

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE IMAGEN BASADA EN EL ANÁLISIS DE PATRONES LÁSER PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE FIBRA A GALLETAS

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNO: Carlos López Valmaña

TUTOR: Raúl Grau Meló

DIRECTOR EXPERIMENTAL: Samuel Verdú Amat

CURSO ACADÉMICO: 2019-2020

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE IMAGEN BASADA EN EL ANÁLISIS DE PATRONES LASER PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE FIBRA A GALLETAS

RESUMEN

El presente trabajo se ha centrado en estudiar y modelizar las propiedades sensoriales y fisicoquímicas de galletas enriquecidas en fibra mediante la técnica no destructiva de análisis de imágenes de patrones láser de difracción.

Para tal fin se desarrollaron cuatro formulaciones de muestras; una muestra control con un 0% de enriquecimiento en fibra y otras tres con diferentes niveles de enriquecimiento (5%, 10% y 20%). Con el propósito de caracterizar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales se llevaron a cabo análisis de textura, espesor, área, incremento de masa, densidad y flujo de solventes (agua y leche entera). Para el análisis sensorial se evaluó el color, aroma, apariencia, sabor, textura en boca, y apreciación global. En el análisis de imagen se recopiló información de la interacción del láser con las matrices durante varias etapas de la cadena de producción de galletas: antes de la fase de horneado (masas) y después del horneado. La información se obtuvo a partir de los descriptores de imagen generados procedentes de la morfología de los patrones láser obtenidos.

Los resultados mostraron como ambas matrices estudiadas ofrecían información diferente pero totalmente complementaria. Se recogió información aislando la varianza producida por el enriquecimiento en fibra para las masas, y la información de la varianza generada por el tratamiento térmico para las galletas. Al combinar los dos bloques de información se mejoró la predicción cuantitativa tanto de las propiedades fisicoquímicas como de las propiedades sensoriales de las galletas. El impacto del enriquecimiento en fibra pudo ser modelado mediante esta técnica de imagen, que podría establecer una base para el desarrollo de nuevas técnicas no destructivas para los controles y las inspecciones que se realizan durante la producción de galletas. Estas nuevas técnicas no destructivas podrían ofrecer información rápida sobre los parámetros fisicoquímicos y sensoriales, así como de posibles cambios en las matrices producidos por los diferentes procesos de la cadena productiva.

PALABRAS CLAVE: galletas, fibra, análisis de imagen, difracción láser, técnica no destructiva.

AUTOR: López Valmaña, Carlos

TUTOR ACADÉMICO: Grau Meló, Raúl

DIRECTOR EXPERIMENTAL: Verdú Amat, Samuel

APPLICATION OF THE IMAGE TECHNIQUE BASED ON THE ANALYSIS OF LASER PATTERNS FOR THE CHARACTERIZATION OF THE EFFECT OF THE INCORPORATION OF FIBER TO COOKIES

ABSTRACT

The present work has focused on studying and modelling the sensory and physicochemical properties of fibre-enriched biscuits through the non-destructive technique of image analysis of diffraction laser patterns.

Four sample formulations were developed; one control sample with 0% fiber enrichment and three others with different levels of enrichment (5%, 10% and 20%). In order to characterize the physicochemical and sensory properties, analyses of texture, thickness, area, mass increase, density and flow of solvents (water and whole milk) were carried out. For the sensory analysis, colour, odour, appearance, flavor, mouth texture, and global acceptability were evaluated. In the image analysis, information was collected on the interaction of the laser with the matrices during various stages of the biscuit production chain: before the baking phase (doughs) and after the baking. The information was obtained from the image descriptors generated from the morphology of the laser patterns obtained.

The results showed how both matrices studied offered different but totally complementary information. Information was collected by isolating the variance produced by fiber enrichment for doughs, and the variance information generated by heat treatment for biscuits. Combining the two blocks of information, the quantitative prediction of both the physicochemical and the sensory properties of the cookies was improved. The impact of fiber enrichment could be modeled using this imaging technique, which could establish a basis for the development of new non-destructive techniques for controls and inspections during biscuit production. These new non-destructive techniques could provide rapid information on physicochemical and sensory parameters, as well as possible changes in the matrices produced by the different processes in the production chain.

KEY WORDS: cookies, fiber, image analysis, laser diffraction, non-destructive technique.

AUTHOR: López Valmaña, Carlos

ACADEMIC TUTOR: Grau Meló, Raúl

EXPERIMENTAL DIRECTOR: Verdú Amat, Samuel

VALENCIA, junio 2020

Índice de contenidos	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	2
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	3
3.2 MATERIAS PRIMAS	4
3.3 PROCESO DE ELABORACIÓN.....	5
3.4 PROPIEDADES FÍSICAS	5
3.4.1 Análisis de textura	5
3.4.2 Análisis de área, grosor y densidad	5
3.4.3 Variación de masa	6
3.4.4 Estudio difusión de solventes.....	6
3.4.5 Análisis sensorial	6
3.4.6 Análisis de imagen y extracción de descriptores	6
3.4.7 Análisis estadístico	8
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	9
4.1 ANÁLISIS DE TEXTURA.....	9
4.2 VARIACIÓN DE MASA, ANÁLISIS DE ÁREA, GROSOR Y DENSIDAD	10
4.3 ESTUDIO DIFUSIÓN DE SOLVENTES.....	10
4.4 ANÁLISIS SENSORIAL	13
4.5 ANÁLISIS DE IMAGEN Y EXTRACCIÓN DE DESCRIPTORES	14
4.6 ANÁLISIS MULTIVARIANTE	16
4.7 ESTUDIO DE REGRESIÓN Y MODELIZADO	18
5. CONCLUSIONES	20
6. BIBLIOGRAFÍA.....	20

Índice de tablas	Página
Tabla 1 Valores de fuerza máxima para las diferentes formulaciones de las galletas.	9
Tabla 2 Resultados de los estudios de variación de masa, área, espesor y densidad llevados a cabo en las diferentes formulaciones.	10
Tabla 3 Valores de difusión para agua y leche expresados como flujo para $t= 5$ y 10 segundos.	12

Tabla 4	Puntuaciones medias obtenidas para cada uno de los parámetros evaluados tras el análisis sensorial de las galletas.	13
Tabla 5	Valores de las diferentes variables utilizadas para el estudio de regresión y modelizado. Δ Área: incremento de área; ρ : densidad; Ja: flujo de agua a los 5 y 10 segundos; Jl: flujo de leche a los 5 y 10 segundos; PC1: corresponde a los valores del PCA de la figura 9-A; ECM: error cuadrático medio de predicción.	19

Índice de figuras		Página
Figura 1	Procedimiento experimental	4
Figura 2	Disposición del sistema de captura de imagen.	7
Figura 3	Morfología del patrón del láser capturado para una muestra de galleta y zonas de los descriptores directos que componen el patrón.	8
Figura 4	Valores de difusión de las diferentes formulaciones a lo largo del tiempo, utilizando agua como fluido para la realización del experimento. Negro: control; Rojo: 5%; Verde: 10%; Gris: 20%	11
Figura 5	Valores de difusión de las diferentes formulaciones a lo largo del tiempo, utilizando leche como fluido para la realización del experimento. Negro: control; Rojo: 5%; Verde: 10%; Gris: 20%	12
Figura 6	Morfología de los patrones de difracción para una muestra AB de cada nivel de sustitución.	14
Figura 7	Relación entre la transmitancia (ψ) y descriptores relativos: A/ψ (cuadrados rellenos), A_s/ψ (cuadrados vacíos), B/ψ (círculos rellenos), A_m/ψ (círculos vacíos) para las muestras control (negro), 5% (rojo), 10% (verde) y 20% (gris)	15
Figura 8	Diagrama de variación total de ψ para el enriquecimiento en fibra y el horneado en las muestras AB	16
Figura 9	Análisis de componentes principales de los datos fisicoquímicos/sensoriales (A) y los datos de los descriptores de imagen de la matriz antes del horneado (BB) (B) y de la matriz después del horneado (AB) (C). Los valores de PCA se representan como media y desviaciones estándar (barras): Negro: control; Rojo: 5%; Verde: 10%; Gris: 20%; Amarillo: variables.	17
Figura 10	Coeficientes de predicción (R^2) para las variables fisicoquímicas y sensoriales usando la información de imagen de las matrices antes de hornear (BB), después de hornear (AB) y ambas combinadas (BB+AB). Barras negras corresponden a matrices BB, blancas a matrices AB y barras grises a combinación de ambas (BB+AB)	19

1. INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria siempre ha ido evolucionando en función de las tendencias de consumo. Debido al elevado ritmo de vida y a los horarios laborales, generalmente se reduce notablemente el tiempo dedicado a la cocina. Es por eso que cada vez más el consumidor busca alimentos fáciles de preparar o snacks saludables fáciles de consumir. En consecuencia, cada vez más, las empresas buscan desarrollar alimentos saludables y fácilmente consumibles.

En este sentido, las galletas son unos de los alimentos con más presencia en todo el mundo debido a un proceso de elaboración sencillo y la existencia de una gran variedad de clases de este tipo de alimento. Además, es un producto que se encuentra fácilmente disponible en todo el mundo. Según el Real Decreto 1124/1982, las galletas son productos alimenticios elaborados, fundamentalmente por una mezcla de harina, grasas comestibles y agua, adicionada o no de azúcares y otros productos alimenticios o alimentarios (aditivos, aromas, condimentos, especias, etc.), sometida a proceso de amasado y posterior tratamiento térmico, dando lugar a un producto de presentación muy variada, caracterizado por su bajo contenido en agua. Hoy en día, con el avance de la tecnología en la industria alimentaria, las empresas desarrollan y ofrecen multitud de variedades de galletas en el mercado tanto en sabores como en formas.

A raíz de la constante evolución de la industria alimentaria, se han ido mejorando y optimizando procesos tradicionales y también procesos modernos ya existentes en la industria de la alimentación. Esto ha generado el desarrollo de procedimientos y nuevas técnicas para llevar a cabo un control más eficiente con el fin de asegurar el cumplimiento de las normas de calidad y seguridad alimentaria. Este nuevo desarrollo de procesos lleva implícito la reducción y optimización de recursos como pueden ser tiempos de operación, costes de energía y desperdicio de productos. En general, las principales mejoras introducidas en el ámbito de la inspección y el control se han basado en la sustitución de dispositivos y técnicas obsoletas o antiguas y la modificación de componentes de equipos. La modificación y adaptación de nuevos métodos, de técnicas analíticas y procedimientos de control en los procesos de producción podrían dar lugar a importantes mejoras sin necesidad de incrementar costes económicos y de tiempo (Abdul Halim Lim et al., 2015; Lim y Antony, 2016).

Una de las principales tendencias en este enfoque es la rapidez a la hora de obtener datos e información en tiempo real de lo que sucede en las operaciones de la cadena productiva, así como el uso de una o varias técnicas al mismo tiempo. Esta obtención y recopilación de información puede usarse para obtener y generar una base de datos de toda la cadena de producción. Esta información de cada proceso, operación y producto, se puede procesar y combinar para desarrollar una visión global, de forma que se puede tener un mayor conocimiento sobre todo lo que pasa en la planta de producción mediante el uso de herramientas o aplicaciones de autoaprendizaje. Además, esta recopilación de información permite mejorar en la toma de decisiones sobre las posibles modificaciones que pueden ser necesarias realizar en un momento determinado.

La tendencia en este campo de investigación es la de crear nuevos dispositivos o técnicas que operen de manera no destructiva (Chen et al., 2013; Ropodi et al., 2016). Esto implica el uso de principios fisicoquímicos para la obtención de los datos, pero tratando de evitar el contacto con los productos alimenticios. En la industria alimentaria estos desarrollos no solo están enfocados a la optimización de recursos sino también en lograr avances en los campos de la calidad y seguridad alimentaria, desde la recepción de materias primas hasta el almacenamiento del producto final (Arendse et al., 2018).

Algunas de las técnicas utilizadas para este fin son la espectroscopia de luz, ultrasonidos, análisis de imágenes, e incluso combinaciones de todas ellas (Barbin et al., 2015; Fuentes et al., 2017; Sendin et al., 2017; Shi et al., 2018; Verdú et al., 2016; Wu et al., 2014; Xie et al., 2017; Yang et al., 2018). En el caso concreto del procesado de galletas, algunos métodos o técnicas no destructivas son la detección de cuerpos extraños mediante el procesado de imágenes infrarrojas (Senni et al., 2014), el estudio de la estructura y el desarrollo del pardeamiento no enzimático usando imágenes (Leiva-Valenzuela et al., 2018), la detección de defectos mediante la inspección de grietas por imágenes (Nashata et al., 2014), etc.

El desarrollo y aplicabilidad de estas técnicas están condicionadas por las características fisicoquímicas de la matriz del alimento seleccionado, así como de las posibles transformaciones que sufren durante una determinada fase u operación. La estructura y composición de un alimento delimita la aplicabilidad de cada técnica a la hora de medir una determinada característica y condiciona el sistema de medida.

En relación con lo anterior, las técnicas de imagen de difracción de luz láser encajan con este enfoque ya que habitualmente las matrices de alimentos suelen ser semitransparentes u opacas y permiten el paso de la luz en longitudes de onda específicas (Mireei et al., 2010). La luz del láser se transmite a través de la superficie y se va dispersando entre la estructura y componentes internos del producto. Una parte importante de esa luz es reflejada por los componentes internos del alimento y se dispersa hacia la superficie. Mientras se da este proceso, la luz que se ha transmitido puede proporcionar cierta información sobre la morfología del producto, esto es posible debido a la interacción entre los fotones dispersados y los componentes internos (Mollazade et al., 2013). Por tanto, las propiedades de absorción y dispersión de la luz se pueden utilizar para estudiar las propiedades de una matriz alimenticia específica (Mireei et al., 2010).

Esta técnica ha sido aplicada con éxito en la inspección de frutas con el fin de controlar los posibles daños por frío en plátanos (Hashim et al., 2013), las propiedades de la papaya, el proceso de secado del plátano (Romano et al., 2010; Udomkun et al., 2014) y para el control de humedad, sólidos solubles y dureza del tejido de la manzana (Romano et al., 2011). El denominador común de estas aplicaciones es que han sido aplicadas en matrices sólidas para la determinación de variables, lo que implica grandes cambios morfológicos como lo son los cambios de fase, ausencia o presencia de semillas, daños en tejidos, etc. Los resultados indican que estas técnicas podrían llegar a ser útiles en procesos en los que el secado y los cambios de fase son las principales transformaciones en la obtención de nuevos productos, como por ejemplo en el caso de productos derivados de la industria del cereal. Estos nuevos productos son modificados continuamente debido a la introducción de nuevos ingredientes, lo que produce cambios o modificaciones tanto en la calidad como en las propiedades de los productos finales, siendo estos cambios posteriormente objeto de control. Uno de los principales productos que derivan de los cereales son las galletas. En este tipo de productos, una de las características que más se modifica es su contenido en fibra con el fin de hacerlas más saludables. Cada vez de forma más frecuente se ponen en el mercado muchas galletas con diferentes tipos de fibra, que deben mantener sus características sensoriales y de calidad para ser aceptadas y adquiridas por parte de los consumidores.

2. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es mediante la técnica no destructiva de análisis de imágenes de patrones de difracción láser estudiar y desarrollar modelos de predicción del efecto que

genera la incorporación de fibra sobre las propiedades sensoriales y fisicoquímicas de las galletas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de obtener para la realización del estudio cuatro muestras con diferentes niveles de fibra, en la primera fase del experimento se prepararon tres tipos diferentes de harinas, con unos niveles de sustitución de harina de trigo por subproducto, procedente del proceso de elaboración de la horchata, del 5, 10 y 20%. De esta forma se obtuvieron cuatro mezclas de harina diferentes; control (0%) y las tres con sustitución del 5%, 10%, 20%.

En la segunda fase de la experiencia, se procesaron las masas las cuales se caracterizaron por imagen, capturando los patrones de difracción del láser para extraer descriptores de imagen de la matriz de las masas antes de ser horneadas (BB).

En la tercera fase, a partir de las masas, se realizó el formado de las galletas y se hornearon. Una vez finalizado el proceso de horneado (fase 4), estas fueron analizadas por imágenes a través de los patrones de difracción del láser, extrayéndose los descriptores de imagen de la matriz del alimento después del horneado (AB). Paralelamente se realizaron estudios fisicoquímicos y sensoriales de las galletas con la finalidad de conocer las propiedades de los cuatro tipos de muestras. El número de muestras analizadas fue de 60, tres lotes de 20 para cada nivel de sustitución.

En la cuarta fase se realizó una comparativa entre la caracterización de los datos fisicoquímicos y los datos de imagen de las matrices BB y AB. Por último, se hizo un estudio de dependencia de los datos fisicoquímicos y sensoriales y los datos de imagen mediante un estudio de regresión. En la Figura 1 se muestra el procedimiento seguido para la realización del experimento.

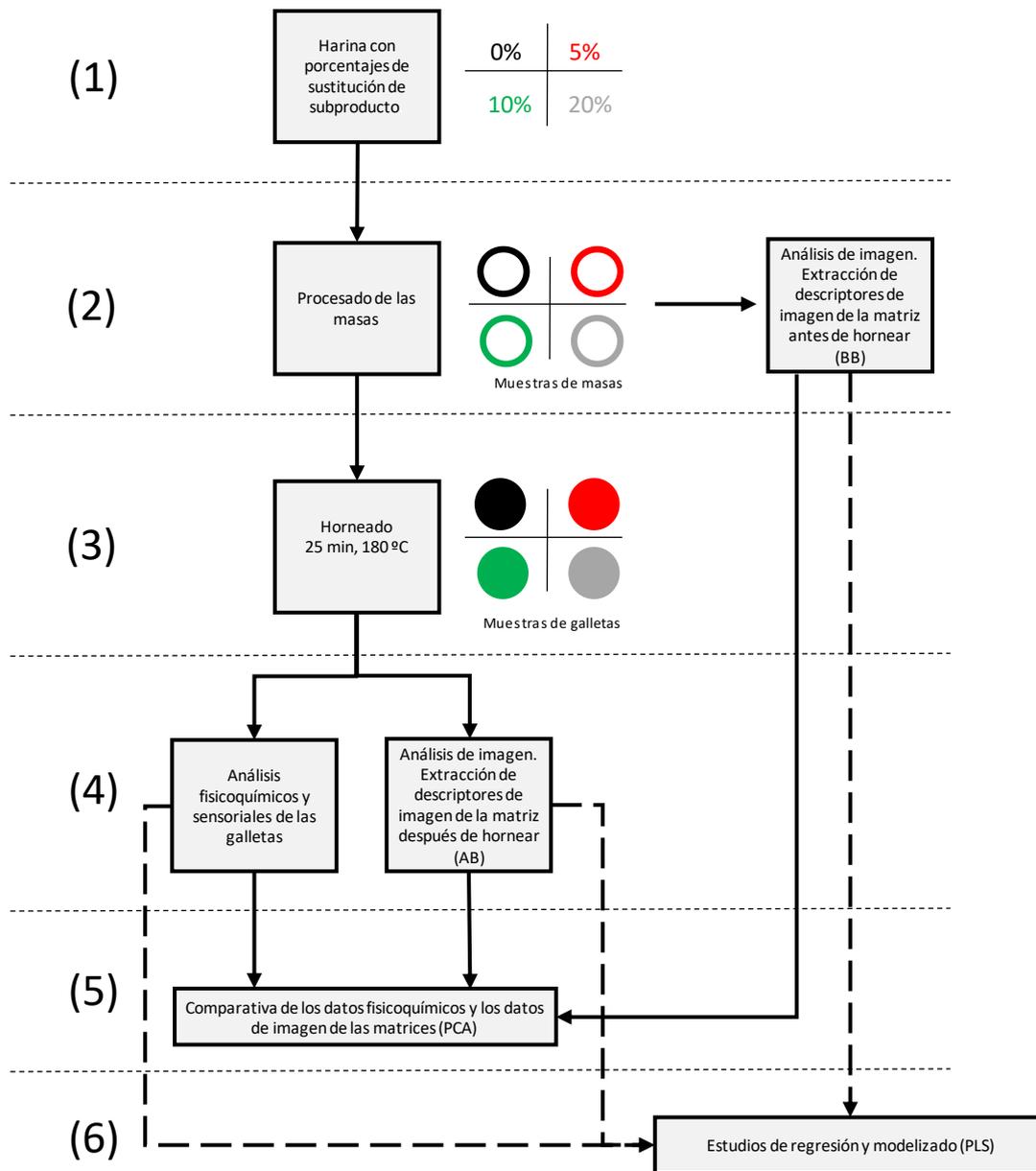


Figura 1. Procedimiento experimental.

3.2 MATERIAS PRIMAS

Las galletas fueron obtenidas mezclando harina de trigo con harina procedente del subproducto derivado de la producción de horchata de chufa en diferentes niveles de sustitución, 5%, 10% y 20% p/p en base seca de harina de trigo. Estos niveles de sustitución se seleccionaron en conformidad con el Reglamento (CE) N° 1924/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo Europeo. Este reglamento indica los parámetros para “alimentos fuente de fibra” que requieren 3 g de fibra por cada 100 g de producto y “alimentos de alto contenido en fibra” que requieren 6 g de fibra por cada 100 g de producto. De esta manera la fórmula sustituida en un 5% se ajustaba con la primera denominación de alimentos que son fuente de fibra y la fórmula sustituida en un 10% se ajusta a la denominación de alimentos de alto contenido en fibra. Además, se incluyó una fórmula con un porcentaje de sustitución del 20% para evaluar la viabilidad de incorporar una mayor cantidad de fibra en el procesado. La harina de trigo utilizada

se obtuvo de un productor local (Molí del Picó-Harinas Segura S.L. Valencia, España), cuya composición química era: $14,7 \pm 0,6\%$ de proteínas, $1,1 \pm 0,03\%$ de grasa, $14,5 \pm 0,5\%$ de agua, y $0,32 \pm 0,1$ de ceniza. Los parámetros alveográficos fueron: $P=94 \pm 2$ (presión máxima (mm)), $L=128 \pm 5$ (extensibilidad (mm)), $W=392 \pm 11$ (fuerza (J-4)) y 0,73 de P/L. Tanto la composición química como la de los parámetros alveográficos fueron facilitados por la empresa.

El subproducto de la elaboración de la horchata de chufa se obtuvo de una planta de producción local. Este subproducto tenía una apariencia de harina fibrosa húmeda. Esta harina se secó hasta el 14% de humedad para posteriormente ser molida en un molino de acero inoxidable (Retsch GmbH, ZM 200, Haan, Alemania) hasta obtener un tamaño medio de partículas analizadas (D [4, 3]) de $271,1 \pm 8,1 \mu\text{m}$. Finalmente la composición aproximada de esta harina fue la siguiente: $1,9 \pm 0,7\%$ de proteínas, $13,3 \pm 0,1\%$ de grasa, $14,1 \pm 0,4\%$ de agua, $1,86 \pm 0,1$ de ceniza y $68,2 \pm 0,4\%$ de la fibra dietética total. El azúcar, la levadura y la mantequilla se compraron en un supermercado local. Tanto el tamaño de partículas de la harina de subproducto de la horchata, como su composición, se determinaron en estudios anteriores realizados por el grupo de investigación en el que se ha desarrollado el presente trabajo final de grado.

3.3 PROCESO DE ELABORACIÓN

La formulación de la masa de las galletas fue la siguiente: harina de trigo o harina enriquecida con fibra (52%), azúcar (17,4%), agua (15,5%), mantequilla (14,5%), levadura (0,85%) y sal (0,3%). Utilizando un robot de cocina (Thermomix®, Vorwerk, Alemania), se mezcló la mantequilla, el azúcar y el agua durante 5 minutos a 75 rpm. A continuación, se añadió la harina y la levadura y se mezcló durante otros 5 minutos a 200 rpm. La masa se mantuvo a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24h para hidratar mejor la fracción de fibra. Posteriormente se hicieron galletas de 8 cm de diámetro y 1 cm de grosor con la ayuda de un molde metálico. Las galletas de masa cruda se colocaron en una bandeja de hornear donde se introdujeron en un horno (Mondial Forni,a, Italia Verona, Italia) durante 25 minutos a $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Una vez finalizado el horneado de las galletas, estas se dejaron enfriar a temperatura ambiente ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) durante 1 h antes de ser almacenadas en bolsas de plástico.

3.4 PROPIEDADES FISICAS

3.4.1 Análisis de textura

Para el análisis de textura se determinó la fuerza máxima de ruptura (F_m). Para ello se realizó un ensayo de punción basado en el realizado en Islas-Rubio et al. (2014). La fuerza de rotura de las galletas se determinó mediante un Analizador de textura TA-XT2 (Stable Microsystems, Inglaterra) con un punzón esférico (6,35 mm de diámetro) a una velocidad de prueba de 1 mm/s. El umbral de dureza fue de 1 g y el de distancia de 1 mm. Se realizaron 20 repeticiones de cada tipo de fórmula. Las muestras de cada formula se colocaron debajo del punzón y este penetró en las galletas hasta que produjo la fractura completa de las muestras. Se realizaron punciones tanto en el centro de la galleta como en los bordes.

3.4.2 Análisis de área, grosor y densidad

Para el análisis del área se tomaron, para todas las tandas de cada una de las formulaciones, imágenes de cada galleta con un escáner Canon Lide 120. Una vez se obtuvieron las fotografías, el valor del área se calculó mediante el software de procesado de imagen digital (ImageJ). En cuanto a la determinación del grosor (T_h), se midió 5 veces en diferentes lugares de cada galleta utilizando un calibre Vernier para la obtención de los valores de espesor de cada galleta en las diferentes formulaciones. La densidad de las galletas (ρ) se calculó de acuerdo con el peso y el volumen medido (calculado a partir del área y el grosor).

3.4.3 Variación de masa

Una vez horneadas las galletas, estas permanecieron durante 30 minutos en el laboratorio a temperatura ambiente. Posteriormente fueron pesadas para determinar la pérdida de masa durante el horneado. Los valores de pérdida de masa se obtuvieron de acuerdo a la ecuación (1)

$$\Delta M = \frac{m_f - m_0}{m_0} * 100 \quad (1)$$

Donde ΔM es el incremento de masa en %, m_f es la masa después del horneado y m_0 es la masa inicial de la galleta antes de ser horneada.

3.4.4 Estudio difusión de solventes

Para la realización de este experimento se utilizaron dos fluidos; agua y leche entera. El fundamento del ensayo consistía en la absorción de masa de fluido por parte de la matriz de la galleta mientras estas estaban sumergidas en los diferentes fluidos. Este ensayo se realizó siguiendo el ensayo de Verdú et al. (2017). Este ensayo se basó en la inmersión total de las galletas cuya superficie y masa eran conocidas. Las galletas estaban fijadas con unas pinzas de punta fina a un soporte universal, sumergiéndose enteras en un vaso situado encima de una balanza de precisión (FV120, Anapesing, España). Se registró la absorción de masa en intervalos de 5 segundos durante 60 segundos. La difusión se calculó como flujo (J) usando la ecuación (2)

$$J = \frac{g}{(A \cdot 2) \cdot s} \quad (2)$$

Siendo J el flujo del disolvente en la matriz en gramos por cm^2 y segundo, g los gramos de fluido absorbidos por la galleta, A el área de la galleta en cm^2 multiplicada por dos por las dos caras de la muestra que están en contacto con el fluido y s es el tiempo en segundos.

3.4.5 Análisis sensorial

Con el fin de evaluar el efecto de la incorporación del subproducto sobre las propiedades sensoriales de las galletas se realizó una cata mediante un panel de 50 catadores no entrenados que evaluaron las cuatro formulaciones. Los catadores evaluaron el color, aroma, apariencia, sabor, textura en boca y la apreciación global. Se utilizó un cuestionario, basado en líneas de 10 cm donde se representaron los puntos de referencia (0=desagradable, 5=aceptable, y 10=desagradable) para cada atributo. Cada evaluador evaluó cuatro muestras servidas a temperatura ambiente, y codificadas con un código numérico de 3 dígitos al azar. Las muestras eran galletas enteras.

3.4.6 Análisis de imagen y extracción de descriptores

El estudio se basó en capturar los patrones que generaba la difracción del láser sobre las muestras de masa y la superficie de las galletas como consecuencia de la luz que se transmite desde la parte inferior de la muestra. Para la captura de los patrones se utilizó un dispositivo formado por una cámara (HD cam C615) y un diodo láser (650 nm, 50mW, 3mm \varnothing). La cámara fue colocada dentro de una cabina oscura para evitar la entrada de luz exterior y situada verticalmente a unos 15 cm encima de la superficie de la muestra. El diodo láser se colocó de forma perpendicular a 20 cm por debajo de las muestras. Esta disposición fue similar a la descrita en Verdú et al. (2019). En la Figura 2 se muestra un esquema de la disposición. La cámara capturó las imágenes RGB de los patrones de difracción generados por la luz del láser de tres lotes de 20 muestras de cada nivel de sustitución de fibra.

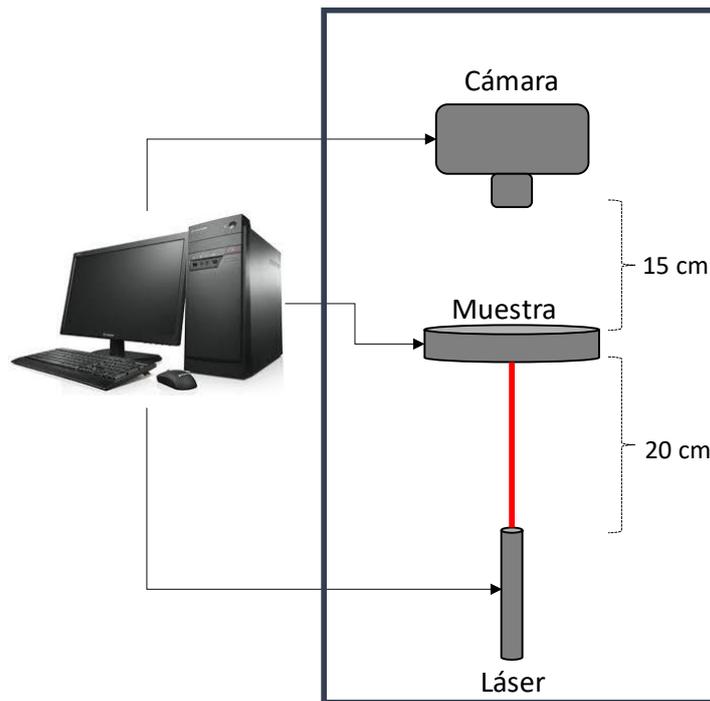


Figura 2. Disposición del sistema de captura de imagen.

Los descriptores de imagen se extrajeron siguiendo las siguientes etapas: en primer lugar, las imágenes fueron convertidas en imágenes con escala de grises (8 bits, 255 valores de gris). A continuación, la fracción de área de cada imagen que no correspondía con la muestra se eliminó para evitar reflejos que pudiesen generar datos anómalos. Por último, se segmentaron las diferentes zonas en función de la morfología del patrón láser. Estas fueron delimitadas por diferentes valores de grises y medidas en número de píxeles. En la Figura 3 se muestra una captura del patrón láser. Las imágenes mostraron un patrón clásico de difracción, donde se generó un pico máximo de intensidad en el medio, conocido como disco de Airy, con anillos concéntricos donde el tamaño de estos va aumentando a medida que su intensidad disminuye. Estos anillos se conocen como interferencias constructivas y destructivas. Este patrón siguió propiedades similares vistas en otros estudios, donde se usó esta técnica para estudiar diferentes matrices de alimentos (Adebayo et al., 2016; Mollazadeet al., 2013; Verdú et al., 2019). Los descriptores de imagen desarrollados fueron delimitados de esta morfología visual y se dividieron en dos grupos (directos y relativos) según su procedimiento de extracción. El grupo de descriptores directos representan valores absolutos de las áreas de los patrones de láser de las zonas de color. Estos descriptores se encuentran reflejados en la Figura 3 y se definen de la siguiente manera:

- Ψ : recoge el área de los píxeles correspondientes al patrón de luz entero, delimitado dentro de 45-255 valores de grises.
- A : engloba el área de los píxeles correspondiente a la zona con el color más claro de Ψ , delimitada entre los 115-255 valores de grises.
- B : recoge el área de píxeles correspondiente al color más oscuro de la zona de Ψ , delimitada entre 45-114 valores de grises.
- A_s (*A-saturado*): recoge la fracción de píxeles de A que se corresponden con la luz saturada, píxeles con 255 de valores de grises.

- A_m (A-mínimo): recoge el área no saturada de A, delimitada entre 115-254 valores de gris.

La ecuación (3) engloba el sistema de descriptores directos:

$$\Psi = A + B = (A_s + A_m) + B \quad (3)$$

Su interpretación óptica sería la de la luz total transmitida a través de la matriz de masa o galleta (Ψ), la luz transmitida mínimamente alterada para A_s , mientras que A_m y B representan indicadores de la cantidad de luz dispersa.

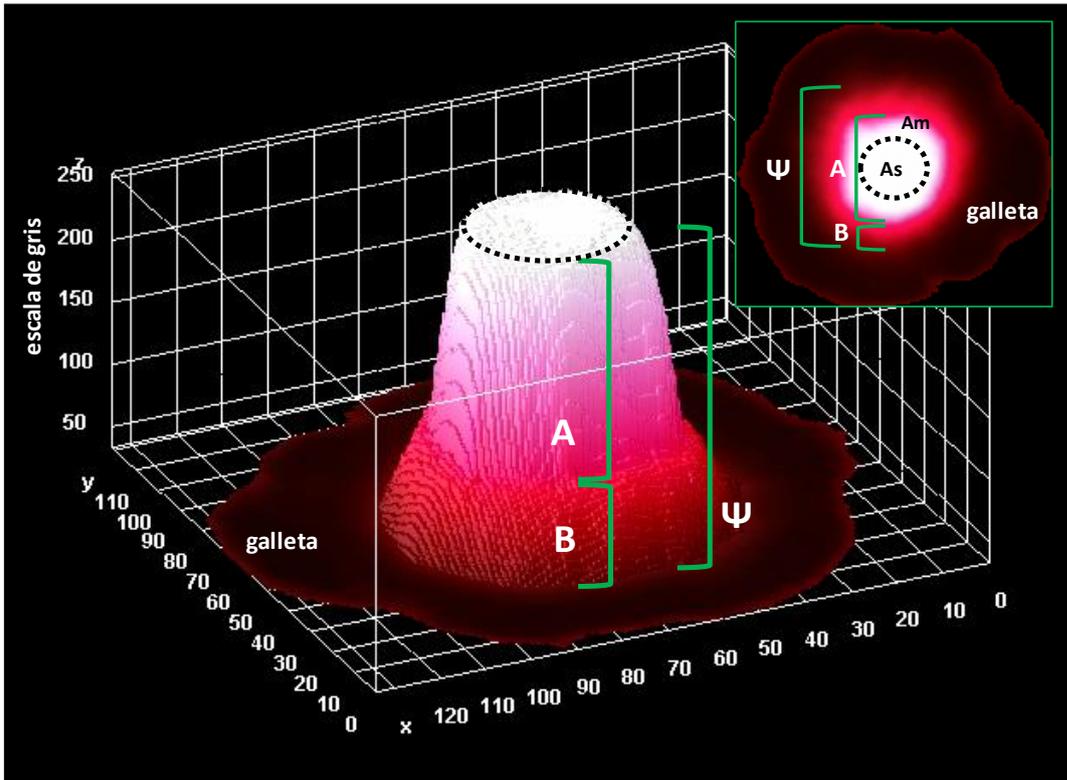


Figura 3. Morfología del patrón del láser capturado para una muestra de galleta y zonas de los descriptores directos que componen el patrón.

El grupo de descriptores relativos representa la relación entre los descriptores directos. Estos descriptores relativos se obtuvieron calculando todos los posibles ratios entre ellos. Los ratios fueron los siguientes: A/Ψ ; B/Ψ ; A_s/Ψ ; A_m/Ψ ; B/A ; A_s/A ; A_m/A ; B/A_s ; A_s/A_m ; B/A_m . Los datos de imagen se conformaron en una matriz de 15 descriptores (5 directos y 10 indirectos) para las muestras antes del horneado (masas (BB)) y después del horneado (galletas (AB)). Todas las imágenes fueron procesadas con el software de procesamiento FIJI.

3.4.7 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos en los distintos análisis fisicoquímicos y sensoriales fueron procesados estadísticamente mediante el programa informático Statgraphics Centurion XVI.I utilizando un análisis de varianza (ANOVA) y se consideró un $p < 0.005$ estadísticamente significativo para los análisis.

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos a partir de los descriptores de imágenes extraídos, se realizó un análisis multifactorial de componentes principales (PCA) con el fin de reducir la dimensionalidad, comparando la varianza recogida y la agrupación espontánea de las muestras. Se evaluó la dependencia entre los descriptores de imagen de las matrices antes del horneado (BB) y después (AB) y las variables fisicoquímicas y sensoriales de las galletas mediante el método estadístico PLS-R. Este se utilizó para llevar a cabo los modelos de regresión lineal entre ambos bloques de datos, que se evaluaron en base al coeficiente R^2 de predicción, así como el error cuadrático medio (ECM). Para realizar este estudio se usó la herramienta PLS Toolbox 6.3 (Eigenvector Research Inc., Wenatchee, Washington, USA), una extensión en el ambiente computacional (The Mathworks, Natick, Massachusetts, USA).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DE TEXTURA

La textura de los alimentos está relacionada con aspectos físicos y reológicos, y con sensaciones percibidas en el momento de la ingesta del alimento, como la ruptura del mismo durante la masticación en boca. Esto significa que es un parámetro de calidad interesante para su evaluación. Esta se puede evaluar mediante el ensayo de punción que mide la fuerza requerida para hacer penetrar un punzón en un alimento hasta alcanzar el umbral de fluencia o el punto de ruptura del mismo. (Chiralt et al., 2007).

El análisis estadístico mediante ANOVA multifactorial mostró que ninguno de los factores (concentración y zona de punción) tiene un efecto estadístico significativo sobre la variable fuerza de ruptura, como se puede observar en la Tabla 2. Por tanto, el hecho de sustituir hasta un 20% de harina de trigo por subproducto de chufa no afecta o influye en la textura o dureza de la galleta. Sin embargo, esto contrasta con otros estudios (Sudha et al., 2007) donde se muestra como a medida que se sustituye un mayor porcentaje de fibra, aumenta la dureza. Algunas posibles causas de que en el presente estudio no se hayan observado diferencias significativas en la dureza de las distintas formulaciones puede haberse debido a la interrupción de la continuidad de la red de gluten en la matriz del alimento como consecuencia del aumento en fibra, produciendo así una menor resistencia a la ruptura. La utilización de harina de trigo de gran fuerza en la elaboración y el hecho de que, el azúcar, sea el segundo componente mayoritario de las distintas formulaciones, puede haber influido en la firmeza de las galletas. Pero también otros parámetros como el dulzor, el color o la apariencia pueden haberse visto afectados (Rodríguez y Hernando, 2014).

Tabla 1. Valores de fuerza máxima para las diferentes formulaciones de las galletas.

FORMULACIÓN	Fm (N)
CONTROL	58,18 ± 18,25a
CONTROL BORDE	62,31 ± 7,88a
5%	55,26 ± 12,36a
5% BORDE	56,44 ± 7,33a
10%	56,26 ± 7,95a
10% BORDE	56,56 ± 9,60a
20%	61,15 ± 5,48a
20% BORDE	62,83 ± 10,86a

4.2 VARIACIÓN DE MASA, ANÁLISIS DE ÁREA, GROSOR Y DENSIDAD

En el presente trabajo se ha medido la variación de masa (ΔM) durante el horneado. Esta variación de peso se produce como consecuencia de la evaporación de agua durante el horneado. Es interesante registrar la variación de masa con la finalidad de evaluar si la incorporación de subproducto de chufa a las galletas tiene alguna relación en la pérdida o ganancia de peso del producto acabado. Tal y como se muestra en la Tabla 2, no se observan diferencias significativas entre las diferentes formulaciones. En cambio, otros estudios (Estepa et al., 2016) han revelado, usando el mismo tipo de subproducto para la elaboración de snacks, como la muestra control sufre claramente una menor variación de masa que las sustituidas, las cuales también tuvieron una pérdida de peso. Esto pudo ser debido a la diferencia en la formulación y la tipología de matriz alimentaria con respecto al presente trabajo.

Sin embargo, si se observaron cambios en las dimensiones de las galletas para el área, sufriendo mayores retracciones las muestras sustituidas parcialmente (Tabla 2). El hecho de que las formulaciones en las que se ha sustituido harina de trigo por subproducto de chufa hayan experimentado una mayor variación de área después del proceso de horneado y enfriamiento, puede ser debido a que contienen menor cantidad de gluten en su matriz. Por el contrario, sería la mayor cantidad de gluten en la matriz de las muestras control lo que generaría una menor variación de área.

El incremento en la reducción del área de las muestras con sustitución parcial reflejaría una mayor compactación de la matriz, lo que estaría afectando a la densidad de las muestras. Es por ello que esta aumentó significativamente con el incremento del nivel de sustitución.

Tabla 2. Resultados de los estudios de variación de masa, área, espesor y densidad llevados a cabo en las diferentes formulaciones.

Parámetros	Control	5%	10%	20%
ΔM (%)	$-21,7 \pm 0,8a$	$-20,9 \pm 0,8a$	$-21,5 \pm 1,0a$	$-21,8 \pm 0,9a$
$\Delta \text{Área}$ (%)	$-20,1 \pm 1,8a$	$-26,36 \pm 2,3b$	$-27,53 \pm 2,4b$	$-25,11 \pm 2,5b$
Th (cm)	$0,9 \pm 0,05a$	$0,94 \pm 0,02a$	$0,92 \pm 0,03a$	$0,88 \pm 0,04a$
ρ (g/cm ²)	$0,6 \pm 0,01a$	$0,63 \pm 0,01b$	$0,69 \pm 0,01c$	$0,72 \pm 0,01d$

4.3 ESTUDIO DIFUSIÓN DE SOLVENTES

En el presente trabajo se ha querido estudiar el comportamiento de las galletas cuando entran en contacto con diferentes fluidos, en este caso leche y agua. Es interesante sobretodo evaluar el comportamiento de este producto con la leche dado que el consumo de leche y galletas está muy relacionado. Lo que se pretendió con la determinación, fue evaluar el efecto que la presencia de fibra puede tener sobre la captación de un líquido por parte de la matriz, teniendo en cuenta las características del fluido.

Para el estudio de la difusividad, en cada una de las diferentes formulaciones, se fueron registrando los valores de difusión cada cinco segundos (figuras 4 y 5). Para la mejor interpretación de los datos obtenidos en la experiencia, se realizó un análisis estadístico de la varianza (ANOVA multifactorial) con un $p < 0,005$. Para ambos fluidos, a medida que aumentó el

porcentaje de sustitución, disminuyó la difusión. Sin embargo, el agua presentó mayor difusión para cualquier nivel de sustitución que la leche. El efecto observado coincide con otros estudios de difusión realizados, como el efectuado en el estudio sobre el efecto de enriquecimiento de fibra en matrices de trigo (Verdú et al., 2017) donde el aumento produce una reducción drástica de la difusión de los solventes, en ese caso el agua y el aceite de girasol.

Cuando se utilizó agua como fluido (figura 4), todas las muestras presentaron diferencias significativas entre ellas durante los primeros 15 segundos. A partir de este punto, paulatinamente las diferencias fueron disminuyendo, si bien en el caso de las muestras con un 10% de sustitución no fueron iguales a las control hasta los 35 segundos y las sustituidas con un 20% hasta el final de la experiencia (60 segundo).

Cuando las muestras se sumergieron en leche (figura 5), se observó cómo durante los primeros diez segundos, todas las formulaciones mostraron diferencias estadísticas con respecto a las control. Estas diferencias fueron disminuyendo hasta los 15, 20 y 25 segundos para las muestras con sustitución del 5%, 10% y 20% respectivamente, en los que significativamente los valores de difusión ya fueron iguales para todas las muestras.

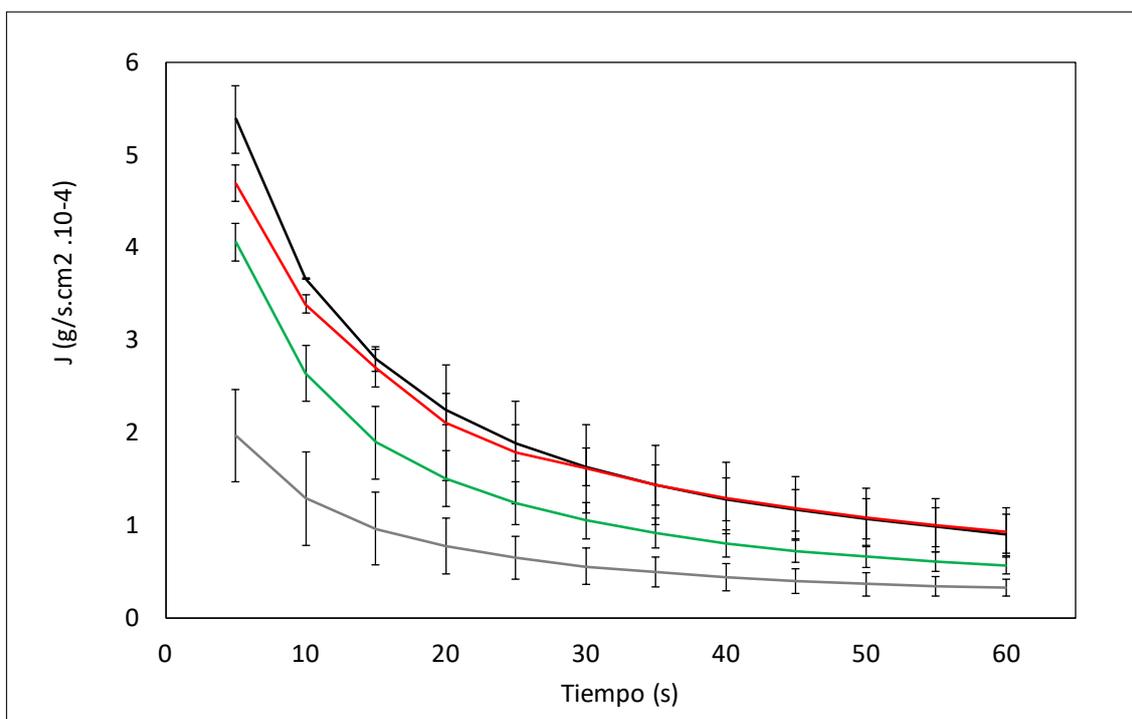


Figura 4. Valores de difusión de las diferentes formulaciones a lo largo del tiempo, utilizando agua como fluido para la realización del experimento. Negro: control; Rojo: 5%; Verde: 10%; Gris: 20%

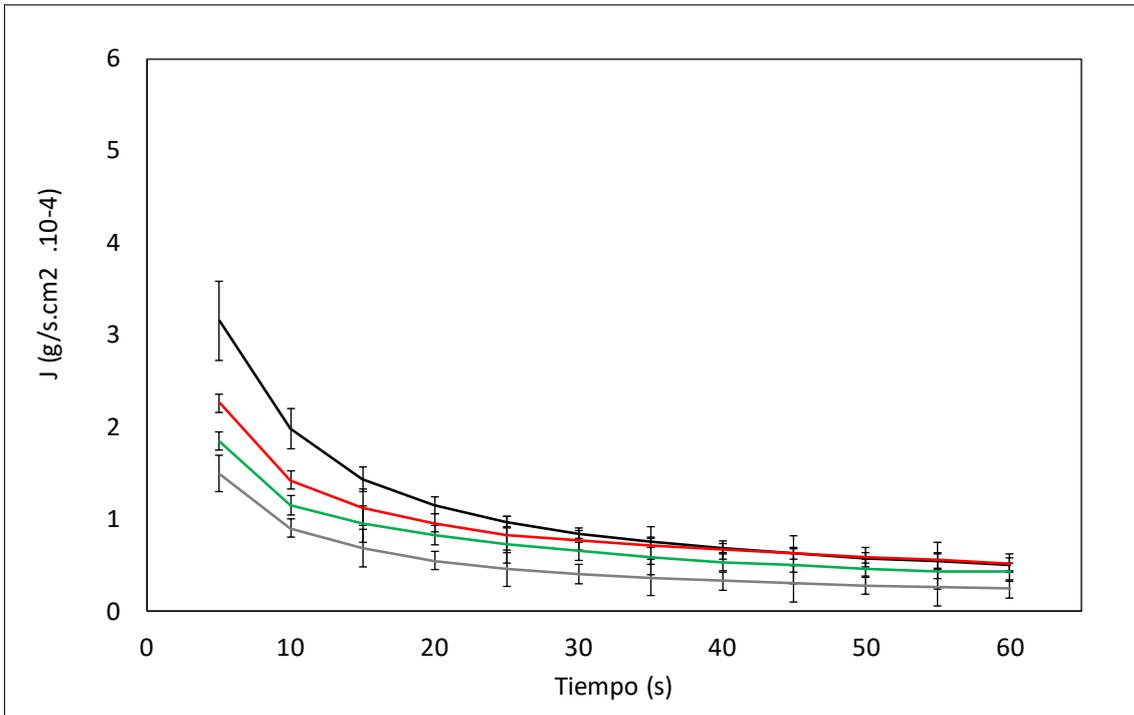


Figura 5. Valores de difusión de las diferentes formulaciones a lo largo del tiempo, utilizando leche como fluido para la realización del experimento. Negro: control; Rojo: 5%; Verde: 10%; Gris: 20%

Comparando los datos a los cinco y diez primeros segundos de estar las muestras sumergidas en agua (J_{a5} y J_{a10}) o en leche (J_{l5} y J_{l10}), que es un intervalo de tiempo que podría ajustarse al tiempo real que un consumidor sumerge el producto antes de comérselo (Tabla 3), se observaron diferencias significativas entre las muestras para cada uno de los fluidos, si bien para los muestras con un 10 y 20% de sustitución, a los 10 segundos de estar sumergidas en leche, estas diferencias desaparecieron.

Tabla 3. Valores de difusión para agua y leche expresados como flujo para $t= 5$ y 10 segundos.

Parámetros	Control	5%	10%	20%
J_{a5} ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 10^{-4}$)	$5,1 \pm 0,18\text{d}$	$4,7 \pm 0,3\text{c}$	$4 \pm 0,8\text{b}$	$1,9 \pm 0,5\text{a}$
J_{a10} ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 10^{-4}$)	$3,3 \pm 0,06\text{d}$	$2,6 \pm 0,12\text{c}$	$0,2 \pm 0,4\text{b}$	$0,1 \pm 0,3\text{a}$
J_{l5} ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 10^{-4}$)	$3,1 \pm 0,4\text{d}$	$2,2 \pm 0,4\text{c}$	$1,8 \pm 0,6\text{b}$	$1,4 \pm 0,8\text{a}$
J_{l10} ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot 10^{-4}$)	$1,9 \pm 0,2\text{c}$	$1,4 \pm 0,1\text{c}$	$1,1 \pm 0,2\text{b}$	$0,9 \pm 0,2\text{a}$

4.4 ANÁLISIS SENSORIAL

El análisis sensorial se llevó a cabo mediante un panel de 50 catadores que evaluaron las galletas de las 4 formulaciones. Los catadores evaluaron seis parámetros: color, aroma, apariencia, sabor, textura y apreciación global. En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos en el análisis sensorial, donde se observan, en verde, los valores de aquellas formulaciones que son significativamente diferentes al control.

Tabla 4. Puntuaciones medias obtenidas para cada uno de los parámetros evaluados tras el análisis sensorial de las galletas.

	CONTROL	5%	10%	20%
COLOR	5,1±1b	5,2±0,9b	5,1±0,5b	3,5±0,4a
AROMA	5,6±0,6a	5,6±0,8a	5,4±0,4a	5,4±0,3a
APARIENCIA	5,1±1b	5,1±1b	5,1±0,9b	3,7±0,2a
SABOR	6,8±0,6c	5,0±0,6b	4,9±0,7b	3,7±0,5a
TEXTURA EN BOCA	7,0±0,4a	6,7±0,2a	6,7±0,4a	6,6±0,6a
APRECIACIÓN GLOBAL	6,8±0,8c	5,2±0,9bc	4,9±0,5b	4,1±0,3a

Como se observa (tabla 4), para el parámetro color, la formulación mejor evaluada por los catadores fue la que contenía un porcentaje de sustitución del 5%, sin embargo, no se observaron diferencias entre la muestra control y las formulaciones con un 5 y 10% de subproducto de chufa. En cambio, la muestra peor evaluada fue la del 20% de sustitución mostrando una diferencia significativa respecto al control. Esto puede ser resultado del grado de sustitución ya que a medida que este aumentaba, las galletas adquirirían un color más oscuro. Este hecho también se vio reflejado en el estudio realizado por Sudha et al., (2017). Por otro lado, el parámetro aroma obtuvo una puntuación similar para todas las formulaciones, no observándose diferencias respecto al control.

Analizando la apariencia de las diferentes formulaciones, la peor valorada fue la de un 20% de sustitución donde se puede observar que la diferencia respecto al control es significativa. En cuanto a las formulaciones con un 5 y 10% de sustitución, no se observaron diferencias con la muestra control.

Para el parámetro sabor, una vez más, se observan diferencias significativas entre el control y la muestra con un contenido en fibra del 20%, si bien también para las formulaciones con un porcentaje de fibra del 5 y 10%. A medida que aumentó el porcentaje de sustitución de harina de trigo por fibra, disminuyó el grado de aceptación por parte del catador. Para el parámetro textura evaluado por el panel de catadores no se observaron diferencias significativas entre formulaciones. Por tanto, el parámetro textura no se vio afectado por el enriquecimiento en fibra. Esto concuerda con el análisis realizado con el texturómetro donde tampoco se apreciaron diferencias entre las cuatro formulaciones.

En cuanto a la apreciación global, la muestra mejor evaluada tras la realización del análisis sensorial fue la muestra control, si bien la sustituida en un 5% no presentó diferencias significativas en esta.

En base a estos resultados, la aportación del subproducto de la chufa al sabor de la galleta es un parámetro muy influyente que debería ser corregido a fin de mejorar la percepción que los catadores tienen de las galletas.

4.5 ANÁLISIS DE IMAGEN Y EXTRACCIÓN DE DESCRIPTORES

Con la finalidad de caracterizar las galletas antes y después del horneado, mediante la técnica de imagen se obtuvieron fotografías de los patrones que generaba la difracción del láser sobre las muestras de masa y la superficie de las galletas. Posteriormente se extrajeron los datos descriptores de imagen de las matrices de las muestras antes de hornear (BB) y después de hornear (AB). En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la morfología de los patrones directos de difracción para una muestra de matriz AB de cada nivel de sustitución.

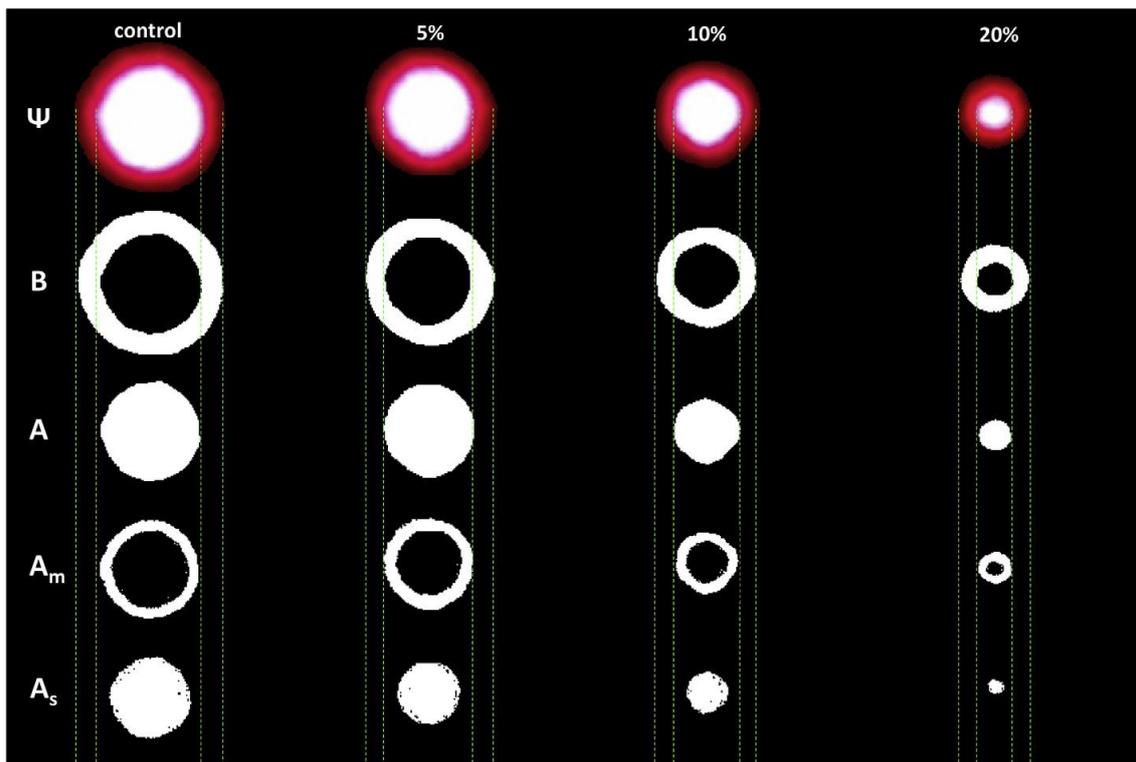


Figura 6. Morfología de los patrones de difracción para una muestra AB de cada nivel de sustitución.

El efecto claramente observado fue la reducción de la luz transmitida (Ψ) a medida que el porcentaje de sustitución o enriquecimiento en fibra aumentaba. El resto de descriptores directos siguieron el mismo comportamiento, siendo la reducción del área de todos los descriptores el denominador común. En cambio, para los descriptores relativos, sus relaciones no se mostraron constantes. En la Figura 7 se muestra el comportamiento de algunos descriptores relativos (A/Ψ , B/Ψ , A_s/Ψ y A_m/Ψ) para las muestras BB (Figura 7 A y B) y AB (Figura 7 C y D). En ella se muestra como la transmitancia (Ψ), la zona con el color más claro de Ψ (A) y A-saturado (A_s) se reducen a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Por el contrario las áreas más oscuras (B) y el área no saturada de A (A_m), que se puede considerar luz dispersa, aumentaba. Este fenómeno mostró diferencias dependiendo del tipo de matriz. La luz transmitida fue mayor para las muestras BB (30,103 píxeles) que para las AB (10,103 píxeles).

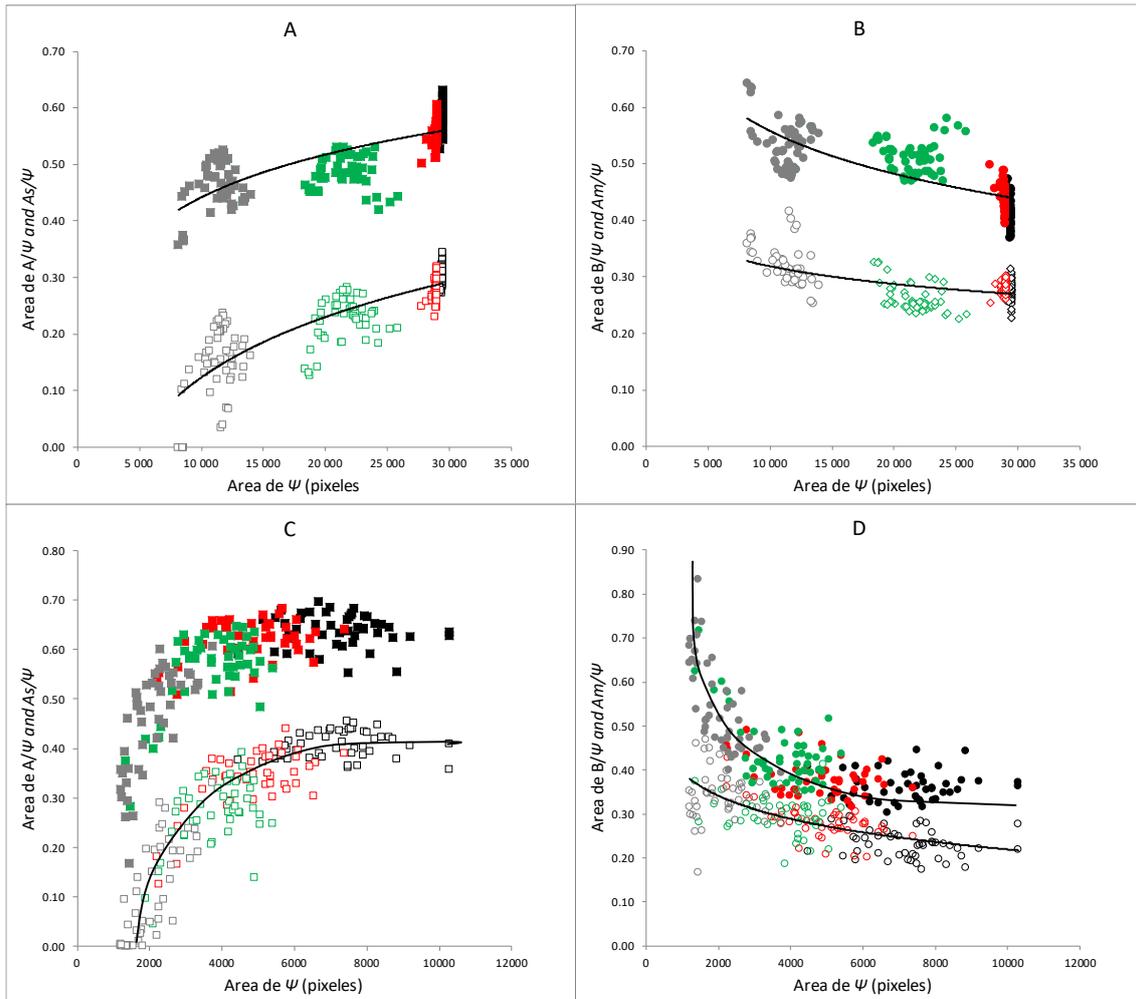


Figura 7. Relación entre la transmitancia (Ψ) y descriptores relativos: A/Ψ (cuadrados rellenos), As/Ψ (cuadrados vacíos), B/Ψ (círculos rellenos), Am/Ψ (círculos vacíos) para las muestras control (negro), 5% (rojo), 10% (verde) y 20% (gris)

La influencia del nivel de sustitución se pudo observar de manera clara en las muestras antes del horneado, donde las diferentes formulaciones se ven claramente separadas a lo largo de la curva, salvo para la muestra control y 5% que, pese a que presentaban distintos valores, no se veían diferenciados claramente. En cuanto a las muestras después del horneado, el efecto descrito no se pudo diferenciar u observar claramente. Esto puede deberse al efecto del horneado que generó cambios en la matriz de las galletas, provocando una mayor dispersión a lo largo de la curva. Las diferencias entre las muestras antes de hornear y después de hornear se produjeron debido a que, en las muestras antes de hornear (BB), la varianza de los descriptores de imagen extraídos únicamente están influenciados por el nivel de sustitución de subproducto, mientras que la varianza de los descriptores extraídos para las muestras después de hornear (AB) están influenciados tanto por el nivel de sustitución de subproducto como por el tratamiento térmico recibido durante el horneado. Esto implica que la información obtenida de BB y AB era distinta y podía combinarse para obtener una mejor caracterización de las galletas. Por consiguiente, para las muestras AB se podría estimar que fracción de la variación total de (Ψ) se generó debido al enriquecimiento en fibra y que se generó por el tratamiento térmico. Para ello se calculó la diferencia entre Ψ_{BB} y Ψ_{AB} que se podría interpretar como la variación generada como consecuencia del horneado. En la Figura 8 se muestra un diagrama donde la línea de puntos corresponde a la variación total de Ψ y el área bajo la curva segmenta

los dos efectos mencionados. Se observa como la mayor parte de la variación en la transmitancia se produjo por el horneado en la formulación con un 5% de sustitución, por el contrario, para la formulación con un 20%, el tratamiento térmico tuvo una menor influencia en la variación de Ψ .

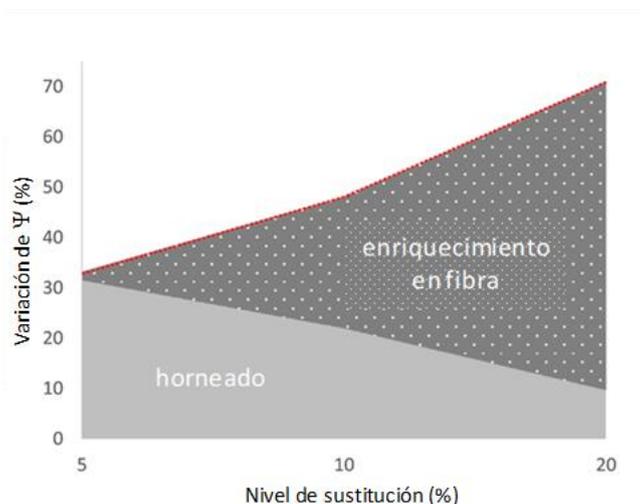


Figura 8. Diagrama de variación total de Ψ para el enriquecimiento en fibra y el horneado en las muestras AB

Los efectos descritos son similares a otros estudios anteriores donde las imágenes de los patrones de difracción del láser resultaron útiles para monitorizar los cambios en matrices de alimentos sólidos (papaya y manzana) durante el proceso de secado (Romano et al., 2011; Udomkun et al., 2014). Estos estudios mostraron la sensibilidad de esta técnica a los cambios de fase de los componentes de los tejidos (azúcares, proteínas, etc.). En comparación con este experimento, el efecto del tratamiento térmico durante el horneado de las muestras sería equivalente a estos cambios de fase. Se redujo el paso de la luz del láser (transmitancia) en las matrices AB. Tanto el proceso de horneado, que compactó la matriz de las muestras como la presencia de fibra que provocó una mayor presencia de partículas de subproducto en la matriz, redujeron el paso de la luz a través de esta.

Una de las consecuencias del tratamiento térmico al que fueron sometidas las muestras durante el horneado fue la compactación de la matriz. Esto explica que las muestras BB obtuvieran una mayor transmitancia en comparación a las muestras una vez horneadas (AB). Este hecho lleva implícitos procesos internos que se dan en la matriz como la pérdida de agua, desnaturalización de proteínas y gelatinización del almidón (Barrera et al., 2007). Además, la pérdida de agua favoreció que se desarrollaran reacciones de Maillard y de caramelización, las cuales modifican en gran parte las propiedades de la matriz (Purlis y Salvadori, 2009). Por lo tanto, estos fenómenos dan lugar a un cambio en la matriz haciendo que pase de ser una matriz viscoelástica a una matriz sólida, que influye o provoca cambios en los descriptores de imagen.

4.6 ANÁLISIS MULTIVARIANTE

Con la finalidad de estudiar la incidencia de cada variable en la caracterización global de las muestras, se realizó un análisis multifactorial de Componentes Principales (PCA). Este análisis se realizó tanto para los datos de las variables fisicoquímicas como para los descriptores de imagen extraídos para las muestras BB y AB. Esto permitió conocer la relación simultánea entre las variables y las muestras. En la Figura 9 se muestran los diferentes PCAs llevados a cabo.

En la figura 9-A se muestra el gráfico generado, donde se representan las formulaciones y las diferentes variables fisicoquímicas. Las muestras con sus diferentes niveles de sustitución están representadas a lo largo del eje PC1, compuesto de una sección negativa y otra positiva, el cual representa el 90,26% de la variación total. Las variables presentaron valores positivos en el PC1 excepto la densidad, que mostró un comportamiento inverso al resto de variables. Esta distribución observada sirvió para comprender mejor los resultados obtenidos anteriormente, que mostraron que el aumento de la densidad, debido a la compactación de las muestras, influyó en las otras variables de manera inversa y proporcional.

En las figuras 9-B y 9C, respectivamente, se muestran los análisis de PCA para los descriptores de imagen extraídos de las muestras de las masas (BB) y las galletas (AB). Como se observa, las diferentes formulaciones se sitúan a lo largo del PC1, desde la sección positiva hasta la sección negativa del eje, el cual recogió más del 70% de la varianza total. Los descriptores quedaron dispuestos en dos bloques distintos y en diferentes posiciones. En el primero, quedaron situados en la zona negativa del eje del PC1 todos los descriptores relativos, que tienen relación con la luz dispersa de todos ellos (B/Am, B/As, Am/A, Am/Ψ, B/Ψ y B/A). Por otro lado, el segundo bloque situado en la zona positiva agrupó a todos los descriptores directos (Ψ, A, B, Am, As), y los ratios que implicaban zonas saturadas (A/Ψ y As/A). Estos dos PCAs se ajustaban a la evolución de los descriptores mostrados en la Figura 6. El enriquecimiento en fibra provocó una reducción de la transmitancia y aumentó la carga de los indicadores de dispersión. Estos resultados confirmaron que los descriptores utilizados tuvieron la capacidad de recoger la varianza producida por el enriquecimiento en fibra, en ambos tipos de matrices, a pesar de las modificaciones provocadas por el tratamiento térmico durante el horneado.

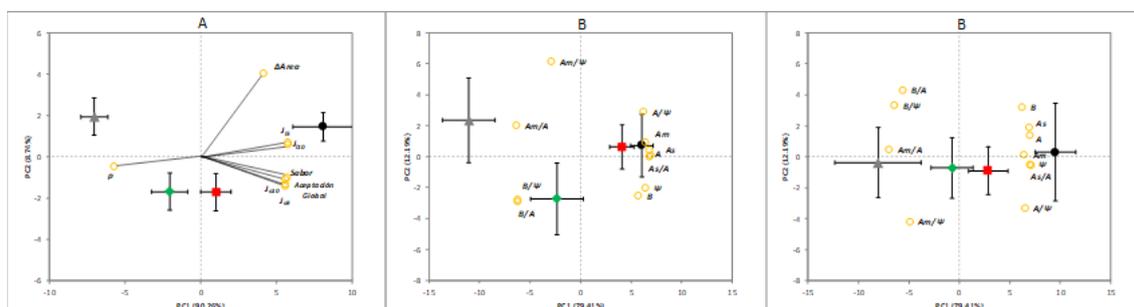


Figura 9. Análisis de componentes principales de los datos fisicoquímicos/sensoriales (A) y los datos de los descriptores de imagen de la matriz antes del horneado (BB) (B) y de la matriz después del horneado (AB) (C). Los valores de PCA se representan como media y desviaciones estándar (barras): Negro: control; Rojo: 5%; Verde: 10%; Gris: 20%; Amarillo: variables.

4.7 ESTUDIO DE REGRESIÓN Y MODELIZADO

Una vez obtenidos y comparados los datos fisicoquímicos y los datos de los descriptores de imagen, se realizó un estudio de regresión PLS-R con la finalidad de poder obtener modelos capaces de predecir las propiedades de las galletas usando únicamente información obtenida de las imágenes. En la Figura 10 se muestra los resultados de los coeficientes para los modelos de predicción obtenidos entre cada una de las variables fisicoquímicas, la PC1 (correspondiente al PCA fisicoquímico (Figura 9-A)), y los datos de imagen antes de horneado (BB), después (AB) y la combinación de ambos. Para el cálculo de los coeficientes y el modelizado se tuvieron en cuenta las variables y datos que se mostraron en las tablas 2, 3, 4 y en la figura 9A (valores de PC1) y que se resumen en la Tabla 5.

Los coeficientes de predicción más bajos se obtuvieron para los datos de las matrices BB en comparación a los coeficientes obtenidos para AB, que mostraron valores más altos (figura 10). A su vez, la combinación de ambos bloques (BB+AB), por lo general, obtuvieron coeficientes más altos que los de BB y AB por separado. Esto reflejaría como la información de las dos matrices es complementaria. Así, si bien la información procedente de los datos de las matrices AB permitiría predecir las propiedades de las galletas, la información obtenida de los datos de la matriz BB mejoraría dicha predicción, permitiendo predecir algunas de las variables fisicoquímicas con un alto coeficiente.

Este efecto de acumulativo estaría acorde a los efectos observados anteriormente en la varianza proporcionada por el enriquecimiento en fibra y el tratamiento térmico (Figura 8). El comportamiento fisicoquímico de las galletas estuvo influenciado tanto por el enriquecimiento en fibra como por el tratamiento térmico. Pero a tenor de los coeficientes de predicción obtenidos (Figura 10), no todas las características de las galletas evaluadas y por consiguiente las galletas en sí, dependieron del tratamiento térmico. Es por ello que si observamos los valores de R^2 de los flujos a agua (J_{a5} y J_{a10}) o la aceptación global del análisis sensorial, para las matrices antes del tratamiento térmico (BB), estos ya eran cercanos al 90%. En el caso de los flujos en leche (J_{l5} y J_{l10}), los coeficientes de predicción obtenidos fueron más bajos (Figura 10) tal vez por la interacción de los compuestos disueltos y emulsionados que interactuaban con la matriz de la galleta. Estos mismos resultados se observaron en el estudio de difusividad donde el agua obtuvo valores de difusión mayores para cualquier nivel de sustitución que la leche.

En cuanto a la combinación de ambos bloques de datos (BB+AB) se obtuvieron coeficientes de predicción entre 0,90 y 0,97 para todos los parámetros excepto para el incremento de área (Δ Área). El hecho de no poder predecir esta variable puede estar relacionado con que las áreas de las muestras enriquecidas en fibra no muestran diferencias significativas entre ellas. Los errores cuadráticos medios recogidos en la Tabla 5 indicaron como la varianza de las muestras hizo difícil la reducción del error por debajo del nivel de desviación estándar observado.

Finalmente, el modelo de predicción obtenido para las coordenadas PC1 del análisis de las variables fisicoquímicas fue de 0,93. Esto significa la posibilidad de ubicar cualquiera de estas fórmulas en el espacio de varianza del sistema fisicoquímico (Fig. 9-A) con el fin de conocer sus propiedades únicamente mediante el uso de la información de las imágenes. Es decir, a través del modelo de predicción se podría obtener las coordenadas PC1 de nuevas galletas, las cuales se podrían plasmar en el modelo PCA fisicoquímico (Figura 9 A) y así obtener la descripción de las galletas en base a las variables mostradas en el modelo PCA.

Tabla 5. Valores de las diferentes variables utilizadas para el estudio de regresión y modelizado. Δ Área: incremento de área; ρ : densidad; Ja: flujo de agua a los 5 y 10 segundos; JI: flujo de leche a los 5 y 10 segundos; PC1: corresponde a los valores del PCA de la figura 9-A; ECM: error cuadrático medio de predicción.

Descriptores	Control	5%	10%	20%	BB ECM Pred	AB ECM Pred	BB+AB ECM Pred
Δ Área (%)	-20,1 \pm 1,8a	-26,36 \pm 2,3b	-27,53 \pm 2,4b	-25,11 \pm 2,5b	1,82	1,35	1,45
ρ (g/cm ²)	0.6 \pm 0.01a	0,63 \pm 0,01b	0,69 \pm 0,01c	0,72 \pm 0,01d	0,01	0,00	0,00
Ja ₅ (g/m ² .s.10 ⁻⁴)	5,1 \pm 0,18b	4,7 \pm 0,3b	4 \pm 0,8b	1,9 \pm 0,5a	0,53	0,58	0,59
Ja ₁₀ (g/m ² .s.10 ⁻⁴)	3,3 \pm 0,06d	2,6 \pm 0,12c	0,2 \pm 0,4b	0,1 \pm 0,3a	0,22	0,40	0,29
Jl ₅ (g/m ² .s.10 ⁻⁴)	3,1 \pm 0,4c	2,2 \pm 0,4b	1,8 \pm 0,6a	1,4 \pm 0,8a	0,25	0,18	0,16
Jl ₁₀ (g/m ² .s.10 ⁻⁴)	1,9 \pm 0,2d	1,4 \pm 0,1c	1,1 \pm 0,2b	0,9 \pm 0,2a	0,16	0,12	0,13
SABOR	6,8 \pm 0,6c	5,0 \pm 0,6b	4,9 \pm 0,7b	3,7 \pm 0,5a	0,35	0,33	0,38
ACEPTACIÓN GLOBAL	6,8 \pm 0,8c	5,2 \pm 0,9bc	4,9 \pm 0,5b	4,1 \pm 0,3a	0,17	0,20	0,20
PC1	8,1 \pm 1,2	0,99 \pm 0,9	2,05 \pm 0,3	7,1 \pm 0,2	2,04	1,70	1,94

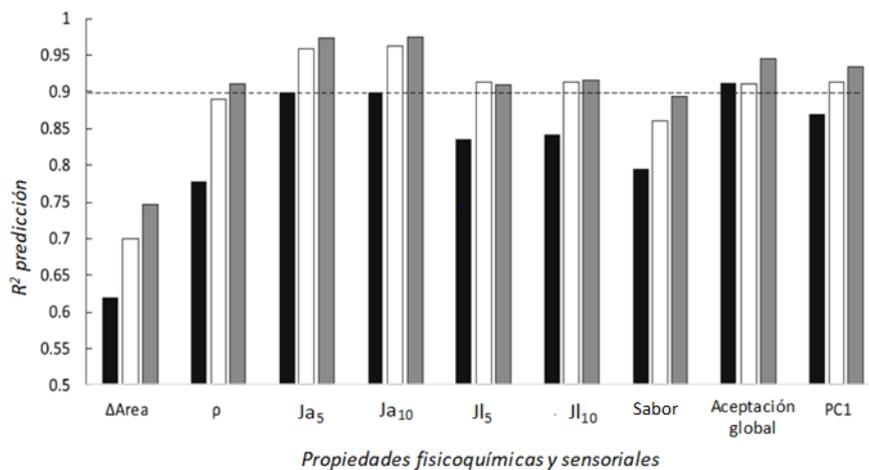


Figura 10. Coeficientes de predicción (R^2) para las variables fisicoquímicas y sensoriales usando la información de imagen de las matrices antes de hornear (BB), después de hornear (AB) y

ambas combinadas (BB+AB). Barras negras corresponden a matrices BB, blancas a matrices AB y barras grises a combinación de ambas (BB+AB)

5. CONCLUSIONES

Los resultados e información obtenida tras la realización del presente estudio mostraron la relación directa entre los cambios generados por el efecto del enriquecimiento en fibra de las galletas y los descriptores de imagen seleccionados. Esto permitió la caracterización no destructiva de las diferentes fórmulas de galletas. Esta caracterización se llevó a cabo mediante la información obtenida de las matrices antes del horneado (masas) y de las matrices después del horneado (galletas). Ambas ofrecieron información complementaria, la varianza producida por el enriquecimiento en fibra para las masas y la varianza producida por el efecto del tratamiento térmico para las galletas. La combinación de ambos bloques de información mejoró la predicción cuantitativa de las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de las galletas tanto unitariamente como en su conjunto (PC1).

Por tanto, el análisis de patrones de difracción láser y la posterior extracción de descriptores permitió modelizar los efectos del enriquecimiento en fibra en las galletas. Así, esta técnica podría ser usada para el estudio no destructivo de las propiedades fisicoquímicas de galletas durante la cadena de producción.

De acuerdo con estos resultados, se deben probar diferentes configuraciones de dispositivos, así como otras fórmulas de galletas, a fin de optimizar la generación de patrones de dispersión láser en relación con las propiedades de las galletas y así obtener un modelo más robusto.

6. BIBLIOGRAFÍA

ABDUL HALIM LIM, S., ANTONY, J., GARZA-REYES, J. A., & ARSHED, N. (2015). Towards a conceptual roadmap for Statistical Process Control implementation in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 44(1), 117–129.

ARENDSE, E., FAWOLE, O. A., MAGWAZA, L. S., & OPARA, U. L. (January 2018). Non-destructive prediction of internal and external quality attributes of fruit with thick rind: A review. *Journal of Food Engineering*, 217, 11–23.

BARBIN, D. F., KAMINISHIKAWAHARA, C. M., SOARES, A. L., MIZUBUTI, I. Y., GRESPAN, M., SHIMOKOMAKI, M., et al. (2015). Prediction of chicken quality attributes by near infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 168, 554–560.

BARRERA, G. N., PÉREZ, G. T., RIBOTTA, P. D., & LEÓN, A. E. (2007). Influence of damaged starch on cookie and bread-making quality. *European Food Research and Technology*, 225(1), 1–7.

CHEN, Q., ZHANG, C., ZHAO, J., & OUYANG, Q. (December 2013). Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety. *TRAC Trends in Analytical Chemistry*, 52, 261–274.

CHIRALT, A., MARTÍNEZ, N., GONZÁLEZ, C., TALENS, P., MORAGA, G. (2007). Propiedades texturales de alimentos en: *Propiedades físicas de los alimentos*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. 175-201

ESTEPA, N., GRAU, R., VERDÚ, S. (2016). Estudio del efecto de la incorporación del subproducto de la elaboración de horchata al procesado de snacks. Trabajo de fin de Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. 24pp

FUENTES, E., ALCAÑIZ, M., CONTAT, L., BALDEÓN, E. O., BARAT, J. M., & GRAU, R. (2017). Influence of potential pulses amplitude sequence in a voltammetric electronic tongue (VET) applied to assess antioxidant capacity in aliso. *Food Chemistry*, 224, 233–241.

HASHIM, N., PFLANZ, M., REGEN, C., JANIUS, R. B., ABDUL RAHMAN, R., OSMAN, A., et al. (2013). An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 28–36

ISLAS-RUBIO, A. R., DE LA BARCA, A. M., MOLINA-JACOTT, L. E., DEL CARMEN GRANADOS-NEVÁREZ, M., & VASQUEZ-LARA, F. (2014 Jun). Development and evaluation of a nutritionally enhanced multigrain tortilla snack. *Plant Foods for Human Nutrition*, 69 (2), 128-133.

LIM, S. A. H., & ANTONY, J. (2016). Statistical process control readiness in the food industry: Development of a self-assessment tool. *Trends in Food Science & Technology*, 58, 133–139.

MIREEI, S. A., MOHTASEBI, S. S., MASSUDI, R., RAFIEE, S., & ARABANIAN, A. S. (2010). Feasibility of near infrared spectroscopy for analysis of date fruits. *International Agrophysics*, 24(4), 351–356.

MOLLAZADE, K., OMID, M., AKHLAGHIAN TAB, F., KALAJ, Y. R., MOHTASEBI, S. S., & ZUDE, M. (2013). Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 34–45.

Real Decreto 1124/1982, de 30 de abril, por el que se aprueba la Reglamentación Técnico-Sanitaria para la Elaboración Fabricación, Circulación y Comercio de Galletas.

RODRIGUEZ, J. y HERNANDO, I. (2014). Reformulación de productos horneados para disminuir el contenido en grasa y azúcar mediante sustitución con inulina. Efectos sobre la estructura y propiedades físicas. Tesis Doctoral. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia. 210pp

ROMANO, G., ARGYROPOULOS, D., GOTTSCHALK, K., CERRUTO, E., & MÜLLER, J. (2010). Influence of colour changes and moisture content during banana drying on laser backscattering. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3, 46–51.

ROMANO, G., NAGLE, M., ARGYROPOULOS, D., & MÜLLER, J. (2011). Laser light backscattering to monitor moisture content, soluble solid content and hardness of apple tissue during drying. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 657–662.

ROPODI, A. I., PANAGOOU, E. Z., & NYCHAS, G.-J. E. (2016). Data mining derived from food analyses using non-invasive/non-destructive analytical techniques; determination of food authenticity, quality & safety in tandem with computer science disciplines. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 11–25.

- SENDIN, K., MANLEY, M., & WILLIAMS, P. J. (2017). Classification of white maize defects with multispectral imaging. *Food Chemistry*, 243(September 2017), 311–318.
- SHI, C., QIAN, J., HAN, S., FAN, B., YANG, X., & WU, X. (2018). Developing a machine vision system for simultaneous prediction of freshness indicators based on tilapia (*Oreochromis niloticus*) pupil and gill color during storage at 4 °C. *Food Chemistry*, 243, 134–140. May 2017
- SUDHA, M.L., VETRIMANI, R., LEELAVATHI K. (2007). Influence of fiber from different cereals on the rheological characteristics of wheat flour dough and on biscuit quality. *Food Chemistry*, 100, 1365–1370
- UDOMKUN, P., NAGLE, M., MAHAYOTHEE, B., & MÜLLER, J. (2014). Laser-based imaging system for non-invasive monitoring of quality changes of papaya during drying. *Food Control*, 42, 225–233.
- VERDÚ, S., BARAT, J. M., ALAVA, C., & GRAU, R. (2017a). Effect of tiger-nut (*Cyperus esculentus*) milk co-product on the surface and diffusional properties of a wheat-based matrix. *Food Chemistry*, 224, 69–77.
- VERDÚ, S., VÁSQUEZ, F., GRAU, R., IVORRA, E., SÁNCHEZ, A. J., & BARAT, J. M. (2016). Detection of adulterations with different grains in wheat products based on the hyperspectral image technique: The specific cases of flour and bread. *Food Control*, 62, 373–380.
- VERDÚ, S., BARAT, J. M., & GRAU, R. (2019). Non destructive monitoring of the yoghurt fermentation phase by an image analysis of laser-diffraction patterns: Characterization of cow's, goat's and sheep's milk. *Food Chemistry*, 274, 46–54. July 2018
- WU, Y., QIAN, Y., PAN, Y., LI, P., YANG, J., YE, X., ET AL. (2014). Association between dietary fiber intake and risk of coronary heart disease: A meta-analysis. *Clinical Nutrition*.
- XIE, C., CHU, B., & HE, Y. (2017). Prediction of banana color and firmness using a novel wavelengths selection method of hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 245, 132–140. March 2017.
- YANG, Y., ZHUANG, H., YOON, S.-C., WANG, W., JIANG, H., & JIA, B. (2018). Rapid classification of intact chicken breast fillets by predicting principal component score of quality traits with visible/near-Infrared spectroscopy. *Food Chemistry*, 244(17), 184–189.