



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



USO DE DISTINTOS TIPOS DE FIBRA PARA REEMPLAZAR LA GRASA EN BIZCOCHOS. ESTUDIOS FÍSICOQUÍMICOS Y ESTRUCTURALES

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN CIENCIA E INGENIERIA DE
ALIMENTOS**

ALUMNO: Geraldo Filipe Nhapulo

TUTORA ACADEMICA: Isabel Hernando Hernando

COTUTORA: Amparo Quiles Chuliá

Curso Académico: 2015/2016

VALENCIA, Junio 2016

USO DE DISTINTOS TIPOS DE FIBRA PARA REEMPLAZAR LA GRASA EN BIZCOCHOS. ESTUDIOS FISICOQUÍMICOS Y ESTRUCTURALES

Geraldo Filipe Nhapulo, Amparo Quiles¹, Isabel Hernando¹.

RESUMEN

En este trabajo se evaluó el efecto que tiene la sustitución de un 30% de grasa en bizcochos, por ingredientes ricos en fibra, sobre la estructura y propiedades fisicoquímicas de las masas y de los respectivos bizcochos. En las diferentes formulaciones, se determinó la viscosidad aparente y se simuló el microhorneado de las masas. Se ejecutaron ensayos de perfil de textura y se analizó la estructura de la miga. Se estudiaron las distintas fracciones de digestibilidad del almidón y la liberación de glucosa mediante estudios de digestión *in vitro*. Los resultados, indicaron un descenso significativo ($P < 0,05$) de la viscosidad aparente de las masas elaboradas con fibra, originando una mayor incorporación de burbujas de aire y menor estabilidad que en las masas control. Esto llevó a una mayor aparición de canales de difusión en la estructura de la miga y a un aumento significativo ($P < 0,05$) del porcentaje de aire en la misma sección de los correspondientes bizcochos. Además, se registró un aumento significativo ($P < 0,05$) en la dureza, gomosidad, y elasticidad de los bizcochos. No se encontraron diferencias significativas ($P > 0,05$) en las fracciones RDS e SDS de digestibilidad de almidón, pero sí en la fracción RS y en la liberación de glucosa a los 180 min. La fibra soluble afectó menos la estructura y características de los bizcochos que la insoluble; por lo tanto, la grasa puede ser sustituida en un 30% por este tipo de fibra, para obtener bizcochos bajos en grasa, con menos calorías y con fibra alimentaria añadida.

Palabras Clave: Bizcocho, fibra, viscosidad, textura, estructura, burbujas de aire.

ABSTRACT

This study evaluated the effects of 30% of fat replacement in cakes by ingredients rich in fiber on the structure and physicochemical properties of the batters and the respective cakes. The apparent viscosity was determined and a microbaking of the batters was simulated in the different formulations. Texture profile tests were carried out and the crumb structure was analyzed. The different digestibility fractions of starch and glucose release were studied

¹ Grupo de Química y Microestructura de Alimentos. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n 46022 Valencia (España).

by *in vitro* digestion studies. The results showed a significant decrease ($P < 0.05$) of the apparent viscosity values of the fat-replaced batters, causing high incorporation of air bubbles and with less stability if compared to control. This fact led to an increased occurrence of channels in the crumb structure and a significant increase ($P < 0.05$) of the percentage of air in the respective cakes. In addition, a significant increase ($P < 0.05$) in hardness, gumminess, and springiness of the cakes was observed. There were no significant differences ($P > 0.05$) in the RDS and SDS fractions of starch digestibility, but, significant differences in RS and glucose release at 180 min were found. Soluble fiber affected less the structure and characteristics of the cakes than insoluble fiber, therefore, 30% of the fat can be replaced by this type of fiber to obtain low fat cakes, with less calories and cakes added dietary fiber.

Key Words: Cake, fiber, viscosity, texture, structure, air bubbles.

RESUM

En este treball es va avaluar l'efecte que té la substitució d'un 30% de greix en bescuits per ingredients rics en fibra sobre l'estructura i propietats fisicoquímiques de les masses i dels respectius bescuits. En les diferents formulacions, es va determinar la viscositat aparent i es va simular el microenfornat de les masses. Es van executar assajos de perfil de textura i es va analitzar l'estructura de la molla. Es van estudiar les distintes fraccions de digestibilitat de midó i l'alliberament de glucosa per mitjà d'estudis de digestió *in vitro*. Els resultats, van indicar un descens significatiu ($P < 0,05$) de la viscositat aparent de les masses elaborades amb fibra, originant una major incorporació de bombolles d'aire i amb menor estabilitat que en les masses control. Açò va portar a una major aparició de canals de difusió en l'estructura de la molla i un augment significatiu ($P < 0,05$) de percentatge d'aire en la mateixa secció dels corresponents bescuits. A més, es va registrar un augment significatiu ($P < 0,05$) en la duresa, gomositat, i elasticitat dels bescuits. No es van trobar diferències significatives ($P > 0,05$) en les distintes fraccions de digestibilitat de midó, però sí en l'alliberament de glucosa als 180 min. La fibra soluble va afectar menys l'estructura i característiques dels bescuits que la insoluble; per tant, el greix pot ser substituït en un 30% per este tipus de fibra, per a obtindre bescuits baixos en greix, amb menys calories i amb fibra alimentària afegida.

Palabras Clave: Bizcocho, fibra, viscosidad, textura, estructura, burbujas de aire.

INTRODUCCIÓN

Los bizcochos son unos de los productos más importantes de la industria de panadería y bollería, que en España ocupa un lugar destacado en la industria alimentaria y tiene un peso relevante en la economía nacional

(FIAB, 2014). Los bizcochos son mundialmente conocidos y están intrínsecamente conectados a la cultura de cada país, siendo comúnmente consumidos en el desayuno o como postre o merienda. Los consumidores aprecian y consideran los bizcochos como productos deliciosos con determinadas y particulares características organolépticas (Matsakidou et al., 2010).

Uno de los ingredientes importantes que confiere sus destacadas propiedades a los bizcochos, además del huevo, la harina y el azúcar, es la grasa, la cual constituye aproximadamente un 15-25% de la masa (Rodríguez-García et al., 2011). La grasa contribuye favoreciendo una buena incorporación de aire en la masa, produciendo bizcochos de mayor volumen e interfiere en la continuidad del gluten, favoreciendo la formación de un producto final con una textura más suave y blanda (Román et al., 2015). No obstante, la grasa es el constituyente de los alimentos con mayor valor energético (Monzó et al., 2012, Zehnet et al., 2010) y su elevado porcentaje en los bizcochos, hace que el aporte de calorías sea elevado y el perfil nutricional no muy saludable (Rodríguez-García et al., 2014). Muchos estudios han probado la estrecha conexión entre el desarrollo de ciertas enfermedades cardiovasculares, la obesidad y el sobrepeso con el consumo excesivo de grasa (Monzó et al., 2012). La Organización Mundial de la Salud (OMS) alerta que la obesidad y el sobrepeso, considerados problemas típicos de países con ingresos altos, se están convirtiendo en importantes problemas de salud pública en muchas partes del mundo. Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) afirma que una buena nutrición es la primera defensa contra las enfermedades, lo que requiere una atención especial por parte de la industria alimentaria comenzando por el diseño de alimentos.

En la actualidad se va dando cada vez mayor importancia tanto al valor nutritivo de los alimentos, como a que los nutrientes contenidos en ellos satisfagan las necesidades específicas del individuo (Monzó et al., 2012). Esto está de acuerdo con la exhortación de la OMS y las recomendaciones dietéticas generales de la comisión de nutrición del senado de EE.UU, de limitar la ingesta energética de grasa total y elevar la cantidad de fibra dietética a un mínimo de 22 gramos al día. De hecho, hay una creciente demanda de los consumidores por productos bajos en grasa, bajos en calorías y ricos en fibra alimentaria. La fibra dietética es un material de creciente interés nutricional y clínico, por sus efectos beneficiosos para la salud y está siendo usada como ingrediente en una gran variedad de alimentos (Oh et al., 2014). La fibra es capaz de regular la función intestinal, defender del contacto de ciertas sustancias nocivas con las paredes del intestino, reducir la absorción de colesterol y regular los niveles de glucosa en la sangre (Hardacre et al., 2015, Monzó et al., 2012, Oh et al., 2014). Desde el punto de vista fisiológico, el concepto de fibra alimentaria hace referencia a diversos carbohidratos (polisacáridos y oligosacáridos) y lignina que resisten la hidrólisis de las enzimas humanas, pero pueden ser fermentadas por la microflora del colon dando lugar a H₂, CH₄, CO₂, H₂O y ácidos grasos de cadena corta (Monzó et al., 2012,).

Hay investigaciones previas en las que se estudia la reducción del contenido en grasas en bizcochos u otros productos horneados mediante su sustitución por diferentes componentes, como un ingrediente funcional derivado de semillas de lino (Eslava-Zomeño et al., 2015), inulina (Zahn et al., 2010, Rodríguez-García et al., 2014), pectina de cítrico (Lim et al., 2014, Psimouli et al., 2013), fibra de cacao (Martínez-Cervera et al., 2011), polidextrosa (Kocer et al., 2007) y maltodextrina (Psimouli et al., 2013). En estos estudios, el uso de sustitutos de grasa fue factible, aunque esta afectó de distintas formas a la masa y las propiedades de los bizcochos.

El objetivo de este trabajo es estudiar los efectos que tiene la sustitución de un 30% de grasa en la formulación de bizcochos, por ingredientes ricos en fibra soluble (Fibersol-2), insoluble (Vitacel KF200) y la mezcla de las dos fibras, sobre la estructura y propiedades físicas de las masas y los respectivos bizcochos. Para alcanzar este objetivo, se determinó la viscosidad de las masas y se simuló el micro-horneado para evaluar la evolución de crecimiento de las burbujas de aire. Además, se ejecutaron ensayos de perfil de textura y se analizó la estructura de la miga de los bizcochos. Por último, se determinó la digestibilidad del almidón mediante estudios de digestión *in vitro*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ingredientes

Para la preparación de los bizcochos se utilizaron los siguientes ingredientes: harina de trigo (Harinas Segura S.L, Torrente, Valencia, España, composición proporcionada por el proveedor: 13,50-15,50% humedad, 9-11% proteínas); azúcar blanco (AB Azucarera Ibérica S.L.U., Madrid, España); yema y clara de huevo, ambas líquidas pasteurizadas (Ovocity, Llombay, Valencia, España); leche en polvo desnatada (Corporación Alimentaria Peñasanta, S.A., Siero, Asturias, España); aceite refinado de girasol (Aceites del Sur-Coosur, S.A., Vilches, Jaén, España); bicarbonato sódico E-500ii y ácido cítrico E-300 (Sodas y Gaseosas A. Martínez, S.L., Cheste, Valencia, España); sal; Fibersol-2 ingrediente alimentario rico en maltodextrina resistente (Matsutani Chemical Industry CO. LTD, Hyogo Japan; rico en fibra soluble, con fibra dietética total 90%); Vitacel KF200 ingrediente alimentario rico en fibra de patata, (J. Rettenmaier & Söhne GmbH + Co Kg, rico en fibra insoluble, con fibra dietética total 65%) y agua destilada.

Elaboración de las Masas y de los Bizcochos

Se estudiaron cuatro formulaciones que se presentan en la Tabla 1, la formulación control (C) y tres formulaciones más, en las que el aceite de girasol se sustituyó en un 30%, en relación al control, por Fibersol-2 (FS), Vitacel KF200 (FI) y una mezcla de las dos fibras a partes iguales (M). Se incorporó agua destilada en la elaboración de las masas en una relación de

Fibersol-agua (1:1) y Vitacel-agua (1:4) siguiendo las recomendaciones de los proveedores de las fibras.

TABLA 1. Composición de las formulaciones estudiadas (% en base harina)

Ingrediente	C	FS	M	FI
Harina	100	100	100	100
Azúcar	100	100	100	100
Yema	27	27	27	27
Clara	54	54	54	54
Leche	50	50	50	50
Aceite	46	32,2	32,2	32,2
Fibra Soluble	0	4	2	0
Fibra Insoluble	0	0	2	4
Agua	0	4	10	16
Bicarbonato	4	4	4	4
Ácido Cítrico	3	3	3	3
Sal	1,5	1,5	1,5	1,5

C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; M: bizcocho elaborado con mezcla de fibra soluble e insoluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Las diferentes masas se prepararon según el procedimiento “mezclado todo en uno” de Rodríguez-García et al. (2014), con algunas modificaciones. En primer lugar, se introdujeron todos los ingredientes líquidos de la receta, clara, yema, leche y agua, en la amasadora Kenwood Major Classic (Havant, Inglaterra, UK). A continuación, se adicionaron los ingredientes sólidos, harina, azúcar, Fibersol-2 y/o Vitacel KF200, bicarbonato, ácido cítrico y sal, en el mismo recipiente. Por último, se añadió el aceite de girasol. Para obtener las masas homogéneas, se realizó el mezclado de todos los ingredientes durante 30 s a 202 rpm, seguido de 1 min a 260 rpm y por último 3 min a 320 rpm.

Para la obtención de los bizcochos, 700 g de las diferentes masas se vertieron en moldes de Pyrex® de 20 cm de diámetro y se introdujeron en un horno convencional (Electrolux, modelo EOC3430DOX, Estocolmo, Suecia), precalentado a 180 °C durante 30 min. El horneado se llevó a cabo a 180 °C durante 43 min para la formulación C, 47 min para las formulaciones FS y M y 51 min para la formulación FI. Tras sacar los bizcochos del horno, se dejaron atemperar al menos 1 h 30 min antes de proceder a sus análisis. Todas las masas y bizcochos se prepararon por triplicado y los análisis se realizaron dentro de las 24 horas siguientes a su elaboración.

Viscosidad Aparente

La viscosidad de las masas fue determinada utilizando el viscosímetro Haake Viscotester 6 R Plus (Thermo Scientific, Waltham, MA), con el husillo R3 a 6 rpm a temperatura ambiente. Las muestras se colocaron en un

baño termostático para mantener la temperatura a 25 °C. Las medidas fueron tomadas en duplicado para cada masa y en triplicado para cada formulación.

Análisis de Imagen de las Masas (Simulación de Micro-horneado)

Para la observación microscópica durante la simulación del micro horneado se utilizó una placa de control de temperatura (Analysa-LTS350, Linkam, Surrey, UK) montada bajo la lente del microscopio óptico (Nikon ECLIPSE 80i, Nikon Co., Ltd., Tokyo, Japan). Se colocó una gota de la muestra en la concavidad del portamuestras y este en la placa de control de temperatura. Durante el calentamiento, la rampa de temperatura fue controlada por un sistema de refrigeración, con una bomba de nitrógeno líquido (Linkam). El perfil de temperatura utilizado fue de 1,5 °C/min desde la temperatura ambiente (25 °C) hasta 105 °C. Las muestras de las masas fueron observadas con unos aumentos de 4X (objetivo x4/0.13 ∞ - WD 17.1, Nikon). Las imágenes se capturaron con una cámara (ExWaveHAD, model no.DXC-190) acoplada al microscopio y conectada a un ordenador. Durante la simulación del microhorneado, se grabó un video con las imágenes capturadas cada 10 s en un formato de 640x540 pixels utilizando el software del microscopio (Linksys 32, Linkam). Se analizaron tres muestras de cada formulación. Las imágenes fueron analizadas utilizando el software ImageJ (National Institute of Health, Bethesda, MD).

Estructura Macroscópica de la Miga

Los bizcochos se cortaron transversalmente por la zona central, en dos mitades que se escanearon con un escáner HP Scanjet G2710 (Hewlett-Packard, Palo Alto, CA, U.S.A) con una resolución de 300 dpi. Se analizaron secciones centrales del bizcocho de 10 x 4 cm de campo. La imagen recortada se separó en canales, se contrastó, se segmentó y por último se binarizó con ayuda del programa ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA). Se analizaron cuatro imágenes por formulación.

Textura de los Bizcochos

Las propiedades texturales se evaluaron mediante un analizador de textura TA-TXTplus (Stable Microsystem, Ltd., Godalming, England, UK) usando el programa Texture Exponent Lite 32 (versión 6.1.4.0, Stable Microsystems). Se realizó un análisis de perfil de textura (TPA) en cubos de la zona central del bizcocho (3 x 3 x 3 cm), tras eliminar la corteza. La velocidad del test fue de 1 mm/s, con una compresión del 40% de la altura original del cubo y el tiempo de reposo entre los dos ciclos de compresión fue de 5 s. El valor mínimo de umbral de fuerza registrado fue de 5 g. La compresión se realizó con una sonda cilíndrica de aluminio de 5 cm de diámetro. Tras los dos ciclos de compresión se determinaron los parámetros: dureza, elasticidad, cohesividad, masticabilidad y gomosidad. Cada medida se realizó por cuadruplicado.

Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

De cada una de las formulaciones estudiadas, se cortaron cubos de 0,5 cm de lado que se congelaron a -80 °C y se liofilizaron (Telstar, Lyoquest 55, Terrassa, Barcelona, España). Posteriormente, las muestras se recubrieron con platino a vacío, y se observaron en un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM Zeiss, modelo Ultra 55, Oberkochen, Alemania). Las formulaciones se analizaron por duplicado.

Digestión *in Vitro*

Las digestiones de los bizcochos englobaron tres etapas: oral, gástrica e intestinal. Para la digestión oral se siguió el protocolo descrito por Smith et al. (2015), con algunas modificaciones. Para ello, se desmenuzó a mano 25 g de bizcocho y se añadió 35 mL de disolución de saliva previamente incubada a 37 °C. Esta mezcla se trituró con una batidora (Ufesa, U1EBB40001; BP-4500) durante 15 s, se añadió 70 mL de agua bidestilada y se mezcló a mano durante 1 min para simular la masticación. La disolución de saliva fue preparada según Mishellany-Dutor et al. (2011). Se disolvieron en 1 L de agua bidestilada, 5,208 g de NaHCO₃, 1,369 g de K₂HPO₄·3H₂O, 0,877 g de NaCl, 0,477 g de KCl, 0,441 g de CaCl₂·2H₂O, 2,16 g de mucina de estómago porcino tipo II (PGM Sigma M2378) y 8,70 g de α-amilasa tipo VI-B de páncreas porcino (Sigma A3176). En la etapa gástrica, para digerir 25 g de bizcocho que ya había sido digerido oralmente, se introdujeron 25 g de fluido gástrico en el digestor, formado por un reactor de vidrio con camisa termostataada y agitación magnética continua, acoplado a un circulador de agua de temperatura controlada. El fluido gástrico se preincubó a 37 °C durante 5 min a pH 2. Se añadió la muestra en el reactor, se ajustó la mezcla a pH 2 con HCl 2 M, se añadió 0,006 g de pepsina (Sigma P7000) y se incubó durante 1 h a 37 °C con agitación. La disolución de electrolitos que constituía el fluido gástrico se preparó disolviendo en 1 L de agua destilada 3,1 g de NaCl, 0,11 g de CaCl₂, 1,1 g de KCl, 5,68 mL de NaCO₃ 1 M y se ajustó el pH a 2 con HCl 2 M. En la etapa intestinal, se llevó el pH de la muestra digerida a 6 con NaHCO₃ 1 M y se añadió 62,5 mL de pancreatina (Sigma P1750, 4xUSP) más sales biliares (Sigma B8631). Se añadió amiloglucosidasa (A7095≥300 U/mL, Sigma), en proporción 0,2 mL/g almidón según Oh et al., (2014) y Soog et al., (2014). Se llevó el pH a 7,5 con NaHCO₃ a 0,1 M y se incubó a 37 °C durante 3 h en agitación. Se sacaron alícuotas a los 0, 20, 60, 90, 120 y 180 min de la digestión, se añadió inmediatamente 1,4 mL de etanol para parar la reacción (Bae et al., 2013 y Oh et al., 2014) y se centrifugó a 3000 rpm durante 3 min. A continuación, se determinó la concentración de glucosa, mediante el Kit GOPOD a 510 nm. Para ello, se tomaron alícuotas de 0,1 mL del sobrenadante de la muestra centrifugada, a la cual se añadió 3 mL de reactivo GOPOD, se incubó a 40-50 °C durante 20 min y se leyó la absorbancia a 510 nm. La fracción de almidón de digestión rápida (RDS) y almidón de digestión lenta (SDS) se midió después de la digestión intestinal

tras 20 y 120 minutos respectivamente. El almidón resistente (RS) se calculó como el almidón residual tras 180 min de digestión (Oh et al., 2014).

Análisis Estadístico

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se realizó mediante el análisis de la varianza (ANOVA). Se calcularon las diferencias mínimas significativas (LSD) con un nivel de significación $P < 0.05$. Para ello se empleó el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.II (StatPoint Technologies, Inc., Warrenton, VA, Estados Unidos).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Viscosidad Aparente

Los resultados obtenidos para la viscosidad de las masas de las formulaciones de los bizcochos estudiados se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2. Valores medios de la viscosidad de las masas de los bizcochos.

Formulación	C	FS	M	FI
Viscosidad(mPa.s)	10732,04 ^a (348,42)	10724,73 ^a (470,06)	9032,95 ^b (233,36)	7675,27 ^c (53,53)

Los valores entre paréntesis son la desviación estándar. ^{a, b, c} las medidas con letras diferentes difieren significativamente ($P < 0.05$). C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; M: bizcocho elaborado con mezcla de fibra soluble e insoluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Al bajar el contenido de grasa en un 30% se observó una disminución significativa ($P < 0.05$) de la viscosidad de las masas al compararlas con el control, excepto en el caso de la formulación FS. Esta es una tendencia observada previamente por otros autores, pues en otros estudios (Zahn et al., 2010, Rodríguez-García et al., 2014a y Román et al., 2015), también se obtuvieron valores bajos de viscosidad al sustituir la grasa por fibras e ingredientes funcionales y más bajos en mayores ratios de sustitución.

Teniendo en cuenta que el nivel de reducción de la grasa es constante, la adición del ingrediente con fibra insoluble contribuye en mayor medida en el descenso de la viscosidad, observándose diferencias significativas ($P < 0.05$) entre las formulaciones FI y las otras (C, FS y M). La fibra insoluble también influyó el descenso de la viscosidad en la formulación M y se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) con respecto a las otras (C, FS y FI). No obstante, la adición del ingrediente con la fibra soluble se mostró más resistente al cambio de la viscosidad, no observándose diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las formulaciones FS y C. Este comportamiento reológico de las masas, es debido, en gran medida, a la mayor cantidad de agua que se incorpora con la fibra insoluble (1:4) si es comparada con la soluble (1:1), lo que torna mayor el ratio de ingredientes líquidos respecto a sólidos en la formulación FI dando lugar a viscosidades más bajas.

Microscopía Óptica y Análisis de Imagen de las Masas

La Figura 1 muestra imágenes de las masas de las distintas formulaciones (C, FS, M y FI) a diferentes temperaturas (30, 60, 90 y 100 °C), durante la simulación del microhorneado.

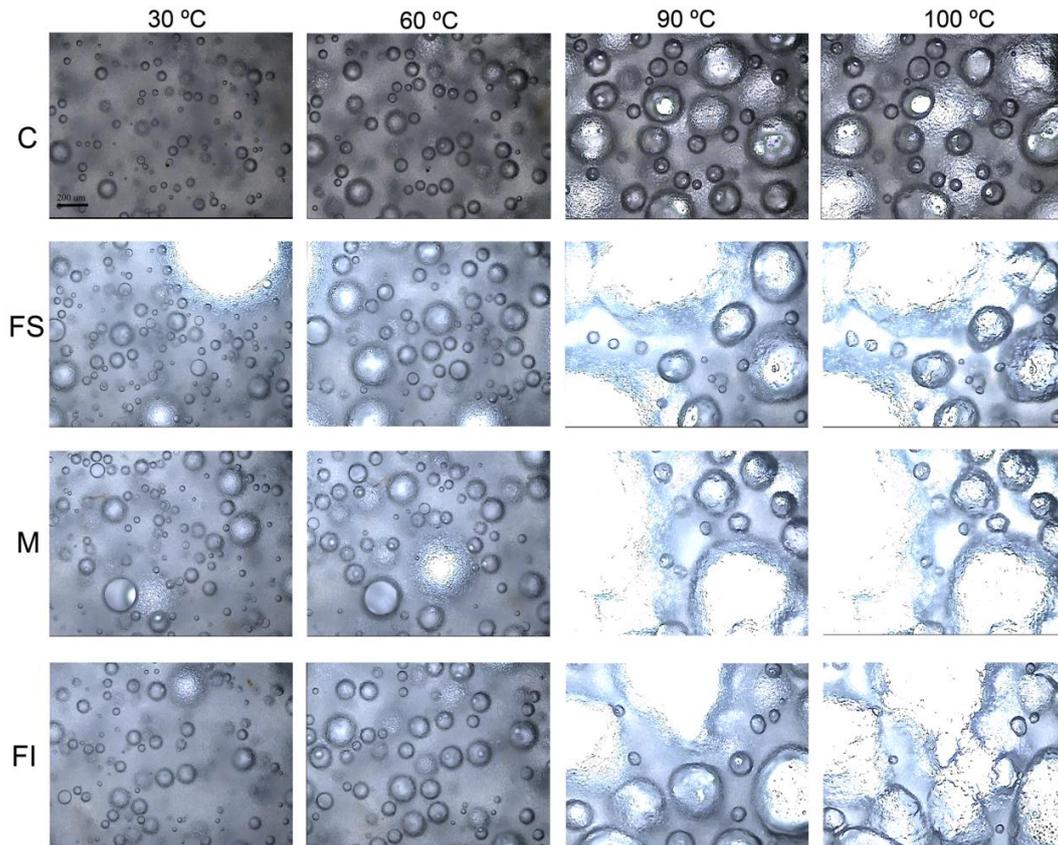


FIGURA 1. LM. Imágenes de expansión de las burbujas de aire en distintas temperaturas durante el microhorneado. C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; M: bizcocho elaborado con mezcla de fibra soluble e insoluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Un análisis visual de las imágenes de las masas, mostró un claro efecto de expansión de las burbujas de aire debido a la reducción de grasa y la adición de las fibras soluble e insoluble junto con el agua. En la masa C, el tamaño de las burbujas aumentó de manera uniforme y controlada, lo que confirió una homogeneidad en la distribución de las burbujas con el aumento de la temperatura.

En general, la reducción de grasa y la adición de las fibras soluble e insoluble, permitió la incorporación de mayor cantidad de burbujas durante el proceso de mezclado. Con el aumento de la temperatura, se observó lógicamente la expansión de las burbujas, obteniéndose una relativa mayor estabilidad en FS. La expansión de las burbujas en FI fue mayor, siendo las menos estables a la subida de la temperatura, perdiendo algunas burbujas

su identidad a los 100 °C por coalescencia con las burbujas vecinas. Por último, las burbujas de M presentaron un comportamiento intermedio, con mayor tendencia hacia el comportamiento de FI.

Las imágenes fueron analizadas para cuantificar los resultados del microhorneado. En la Figura 2, se presentan los histogramas de distribución de los tamaños de las burbujas a distintas temperaturas. La masa de la formulación C incorporó menor cantidad de burbujas y registró una tendencia regular de distribución de los tamaños de las burbujas durante el calentamiento en relación a las otras masas. Este comportamiento puede ser debido a la mayor viscosidad aparente de esta masa (C), que contribuye en una mayor estabilidad de las burbujas de aire, lo que retarda el movimiento de las burbujas en la masa y ralentiza la desproporción y coalescencia (Rodríguez-García et al., 2014a).

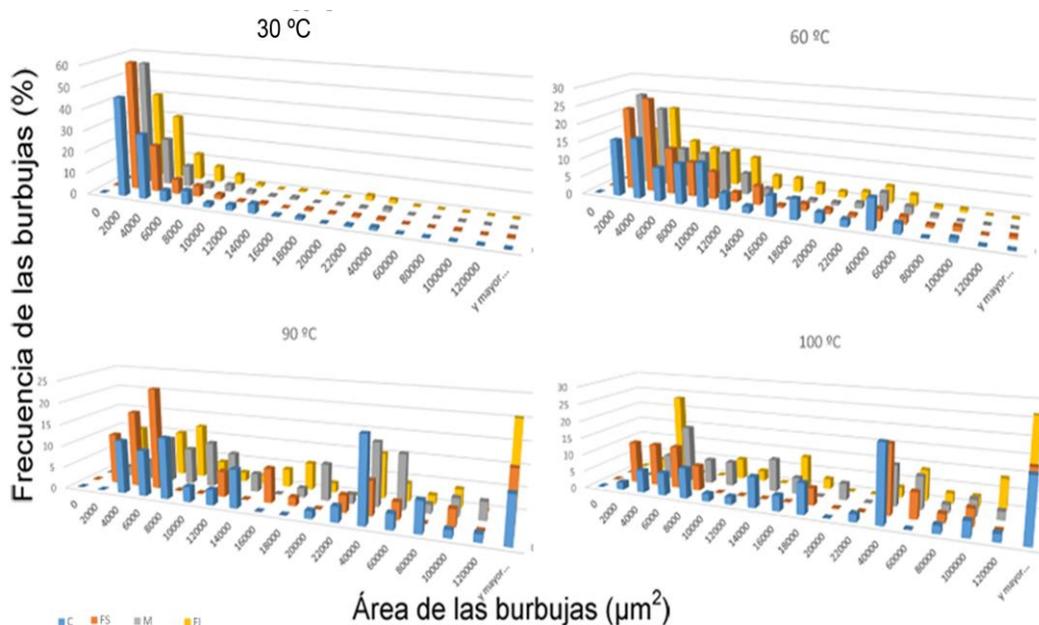


FIGURA 2. Histogramas de distribución de los tamaños de las burbujas de aire en distintas temperaturas durante el microhorneado. C- azul, FS- naranja, M- gris y FI- amarillo.

Las masas FS, M y FI con un 30% de reducción de grasa, presentaron una mayor incorporación de burbujas de aire durante la mezcla, pues los histogramas muestran mayor frecuencia de burbujas pequeñas en el comienzo del proceso de microhorneado, sobre todo en el caso de las masas FS y M. Durante el proceso de microhorneado, los tamaños de burbujas de aire se van distribuyendo de forma irregular, pero al final del calentamiento (90 y 100 °C) se observó en la masa FI un mayor porcentaje de burbujas de mayor tamaño.

El notable descenso en la viscosidad aparente de las masas FI y la consecuente reducción de la estabilidad de las burbujas de aire en las masas, aumentaron la movilidad de las burbujas, el ratio de desproporción, la coalescencia de las burbujas, y su tamaño.

Estructura Macroscópica de la Miga

En la Figura 3, se muestran las imágenes de los diferentes bizcochos (C, FS, M y FI), escaneadas, contrastadas y binarizadas.

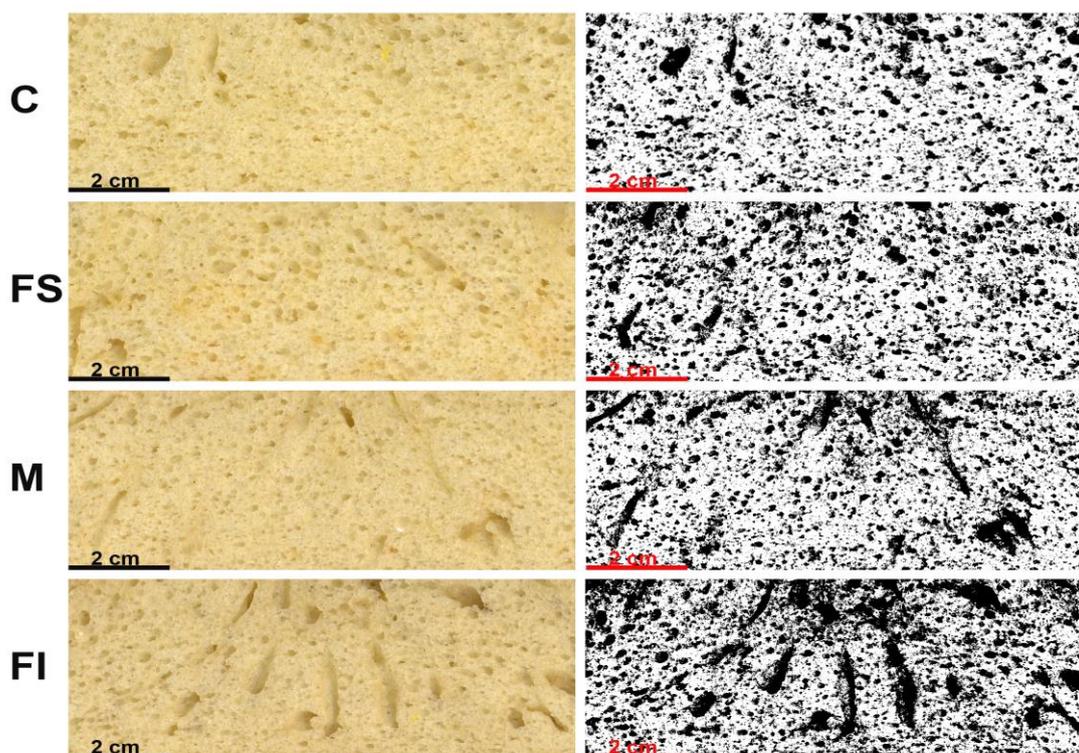


FIGURA 3. Imágenes escaneadas de los bizcochos C, FS, M y FI, campo de 4X10 cm y sus imágenes binarizadas correspondientes (118 pixels/cm). C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; M: bizcocho elaborado con mezcla de fibra soluble e insoluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

El análisis visual de las imágenes de los bizcochos (Figura 3), muestra una macroestructura de la miga prácticamente homogénea en el bizcocho control (C). En cambio, en los bizcochos con una reducción del contenido de grasa, se observó la aparición de una serie de canales de difusión en la miga. La aparición de estos canales fue menos notable en el bizcocho FS, pero más destacable e intensa en el bizcocho FI.

Las imágenes de los bizcochos también fueron analizadas para cuantificar los resultados de la macroestructura de la miga (Tabla 3). No se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) en cuanto al número de alveolos entre todas las formulaciones. Sin embargo, FI presentó significativamente ($P < 0.05$) el mayor tamaño medio de los alveolos y también el mayor área total con respecto a los otros bizcochos. Por tanto, en la misma sección de bizcochos analizada, FI presentó significativamente ($P < 0.05$) mayor porcentaje de aire. En la circularidad de los alveolos de los bizcochos no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$).

TABLA 3. Valores medios de los distintos parámetros de análisis de la miga de los bizcochos (C, FS, M y FI).

	Numero de Alveolos	Área Total de Alveolos(cm ²)	Área Media de Alveolos(cm ²)	Circularidad de Alveolos	Área Total de Alveolos (%)
C	1204,8 ^a (96,35)	11,25 ^a (0,95)	0,010 ^a (0,001)	0,50 ^a (0,0)	28,13 ^a (2,37)
FS	1193 ^a (10,74)	12,11 ^a (1,86)	0,010 ^a (0,002)	0,50 ^a (0,02)	30,27 ^a (4,65)
M	1210,8 ^a (48,33)	12,98 ^a (0,84)	0,011 ^a (0,001)	0,49 ^a (0,01)	32,45 ^a (2,11)
FI	1171,5 ^a (50,94)	15,41 ^b (1,47)	0,014 ^b (0,002)	0,49 ^a (0,01)	38,52 ^b (3,69)

Los valores entre paréntesis son la desviación estándar. ^{a, b} las medidas con letras diferentes en la misma columna difieren significativamente (P < 0,05). C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; M: bizcocho elaborado con mezcla de fibra soluble e insoluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Estos resultados están de acuerdo con la tendencia observada y descrita en el comportamiento de las masas de los bizcochos durante el microhorneado. La habilidad de la masa para expandirse se debe entre otros factores, a la presión de los gases durante el horneado: el aire, el vapor de agua y el dióxido de carbono (Rodriguez-Garcia et al., 2014b). Esto está intrínsecamente afectado por la viscosidad, por lo tanto, se justifica la cada vez mayor aparición de canales y el aumento del porcentaje de aire con el descenso de la viscosidad de las masas de los respectivos bizcochos.

Textura de los Bizcochos

Los resultados de los parámetros obtenidos a partir de las curvas del análisis del perfil de textura de los bizcochos estudiados se presentan en la Tabla 4.

TABLA 4. Valores medios de las propiedades texturales de los bizcochos.

	Dureza (N)	Masticabilidad (N)	Gomosidad (N)	Cohesividad	Elasticidad	Adhesividad (g.s)
C	4,98 ^a (0,46)	3,15 ^a (0,28)	3,56 ^a (0,34)	0,71 ^a (0,01)	0,88 ^a (0,01)	2,55 ^a (1,55)
FS	5,62 ^b (0,41)	3,57 ^b (0,22)	4,03 ^b (0,27)	0,72 ^a (0,01)	0,88 ^a (0,01)	3,17 ^a (1,01)
M	6,22 ^c (0,82)	3,98 ^c (0,49)	4,46 ^c (0,58)	0,72 ^a (0,00)	0,89 ^b (0,01)	2,82 ^a (2,01)
FI	6,95 ^d (0,69)	4,46 ^d (0,43)	4,99 ^d (0,49)	0,72 ^a (0,00)	0,90 ^b (0,01)	2,73 ^a (1,12)

Los valores entre paréntesis son la desviación estándar. ^{a, b, c, d} las medidas con letras diferentes en la misma columna difieren significativamente (P < 0,05). C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; M: bizcocho elaborado con mezcla de fibra soluble e insoluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

La reducción de grasa en un 30% generó valores de dureza significativamente mayores (P < 0,05), observándose un valor más alto en la formulación FI. Esto significa que es necesario aplicar mayor fuerza para

deformar un trozo del bizcocho FI en comparación con las otras formulaciones. Eslava-Zomeño et al., (2015) obtuvieron valores de dureza significativamente mayores en bizcochos elaborados con Optisol™ 5300 con distintos ratios de sustitución de grasa. Psimouli et al., (2013), también encontraron valores de dureza significativamente mayores en bizcochos elaborados con distintos carbohidratos, como sustitutos de grasa.

Los valores del parámetro masticabilidad, siguieron una tendencia similar a los de dureza. El bizcocho control obtuvo valores de masticabilidad significativamente ($P < 0.05$) más bajos que el resto de los bizcochos. Con la sustitución de un 30% de grasa y la adición de las fibras soluble e insoluble en las formulaciones, este parámetro aumentó significativamente ($P < 0.05$) siendo FI el bizcocho con mayor valor. Esto implica la necesidad de mayor energía para masticar el bizcocho FI para que esté listo para ser tragado.

Los valores de gomosidad siguieron una tendencia similar a los de dureza y masticabilidad. Mientras que el bizcocho control presentó valores de gomosidad significativamente más bajos ($P < 0.05$), el FI obtuvo valores significativamente más altos.

Los parámetros masticabilidad y gomosidad, por definición están directamente relacionados y afectados por la dureza y por eso, siguen también su tendencia. En general, la tendencia creciente de estos parámetros podría relacionarse con el decrecimiento de la viscosidad de las masas de los respectivos bizcochos. Tanto el bajo número de burbujas como la distribución e crecimiento homogéneo de burbujas pequeñas en la masa del bizcocho control condicionan la baja dureza obtenida. En cambio, la mayor variación de los tamaños de las burbujas que se observa tras la adición de las fibras soluble e insoluble, sobre todo la insoluble, aumenta considerablemente la dureza. Por otro lado, teniendo en cuenta que una de las funciones de la grasa es dar lugar a bizcochos suaves y blandos (Rodríguez-García et al., 2014c), con su reducción y adición de fibra soluble e insoluble se puede esperar que aumente la dureza de los bizcochos y por tanto, la masticabilidad y gomosidad.

Los valores de cohesividad y adhesividad, indican que no hubo diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los bizcochos estudiados. La reducción de la grasa y adición de las fibras soluble e insoluble, no influyó el trabajo necesario para comprimir las muestras por segunda vez con respecto a la primera, ni alteró el trabajo necesario para separar el émbolo de compresión de la muestra.

Los valores de elasticidad no presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre C e FS y entre M e FI, siendo los valores para estos últimos significativamente mayores ($P < 0.05$). Esto podría relacionarse con la mayor dureza registrada en los bizcochos M y FI, por lo tanto, es de esperar que, durante la primera compresión, éstos recuperen mayor altura en comparación con los otros bizcochos.

Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)

En la Figura 4 se presentan las imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), en las que se observa la microestructura de las fibras soluble (Fibersol-2) e insoluble (Vitacel K200) y los bizcochos C, FS y FI.

Las estructuras de las fibras evidenciaron notables diferencias entre ellas. La fibra soluble está constituida por muchas partículas de variados tamaños y formas, siendo la mayoría granulares y con apariencia lisa. Mientras que, la fibra insoluble, presenta un aspecto típico de células vegetales con una apariencia rugosa, donde se puede observar las paredes celulares (pc) y los vasos conductores (vc).

La estructura del bizcocho control (C), se observó constituida por una red de gluten de la harina, en la que se incorporó el resto de ingredientes. Los gránulos de almidón parcialmente gelatinizados quedaron albergados en la red de gluten y el aceite se comportó como lubricante, generando una estructura continua. Los bizcochos FS y FI, con 30% de reducción de grasa, tuvieron sus estructuras influenciadas por las características de las respectivas fibras, presentado una microestructura más irregular, ya que el recubrimiento de aceite es menor. En el FS son notables los gránulos de almidón parcialmente gelatinizados, que mantienen su identidad y de forma irregular están distribuidos en la matriz del bizcocho. En el FI, los gránulos de almidón están muy embebidos en la matriz dando lugar a una estructura más compacta, que se podría relacionar con la textura más dura observada en estos bizcochos.

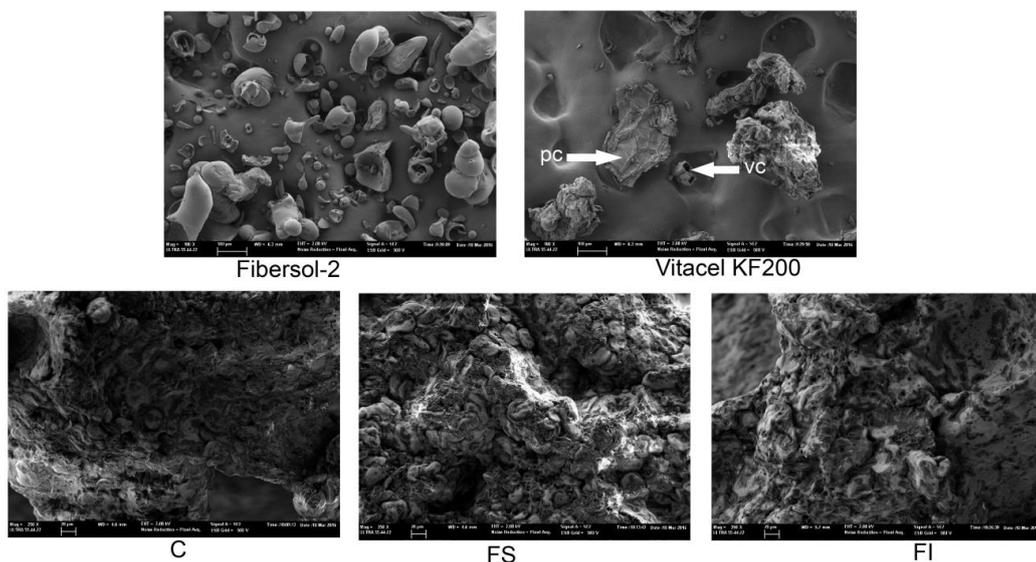


FIGURA 4. Microscopia electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM). Imágenes de las fibras solubles (Fibersol-2) e insoluble (Vitacel KF200). Magnificación (100x). Barra = 100 μ m. Imágenes de los bizcochos C, FS y FI. Magnificación (250x). Barra = 20 μ m. pc: paredes celulares, vc: vasos conductores. C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Digestión *in Vitro*

En las Figuras 5 y 6, se muestran las curvas de liberación de glucosa y las fracciones de almidón según su digestibilidad, durante el transcurso de la digestión *in vitro* de los bizcochos C, FS y FI. Según su digestibilidad *in vitro*, Englyst *et al.* (1992) establecieron una clasificación nutricional del almidón y pusieron en evidencia que almidones de distinta fuente o con distinta forma (estado físico) eran digeridos siguiendo cinéticas diferentes. Así se pueden distinguir tres fracciones principales del almidón, la fracción que se digiere de manera rápida (RDS), la que se digiere de manera lenta (SDS) y la que no se digiere en ningún grado o almidón resistente (RS). Las fracciones de almidón gelatinizados que son digeridos a los 20 min (RDS) y entre los 20 e 120 min (SDS), reflejan la tasa de absorción en el intestino delgado (Oh *et al.*, 2013). Así, son nutricionalmente deseados bajos valores de RDS y altos valores de SDS (Bae *et al.*, 2013). La fracción RS no libera glucosa al organismo pero toma la funcionalidad de la fibra dietética (Monzó *et al.*, 2012).

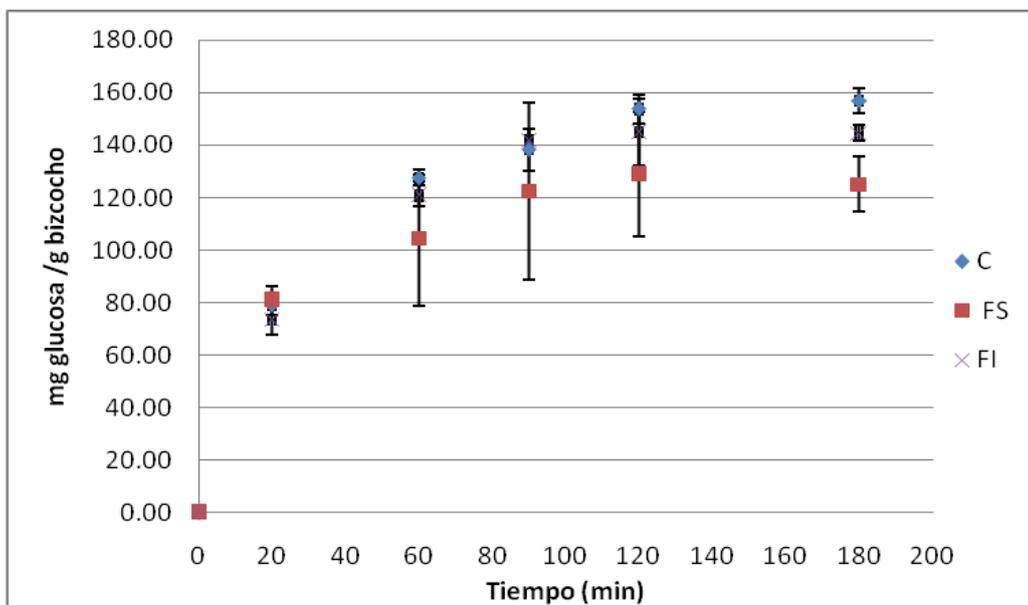


FIGURA 5. Cantidad de glucosa liberada durante la digestión *in vitro* de los bizcochos C, FS y FI. C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

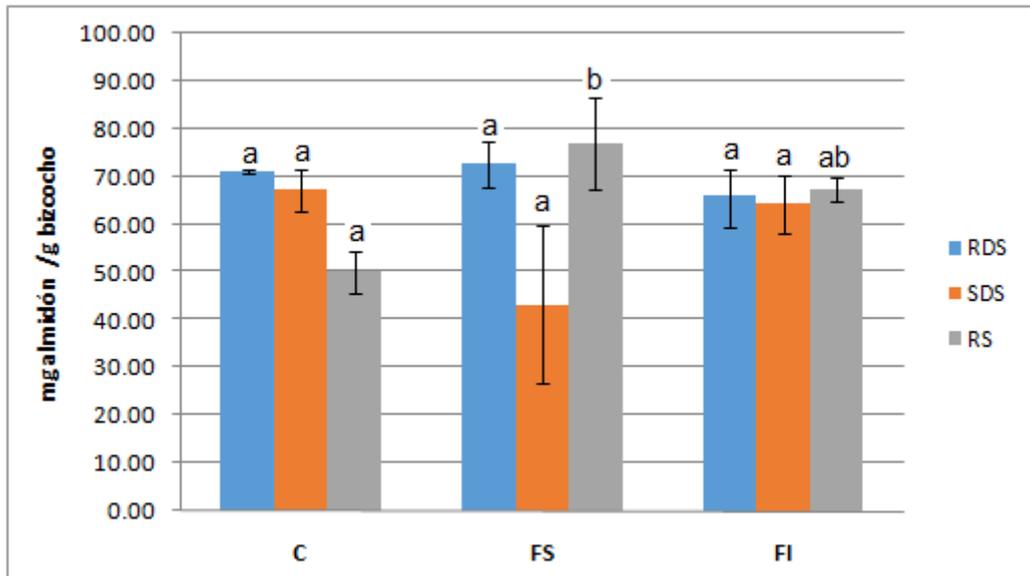


FIGURA 6. Fracciones de almidón según su digestibilidad, tras la digestión *in vitro* de los bizcochos C, FS y FI. RDS: almidón de rápida digestibilidad, SDS: almidón de lenta digestibilidad, RS: almidón resistente. C: bizcocho control; FS: bizcocho elaborado con fibra soluble; FI: bizcocho elaborado con fibra insoluble.

Se observó una tendencia creciente en la hidrólisis del almidón a lo largo de la digestión (Figura 5). No se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre todas las muestras estudiadas a los 20, 60, 90 y 120 minutos de digestión. Sin embargo, FS presentó valores significativamente menores ($P < 0.05$) que el resto de los bizcochos transcurridos 180 min.

Estos resultados, están de acuerdo con las fracciones de digestión de almidón (RDS, SDS y RS), presentados en la Figura 6 ya que no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre las fracciones RDS y SDS en los bizcochos estudiados.

El bizcocho FS, que tiene la fibra con mayor afinidad con el agua (Fibersol-2), mostró valores más bajos de la liberación de glucosa a los 180 min y valores significativamente mayores ($P < 0.05$) de la fracción del almidón resistente (RS). Esto se podría relacionar con las imágenes de la microscopía electrónica de barrido de emisión de campo donde se observan los gránulos de almidón en la matriz del bizcocho FS menos gelatinizados que en el caso de FI y además, muy compactos en la matriz, lo que limitaría la accesibilidad física de las enzimas digestivas. La adición de fibra en el procesado de alimentos limita la gelatinización del almidón y oculta los gránulos del almidón, aumentando la proporción de RS (Hardacre et al., 2015). Por otro lado, la fibra con mayor capacidad de absorción de agua compite con el almidón por el agua disponible durante el procesado del bizcocho produciendo una baja gelatinización de almidón y por lo tanto, se reduce la liberación de glucosa durante la digestión *in vitro* (Oh et al., 2013).

CONCLUSIONES

La sustitución de un 30% de grasa en la formulación de bizcochos por ingredientes ricos en fibra soluble e insoluble, condicionó el descenso de la viscosidad siendo FI la masa menos viscosa. Como consecuencia de la baja viscosidad, las masas incorporaron mayor cantidad de burbujas de aire durante el mezclado y FI presentó mayor tamaño de burbujas que las otras formulaciones a las mismas temperaturas durante el microhorneado. En el análisis macroscópico de la miga, el bizcocho FI presentó además mayor cantidad de canales de difusión y mayor porcentaje de aire. Por otro lado, la sustitución de un 30% de grasa en la formulación de bizcochos por ingredientes ricos en fibra soluble e insoluble produjo un aumento en la dureza, gomosidad, masticabilidad y elasticidad. El bizcocho FI es más esponjoso al tener más cantidad de aire, pero más duro, lo que se relaciona con su matriz más compacta observada en FESEM. En la digestión *in vitro*, FS obtuvo mayor valor de almidón resistente (RS) y menor liberación de glucosa a los 180. La fibra soluble afecta menos a la estructura y las características de los bizcochos, que la insoluble, por lo tanto, el ingrediente Fibersol-2 puede ser utilizado para sustituir parcialmente la grasa en la formulación de bizcochos y supone una estrategia adecuada para la obtención de bizcochos saludables.

REFERENCIAS

- Bae, I.Y.; Lee, H.I.; Ko, A.; Lee, H.G. 2013. Substituting whole grain flour for wheat flour: Impact in cake quality and glycemic index. *Food Science and Biotechnology*, 22(5):1301-1307.
- Englyst, H. N.; Kingman, S. M.; Cummings, J. H. 1992. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions, *European Journal of Clinical Nutrition*, 46(2): 33–50.
- Eslava-Zomeño, C.; Quiles, A.; Hernando, I. 2015. Reformulación de bizcochos para la disminución de su contenido en grasa mediante un ingrediente funcional. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Valencia.
- FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Papel de la FAO en la nutrición. <http://www.fao.org/nutrition/es/>. (Diciembre, 2015).
- FIAB. 2014. Federación Española de la Industria de Alimentación y Bebidas. <http://www.asemac.es/docus/>. (Diciembre 2015).
- Hardacre, A.K.; Yap, S.-Y.; Lentle, R.G.; Monro, J.A. 2015. The effect of fibre and gelatinised starch type on amylolysis and apparent viscosity during *in vitro* digestion at a physiological shear rate. *Carbohydrate Polymers*, 123: 80-88.
- Kocer, D.; Hicsasmaz, Z.; Bayindirli, A.; Katnas, S. 2007. Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar-and fat-replacer. *Journal of Food Engineering*, 78(3): 953-964.
- Lim, J.; Ko, S.; Lee, S. 2014. Use of Yuja (*Citrus junos*) Pectin as a Fat Replacer in Baked Foods. *Food Sci. Biotechnol*, 23(6): 1837-1841.
- Martínez-Cervera, S.; Salvador, A.; Muguerza, B.; Moulay, L.; Fiszman, S. 2011. Cocoa fibre and its application as a fat replacer in chocolate muffins. *LWT-Food Science and Technology*, 44(3): 729-736.
- Matsakidou, A.; Blekas, G.; Paraskevopoulou, A. 2010. Aroma and physical characteristics of cakes prepared by replacing margarine with extra virgin olive oil. *LWT-Food Science and Technology*, 43(6): 949-957.

- Mishellany-Dutour, A.; Peyron, M. A.; Jocelyn C.; Hartmann, O. F. C.; Alric, M.; Woda, A. 2011. Comparison of food boluses prepared in vivo and by the AM2 mastication simulator. *Food Quality and Preference* 22: 326–331.
- Monzó, J. M.; Segovia, P. G. 2012. *Nutrición Humana*. Universitat Politècnica de Valencia. Valencia.
- Oh, I.K.; Bae, I.Y.; Lee, H.G. 2014. *In Vitro* Starch digestion and cake quality. Impact of the ratio of soluble and insoluble dietary fiber. *International Journal of Biological Macromolecules*, 63: 98-103.
- OMS. Organizacion Mundial de la Salud. 2003. Dieta, nutrición y prevención de enfermedades crónicas. Serie de Informes Técnicos No. 916. Informe de una Consulta Mixta de Expertos OMS/FAO. <http://www.who.int/dietphysicalactivity/publications/trs916/en/> (Diciembre, 2015).
- Psimouli, V; Oreopoulou, V. 2013. The Effect of Fat Replacers on Batter and Cake Properties. *Journal of Food Science* 78(10):C1495-C1502.
- Rodríguez-García, J.; Puig, A.; Salvador, A.; Hernando, I. 2012. Optimization of a Sponge Cake with inulin as fat replacer: Structure, Physicochemical and Sensory Properties. *Journal of Food Science*, 77(2): 189-197.
- Rodríguez-García, J.; Sahi, S.S.; Hernando, I. 2014a. Optimizing Mixing during the Sponge Cake Manufacturing Process. *Cereal Foods World*, 59(6): 287-292.
- Rodríguez-García, J.; Salvador, A.; Hernando, I. 2014b. Replacing Fat and Sugar with Inulin in Cakes: Bubble Size Distribution, Physical and Sensory Properties. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4): 964-974.
- Rodríguez-García, Hernando, I. 2014c. Reformulacion de productos horneados para disminuir el contenido en grasa y azúcar mediante sustitución con inulina. Efectos sobre la estructura y propiedades físicas. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Valencia.
- Román, L.; Santos, I.; Martínez, M.; Gómez, M. 2015. Effect of extruded wheat flour as a fat replacer on batter characteristics and cake quality. *Journal of Food Science and Technology* 1-8. 19
- Smith, F.; Pan, X.; Bellido, V.; Toole, G. A.; Gates F. K.; Wickhm, M.S.J.; Shewri, P. R.; Bakalis, S.; Padfield. 2015. Digestibility of gluten Proteins is reduced by baking and enhanced by starch digestion. *Mol. Nutr. Food Res.*, 59: 2034-2043.
- Soong, Y. Y.; Tan, S. P.; Leong, L. P.; Henry, J. K.; (2014). Total antioxidant capacity and starch digestibility of muffins baked with rice, wheat, oat, corn and barley flour. *Food Chemistry* 164: 462–469
- Zahn, S.; Pepke, F.; Rohm, H. 2010. Effect of inulin as a fat replacer on texture and sensory properties of muffins. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(12): 2531-2537.