que influyó en la absorción de aceite.

Así mismo, Zhang et al.⁴, estudiaron la porosidad en el proceso de fritura de papas y reportaron que el contenido inicial de humedad no tuvo ningún efecto significativo en la absorción de aceite final. Gazmuri y Bouchon²¹ mostraron que la absorción de grasa no estuvo relacionada directamente con la cantidad de humedad perdida, sino más bien con los cambios en la microestructura del producto formulado a base de gluten (12%) y almidón de trigo (88%). En la estructura de las AH, quizás hubo un desarrollo de la porosidad a medida que aumentaron los niveles de los factores, lo cual posiblemente influiría en la formación de la corteza superficial y en la absorción de aceite. Para corroborar esto se requieren estudios más detallados en la superficie de esta matriz alimentaria con técnicas más avanzadas como la microscopia confocal de barrido láser (CLSM) y microscopía electrónica de barrido (SEM), combinadas con programas computacionales para el análisis de imágenes en tiempo real. Esto posibilitará un entendimiento más amplio de los cambios en la microestructura y la absorción de aceite de este producto durante el tratamiento térmico de fritura.

El comportamiento de los parámetros L^* y ΔE , se escoge como indicador de las reacciones de pardeamiento no enzimático en los productos fritos, dichas reacciones ocurren por las interacciones entre los aminoácidos libres como la lisina o asparagina y los azúcares reductores como la glucosa o fructosa, a temperaturas por encima de los 120 °C^{27,28} en adición, se ha señalado que estas reacciones son también responsables de la formación de componentes tóxicos como la acrilamida, la cual se correlaciona con las quemaduras superficiales de los productos fritos²⁹. Esto

explica alguna de las tendencias observadas en las AH al aumentar los niveles de temperatura. Por ello, la necesidad de optimizar la fritura y obtener AH con el máximo valor L^* y el mínimo ΔE , para de esta manera garantizar un producto seguro y de calidad. Los resultados del cambio de color en las AH, fueron similares a los reportados por Esan et al.⁸, en batatas amarillas, ya que las reacciones de coloración se aceleraron en la microestructura del producto con una baja actividad de agua durante la fritura. Karacabey et al.³⁰, reportaron que durante la fritura de rebanadas de zanahoria, la luminosidad se redujo con la interacción de los factores tiempo y temperatura, lo cual fue atribuido a las reacciones de pardeamiento no enzimático, la caramelización y la oxidación química de los pigmentos. Para Dueik et al.²⁷, el color oscuro en chips de zanahorias también se asoció a las reacciones pardeamiento no enzimático. Así mismo, Dueik et al.¹², en matrices elaboradas con gluten, almidón de trigo, almidón de maíz pre-gelatinizado y fibra insoluble, atribuyeron los cambios de color a las reacciones de pardeamiento no enzimático superficiales, que fueron catalizadas por la baja actividad de agua a temperaturas elevadas. Por su parte, Shyu et al.²⁸, observaron que el color de chips de zanahoria disminuyó cuando aumentó el tiempo y la temperatura de fritura, indicando que a partir de 100 °C los cambios se hicieron evidentes, hecho atribuible a la inestabilidad de los carotenoides.

Se ha señalado que la evaporación del agua durante la fritura, ocasiona una reducción del volumen de los alimentos y una estructura porosa caracterizada por huecos, hendiduras y grietas en la corteza, lo que influye en la dureza superficial^{5,10,12,14}. Así mismo, los cambios tales como la gelatinización de los almidones y la desnaturalización de las proteínas, producidos en la costra pueden influir en la dureza final^{16,21,22,25,27}. Estudios realizados por Morales-Pérez y Vélez-Ruiz³¹ reportaron que durante la fritura de tortillas de maíz, la fuerza máxima de ruptura osciló entre 5,8 y 7,2 N con temperaturas entre 140 y 180 °C, lo cual fue similar a lo reportado por Moreira et al.²⁶, quienes hallaron fuerzas de ruptura de 6,0 N también en tortillas de maíz, siendo estos valores más altos que los encontrados para las AH, lo cual podría ser atribuido a las diferencias en la humedad y composición químicas de las matrices alimentarias.

Los resultados de optimización de la fritura de las AH, coinciden con los reportados por Omidiran et al.²², en matrices formuladas con harina de yuca-trigo, para quienes la deseabilidad máxima fue 0,77 con una temperatura de 140 °C y un tiempo de 4 min. Así mismo, Akinpelu et al.¹³, basados en la deseabilidad global encontraron condiciones óptimas de fritura a 133 °C y 6 min para chips de plátanos. Para estos investigadores los modelos cuadráticos obtenidos mostraron coeficiente de determinación (R^2) entre 0,53 y 0,99. Por otra parte, Maneerote et al.¹⁵, en galletas de arroz hallaron condiciones óptimas (minimizando el contenido de aceite) a 220 °C durante 60 s. Mientras que Esan et al.⁸, reportaron condiciones óptimas a una temperatura de 108 °C y 9 min, donde la deseabilidad máxima fue 0,61. Así mismo,

para Abtahi et al.¹¹, las condiciones óptimas minimizando la absorción de grasa en trozos de calabacín revestidas con biopolímeros, fueron a 153,46 °C y 1,03 min. Todos estos investigadores coincidieron en señalar que la optimización de las condiciones de fritura por inmersión posibilita que los productos conserven sus atributos de calidad final.

CONCLUSIONES

Se encontró una relación inversa entre el contenido de humedad y la temperatura de fritura. Las arepas con huevo absorbieron menor contenido de grasa con el aumento de la temperatura y la disminución del tiempo de fritura. El incremento de ambos factores ocasionó una disminución de la luminosidad (L^*) y acrecentó la variación del color (ΔE), lo que se asoció a las reacciones de pardeamiento no enzimático catalizadas por la reducción de humedad. Las arepas con huevo procesadas a temperaturas altas presentaron una corteza más seca, requiriéndose una fuerza de ruptura mayor para quebrar la superficie de las mismas. Este estudio mostró que la metodología de superficie de respuesta puede ser utilizada para optimizar las variables temperatura y tiempo en el proceso de fritura por inmersión de arepas con huevo, y así obtener un producto final con un contenido bajo en grasa y mejores atributos de calidad.

Conflicto de intereses: No existe conflictos de interés por parte de los autores que escriben este artículo.

Agradecimientos: Los autores agradecen a COLCIENCIAS por la financiación del proyecto 110766441899 en la Convocatoria 664 de 2014 en conjunto con el Grupo NUSCA, al grupo GIPAVE y al Ingeniero Danny Garzón Jiménez de la Unidad Tecnológica de Alimentos (UTA) de la Universidad de Caldas, por contribuir con su experiencia en el desarrollo de los experimentos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bouchon P. Understanding oil absorption during deep-fat frying. *Adv Food Nutr Res.* 2009; 57: 209-234.
2. Alvis A, González A, Arrázola G. Effect of Edible Coating on the Properties of Sweet Potato Slices (*Ipomoea Batatas* Lam) Cooked by Deep Fat Frying. Part 2: Thermophysical and Transport Properties. *Inf Tecnol* 2015; 26: 103-116.
3. Kassama L, Ngadi M. Relationship between Oil Uptake and Moisture Loss during Deep Fat Frying of Deboned Chicken Breast Meat. *Adv Chem Eng Sci* 2016; 6: 324-334.
4. Zhang T, Li J, Ding Z, Fan L. Effects of Initial Moisture Content on the Oil Absorption Behavior of Potato Chips during Frying Process. *Food Bioprocess Tech* 2016; 9: 331-340.
5. Moreira R, Da Silva P, Gomes C. The effect of a de-oiling mechanism on the production of high quality vacuum fried potato chips. *J Food Eng* 2009; 92: 297-304.
6. Wexler L, Perez AM, Cubero-Castillo E, Vaillant F. Use of response surface methodology to compare vacuum and atmospheric deep fat frying of papaya chips impregnated with blackberry juice. *CYTA - J Food* 2016; 14: 578-586.
7. Torres JD, Acevedo D, Montero P. Effects of Vacuum Frying on the Attributes of Quality of arepa con huevo. *Inf Tecn.* 2017; 28: 99-108.
8. Esan TA, Sobukola OP, Sanni LO, Bakare HA, Munoz L. Process optimization by response surface methodology and quality attributes of vacuum fried yellow-fleshed sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) chips. *Food Bioprod Process* 2015; 95: 27-37.
9. Moreira RG. Vacuum frying versus conventional frying—An overview. *Eur J Lipid Sci Techn* 2014; 116: 723-734.
10. Archana G, Azhagu P, Sudharsan K, Sabina K, Palpandi R, Sivarajan M, Sukumar M. Evaluation of Fat Uptake of Polysaccharide Coatings on Deep-Fat Fried Potato Chips by Confocal Laser Scanning Microscopy. *Int J Food Properties.* 2016; 19: 1583-1592.
11. Abtahi MS, Hosseini H, Fadavi A, Mirzaei H, Rahbari M. The optimization of the deep-fat frying process of coated zucchini pieces by response surface methodology. *J Culinary Sci Technol* 2016; 14: 176-189.
12. Dueik V, Sobukola O, Bouchon P. Development of low-fat gluten and starch fried matrices with high fiber content. *LWT Food Sci Tech* 2014; 59: 6-11.
13. Akinpelu OR, Idowu MA, Sobukola OP, Henshaw F, Sanni SA, Bodunde G, Munoz L. Optimization of processing conditions for vacuum frying of high quality fried plantain chips using response surface methodology (RSM). *Food Sci Biotechnol* 2014; 23: 1121-1128.
14. Yuksel F, Kayacier A. Utilization of stale bread in fried wheat chips: Response surface methodology study for the characterization of textural, morphologic, sensory, some physicochemical and chemical properties of wheat chips. *Food Sci Technol* 2016; 67: 89-98.
15. Maneerote J, Noomhorm A, Takhar PS. Optimization of processing conditions to reduce oil uptake and enhance physico-chemical properties of deep fried rice crackers. *LWT Food Sci Tech* 2009; 42: 805-812.
16. Idowu AO, Aworh OC. Modelling and optimization of processing variables of snack (kokoro) produced from blends of maize and African yam bean seed flour. *Int Food Res. J.* 2017; 24: 607-613.
17. Oginni OC, Sobukola OP, Henshaw FO, Afolabi WA, Munoz L. Effect of starch gelatinization and vacuum frying conditions on structure development and associated quality attributes of cassava-gluten based snack. *Food Struct* 2015; 3: 12-20.
18. Yuksel F, Karaman S, Gurbuz M, Hayta M, Yalcin H, Dogan M, Kayacier A. Production of deep-fried corn chips using stale bread powder: Effect of frying time, temperature and concentration. *LWT-Food Sci Techn* 2017; 83: 235-242.
19. Yildiz Ö, Bulut B. Optimization of Gluten-Free Tulumba Dessert Formulation Including Corn Flour: Response Surface Methodology Approach. *Polish J Food Nutr Sci* 2017; 67: 25-32.
20. AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis: 925.10 and 920.39. 2012; 19 th ed. Arlington. VA, USA.
21. Gazmuri AM, Bouchon P. Analysis of wheat gluten and starch matrices during deep fat frying. *Food Chem* 2009; 115: 999-1005.
22. Omidiran AT, Sobukola OP, Sanni A, Adebawale AR, Obadina OA, Sanni LO, Wolfgang T. Optimization of some processing parameters and quality attributes of fried snacks from blends of wheat flour and brewers' spent cassava flour. *Food Sci Nutr* 2016; 4: 80-88.
23. Coker OJ, Sobukola OP, Sanni LO, Bakare HA, Kajihaua OE, Adebawale AR, Tomlins K. Quality attributes of cassava-fish crackers enriched with different flours: An optimization study

- by a simplex centroid mixture design. *J Food Proc Eng* 2016; 40: 1-11.
24. Gamble MH, Rice P, Selman J. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from Record UK tubers. *Int J Food Sci Tech* 1987; 22: 233-241.
 25. Bouchon P, Aguilera JM, Pyle DL. Structure oil absorption relationships during deep fat frying. *J Food Sci* 2003; 68: 2711-2716.
 26. Moreira RG, Sun X, Chen Y. Factors affecting oil uptake in tortilla chips in deep fat frying. *J Food Eng* 1997; 31: 485-498.
 27. Dueik V, Robert P, Bouchon P. Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps. *Food Chem* 2010; 119: 1143-1149.
 28. Shyu SL, Hwang LS. Process Optimization of Vacuum Fried Carrot Chips Using Central Composite Rotatable Design. *J Food Drug Anal* 2011; 19: 324-330.
 29. Mariotti M, Cortés P, Fromberg A, Bysted A, Pedreschi F, Granby K. Heat toxicant contaminant mitigation in potato chips. *LWT Food Sci Tech* 2015; 60: 860-866.
 30. Karacabey E, Turan MS, Özçelik SG, Baltacıoğlu C, Küçüköner E. Optimisation of pre-drying and deep-fat-frying conditions for production of low-fat fried carrot slices. *J Sci Food Agric* 2016; 96: 4603-4612.
 31. Morales-Pérez J, Vélez-Ruiz JF. Study of the Combined Effect of Drying and Frying on Toasted Tortillas Properties. *Inf Tecnol* 2011; 22: 55-68.