



Trabajo Fin de Grado

Cinética de cambio de color en masa de creps para la
caracterización térmica de cocinas de inducción

Autor

Alberto Lario Cabello

Directores

Jorge Mir Bel
María Luisa Salvador Solano

Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014

Cinética de cambio de color en masa de creps para la caracterización térmica de cocinas de inducción.

RESUMEN

El presente trabajo se enmarca dentro del proyecto “Caracterización on-line de procesos culinarios para el desarrollo de sensores” desarrollado por el grupo de investigación “Alimentos de Origen Vegetal” de la Universidad de Zaragoza y la empresa BSH Electrodomésticos España, S.A.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una metodología para conocer el comportamiento del elemento calefactor empleado para el cocinado de alimentos en entornos domésticos, a partir de datos de cambios de color y pérdida de peso que experimenta una masa durante su cocción.

Los alimentos experimentan una serie de cambios durante su cocinado, que afectan entre otros parámetros a su color. Los cambios de color producidos en esta masa son propiciados principalmente por las reacciones de Maillard, un complejo conjunto de reacciones químicas, que, a partir de la glicación no enzimática de las proteínas en presencia de azúcares reductores y agua, producen melanoidinas coloreadas responsables de los tonos tostados que desarrollan los alimentos durante su calentamiento o conservación.

Para la obtención de la cinética de cambio de color se han realizado tandas de ensayos de cocinado a diferentes temperaturas y tiempos, manteniendo la temperatura homogénea y estable durante la cocción. Mediante el análisis digital de las imágenes obtenidas al escanear las muestras, se ha medido el color desarrollado en la superficie en coordenadas CIELab. En paralelo se ha estudiado la cinética de pérdida de agua en las mismas condiciones, con el objetivo de correlacionar el desarrollo de color con la pérdida de agua durante el cocinado.

Previamente a la realización de los ensayos de cocinado, se realizó un exhaustivo trabajo de puesta a punto y de caracterización térmica del sistema calefactor mediante termografía, para verificar que los gradientes de temperatura medidos en la superficie de cocinado fueran mínimos y la fuente de calor estable. Del mismo modo, se llevaron a cabo baterías de ensayos para desarrollar la metodología para la obtención de un color homogéneo en las muestras.

A partir del análisis digital de imágenes de creps elaboradas en condiciones reales de cocción, y de la cinética de cambio de color, se pretende obtener información sobre los gradientes de temperatura en la superficie de la sartén calentada por una placa de inducción doméstica. La validez de las predicciones de temperatura se corrobora mediante un estudio termográfico de los gradientes de temperatura en la sartén, en las condiciones de calentamiento empleadas para el cocinado de las muestras reales.

De esta manera quedan establecidos los objetivos específicos de este trabajo, que incluyen el desarrollo de una metodología para la preparación de muestras para medida de color, la obtención de la cinética de cambio de color y de la cinética de deshidratación durante el cocinado, la determinación de la correlación entre desarrollo de color y pérdida de agua y el estudio de la viabilidad de efectuar predicciones de temperatura en la sartén a través del color desarrollado en una muestra cocinada en la misma.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. <i>Reacción de Maillard y caramelización.....</i>	7
1.2. <i>Visión computerizada y análisis digital de imagen.....</i>	8
1.3. <i>Medida del color</i>	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.1. <i>Materiales</i>	11
2.2. <i>Métodos de análisis.....</i>	11
2.3. <i>Diseño experimental.....</i>	13
3. RESULTADOS	15
3.1. <i>Evolución del color, humedad y pérdida de peso durante la cocción de creps a temperatura homogénea.....</i>	15
3.2. <i>Cinética de cambios de color.....</i>	21
3.3. <i>Cinética de pérdida de agua</i>	24
3.4. <i>Relación entre cambio de color y humedad.....</i>	26
3.5. <i>Predicción de la temperatura a partir del color absoluto</i>	27
4. CONCLUSIONES.....	29
5. BIBLIOGRAFÍA.....	31
6. ANEXOS	35
ANEXO I.....	35
ANEXO II	41
ANEXO III.....	45
ANEXO IV	57

1. INTRODUCCIÓN

El color es un atributo que puede dar información de los alimentos y los procesos térmicos a los que se han sometido mediante su mera observación. En el caso de la cocción de masas amiláceas, la generación de tonos tostados y dorados se debe principalmente a la formación de compuestos derivados de la reacción de Maillard y la caramelización, pertenecientes a la categoría de pardeamiento no enzimático o no oxidativo (Fennema, 1993). Estudios realizados por Wählby y Skjöldebrand en 2002 muestran que el pardeamiento no solo depende de la temperatura superficial, sino también de la pérdida de peso durante la cocción y la temperatura ambiental. Un análisis visual del color permite por si mismo identificar los cambios de color de forma cualitativa; sin embargo, la cuantificación del color mediante análisis digital de imagen y el estudio de las coordenadas en el espacio CIELab, un estándar internacional para la medida de color de uso ampliamente extendido en ciencia y tecnología alimentaria (Yam y Papadakis, 2004), permite obtener datos para la construcción de modelos cinéticos y su uso posterior para la predicción de los cambios de color provocados por los procesos de pardeamiento no oxidativo durante el procesado culinario de alimentos (Purlis y Salvadori, 2007).

1.1. Reacción de Maillard y caramelización

La reacción de Maillard se descubrió por primera vez en 1912 (Maillard, 1912) y sus mecanismos principales se describen en varias publicaciones (Hodge, 1953). Desde entonces se han realizado nuevos hallazgos que han contribuido a aumentar el conocimiento sobre esta reacción.

Tanto la reacción de Maillard como la caramelización son reacciones de pardeamiento no enzimático que se producen en los alimentos, bien durante su cocinado a temperaturas elevadas, o bien durante su almacenamiento prolongado en el tiempo, como se puede apreciar en el caso de la reacción de Maillard.

La reacción de Maillard es el nombre con el que se denomina a un conjunto de reacciones que consisten en la glucosilación o glicación no enzimática de proteínas y sus aminoácidos. Las modificaciones que subproductos de esta reacción, como las melanoidinas, provocan en el color, el aroma y el sabor de los alimentos, le dan un lugar de importancia entre los procesos culinarios. Por otro lado, la caramelización es un proceso de pirólisis que tiene lugar sobre los azúcares. Esto da lugar a la liberación de compuestos químicos volátiles que generan un sabor agradable, y a la aparición de colores marrones tostados. Debido a las ventajosas modificaciones que propicia, la caramelización es una transformación deseable y muy común tanto en la cocina como en la industria alimentaria.

Las condiciones necesarias para el desarrollo de Maillard son la presencia en medio acuoso de un azúcar reductor de tipo cetosa o aldosa y de un grupo amino libre proveniente de aminoácidos o proteínas. La masa empleada en este trabajo apenas contiene sacarosa ni azúcares simples que den lugar a una caramelización, pero sí una cantidad significativa de proteína, de modo que aparecerán melanoidinas y otros pigmentos generados en las reacciones de Maillard. Sin embargo, además de subproductos que mejoran el sabor, aroma y color de los alimentos, también se generan compuestos químicos como la acrilamida (Mottram et al., 2002; Stadler et al., 2002; Tareke et al., 2002) y el hidroximetilfurfural (HMF), cuya reducción durante el cocinado de alimentos ha sido objeto de estudio (Mir-Bel et al., 2013) ya que representan un riesgo potencial para la salud. Adicionalmente, existen una serie de factores que modulan la intensidad con la que la reacción tiene lugar y que pueden determinar su viabilidad o inhibición en unas condiciones dadas (Martins et al., 2001):

- Alcalinidad del medio: La reacción es más rápida en medios alcalinos, siendo el valor de pH = 10 donde la velocidad es máxima.

- Temperatura: La velocidad de la reacción aumenta con la temperatura. No obstante, dada su baja energía de activación, la reacción de Maillard tiene lugar incluso en condiciones de refrigeración, aunque de forma mucho más lenta.
- Actividad de agua: Es un factor capaz de inhibir la reacción tanto por exceso como por defecto. Dado que uno de los productos de la reacción es el agua, si la actividad de agua es elevada (>0.9) la reacción se inhibe. Si por el contrario, la actividad de agua es demasiado baja (<0.6) la movilidad de los reactivos se ve comprometida y la reacción no tiene lugar.
- Tipo de aminoácido: Los aminoácidos con cadenas de mayor tamaño y conteniendo más de un grupo amino son los más reactivos.
- Tipo de azúcar reductor: La naturaleza de los azúcares reductores influye sobre la velocidad de la reacción de Maillard. Atendiendo al número de carbonos en la cadena del azúcar reductor, las pentosas son más reactivas que hexosas. Análogamente, los monosacáridos también son más reactivos que los disacáridos. Por otro lado, aquellos azúcares reductores con un grupo aldehído en su molécula (aldosas) son más reactivos que aquellos que contienen un grupo cetona (cetosas).
- Metales como el cobre y el hierro actúan como catalizadores.

Dada la complejidad del conjunto de las reacciones de Maillard, su estudio se puede realizar diferenciando las diferentes etapas generales que derivan en el desarrollo de los compuestos responsables del color. Los mecanismos de las reacciones de Maillard, sus reacciones intermedias y productos parciales y finales están recogidos y explicados en el Anexo I de este trabajo.

1.2. Visión computerizada y análisis digital de imagen

La visión por ordenador se puede definir como la descripción de objetos a partir de imágenes, de modo que su significado quede definido de forma explícita y plena (Ballard y Brown, 1982). Desde sus orígenes en la década de los 60, la visión computerizada ha experimentado un rápido crecimiento y ha sido empleada con éxito para la medición on-line de diversos productos alimentarios con aplicaciones que abarcan desde tareas de inspección rutinaria hasta complejos sistemas de control robótico guiado por sistemas de visión artificial. (Gunasekaran, 1996).

El objetivo de esta tecnología es reproducir el efecto de la visión humana mediante una percepción y comprensión electrónica de la imagen, por lo que el término engloba una serie de etapas de procesado que permiten extraer la información más relevante para cada aplicación. Estas operaciones incluyen la adquisición de la imagen, el análisis mediante hardware o software de la información captada por los sensores, la segmentación de la información y la interpretación y toma de decisiones a partir de la información procesada. Los sistemas de visión computerizada y análisis digital de imágenes existentes son muy variados, y el uso de una u otra configuración depende del tipo de medida que se va a realizar y de la información que se quiera obtener de ella. Por lo general los equipos más completos incorporan una cámara o un escáner para la adquisición de imágenes, equipo de iluminación, hardware específico para digitalización, un ordenador y software para el procesado de las imágenes y la ejecución de instrucciones específicas (Sun, 2008) Sin embargo, existen configuraciones más sencillas que, combinando una cámara digital o escáner y un ordenador con el software necesario para la adquisición y el procesado de datos, permiten obtener buenos resultados en aplicaciones concretas (Gökmen y Burçe, 2010)

Entre las ventajas de la visión computerizada destacan su carácter no destructivo, la eficiente generación de información descriptiva muy precisa y objetiva de forma rápida, sencilla y robusta y su capacidad para automatización e integración en procesos. Por otro lado, es muy dependiente de las condiciones de iluminación y presenta algunas desventajas a la hora de identificar objetos en

configuraciones no estructuradas.

En el ámbito de la tecnología alimentaria, el análisis digital de imagen se ha empleado, entre otros, para investigar la capacidad de fundirse y el pardeamiento en quesos (Wang y Sun, 2003), determinar ingredientes, porcentaje y distribución de ingredientes en pizzas (Sun, 2000), correlacionar color superficial con concentración de acrilamida en productos alimenticios como patatas fritas (Amrein et al., 2006; Gökmen y Şenyuva, 2006; Pedreschi et al., 2006), pan de jengibre (Amrein et al., 2004), corteza de pan de trigo (Surdyk et al., 2004), pan crujiente de centeno (Mustafa et al., 2006), café tostado (Şenyuva y Gökmen, 2005) y almendras tostadas (Lukac et al., 2007). El análisis de imágenes también se ha postulado como un método viable para predecir la aparición de acrilamida en galletas y patatas fritas (Gökmen et al., 2006; Gökmen et al., 2007; Gökmen et al., 2008) y monitorizar cambios de color y forma en procesos de fritura de masas (Magdic et al., 2006)

1.3. *Medida del color*

El color es una percepción mental de la respuesta del espectro visible de la luz emitida o reflejada por un objeto. Dicha respuesta es transmitida al cerebro desde la retina a través del nervio óptico, lo que permite asignar colores en función de la señal recibida. Por tanto, el color no es una propiedad intrínseca del objeto: si la fuente de luz cambia, el color del objeto también lo hace. La percepción del color depende entonces de la composición de un objeto, de las condiciones de iluminación, de las características del ojo y del cerebro, así como de los ángulos de visión y de iluminación (Meléndez-Martínez et al., 2005).

El color en los alimentos es un atributo sensorial que proporciona a la percepción humana información sobre la calidad y seguridad alimentaria, y un factor para la clasificación de los productos (McCaig, 2002). Debido a la necesidad de disponer de datos objetivos en la medida del color, se han desarrollado métodos e instrumentos capaces de dar valores de color normalizados, tales como colorímetros y espectrofotómetros que muestran los resultados en diferentes espacios de color. Un espacio de color es la representación matemática para asociar a cada color los valores triestímulo que se perciben por la vista. Se distingue entre espacios de color orientados a hardware, como RGB (red, green, blue), YIQ (luminance, in-phase, quadrature) o CMYK (cyan, magenta, yellow, black); a uso humano, como HSI (hue, saturation, intensity), HSV (hue, saturation, value), HSL (hue, saturation, lightness), HSB (hue, saturation, brightness); o a instrumentos (Pascale, 2003; Wu et al., 2013). Muchos de los espacios instrumentales están estandarizados por la Commission Internationale d'Eclairage (CIE) y sus coordenadas son las mismas para todos ellos, como el CIE XYZ (lineal), CIELUV y CIELab. El espacio CIELab es el más comúnmente usado debido a que los colores están distribuidos uniformemente y es perceptualmente uniforme, en cuanto a que la distancia en el plano euclíadiano entre dos colores se corresponde aproximadamente con la diferencia de color percibida por el ojo humano (León et al., 2006).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. *Materiales*

Sistemas de calentamiento

Placa calefactora: Para el cocinado de muestras a temperatura homogénea se empleó una placa calefactora eléctrica SANDVIK con control de temperatura de hasta 600 °C y 1500 W de potencia, con superficie de material refractario y bastidor metálico con unas dimensiones de 260 mm x 300 mm.

Placa de inducción: Para el cocinado de muestras en condiciones reales se utilizó una placa de inducción de la marca BOSCH, modelo Schott Ceran 9000440134.

Sartenes antiadherentes

Para el desarrollo de la metodología de cocinado se probaron varias sartenes de entre las que se seleccionaron las que se emplearían para el cocinado de las muestras. Se decidió usar una sartén con recubrimiento de teflón de 260 mm de diámetro, Marca WMF, modelo Sensor, para el cocinado a temperatura homogénea; y la sartén Marca Fissler, modelo Steelux Premium de 240 mm de diámetro y recubrimiento de teflón, para el cocinado de muestras en condiciones reales.

Masa de creps

La elaboración de la masa se realizó utilizando los siguientes ingredientes en los porcentajes en peso indicados: harina de trigo (25.89 %), marca Aragonesa de Harinera del Mar Siglo XXI, S.L.; huevos (20.47 %), de categoría A, tamaño L de Huevos Guillén S.L.; leche entera UHT (53.44 %), marca Hacendado; sal (0.20 %), yodo fluorada de la marca Marismeña. Se colocó en un bol la harina y se hizo un hueco en el centro. Se espolvoreó la sal alrededor, se adicionaron $\frac{3}{4}$ partes de la leche lentamente en el interior del agujero y se mezclaron los ingredientes comenzando por el centro hacia los bordes del recipiente. Se añadió la mitad de los huevos y se mezcló hasta obtener una masa homogénea. A continuación se añadieron los huevos restantes, se mezclaron, y se adicionó el resto de la leche, poco a poco, resultando una masa esponjosa y sin grumos.

2.2. *Métodos de análisis*

Termografía

La termografía es una herramienta con numerosos campos de aplicación que se basa en la medida de la energía infrarroja que cualquier cuerpo irradia a una temperatura dada. La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro, cuya emisividad es del 100%, emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total, E (W/m^2), proporcional a su temperatura, T (K), elevada a la cuarta potencia, de modo que:

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$).

Cuando se realizan medidas sobre un cuerpo real es necesario introducir el coeficiente de emisividad (ϵ), un número adimensional que relaciona la capacidad de un objeto real para irradiar con la capacidad del cuerpo negro, por lo que su valor está comprendido entre 0 y 1. De este modo, la siguiente ecuación permite relacionar la energía emitida por el cuerpo con su temperatura:

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

Las cámaras termográficas incorporan detectores sensibles a la radiación infrarroja. Determinada la radiación emitida por el cuerpo por unidad de superficie, es posible conocer de forma precisa su temperatura introduciendo como parámetro su coeficiente de emisividad en la ecuación

anterior (ec. 2), y realizando las correcciones pertinentes sobre parámetros que afectan al resultado como temperatura ambiente, humedad, temperatura reflejada y distancia al objeto.

Dado que la termografía es un método de medida de temperatura preciso, rápido, capaz de cubrir grandes áreas en una sola medida y sin contacto, se usó como herramienta para:

- a) La caracterización térmica de la placa calefactora y de las diferentes superficies de las sartenes utilizadas en el cocinado.
- b) Verificar la temperatura de cocinado de cada una de las muestras.
- c) Determinar el mapa térmico de la superficie de las creps cocidas en condiciones reales.

Para todo ello se empleó una cámara termográfica de la marca TESTO, modelo 875.2 con objetivo angular $32^\circ \times 23^\circ$ y el software TESTO IRsoft para el postprocesado de las imágenes térmicas.

El método empleado para realizar las medidas de temperatura de la superficie con la cámara fue el siguiente:

- Conocer la emisividad del material. Para ello se coloca un trozo rectangular de cinta adhesiva de coeficiente de emisividad conocido ($\epsilon = 0.95$) sobre la superficie que se va a termografiar, y se realizan capturas a diferentes temperaturas durante el calentamiento para comprobar que el coeficiente de emisividad no varía con la temperatura.
- Calcular la temperatura reflejada en la posición de la cinta adhesiva. Para ello es necesario dar valores a los parámetros distancia (0.10 m) y emisividad (0.00) en la cámara. Tras esto se coloca un reflector difuso sobre la cinta y desde una distancia arbitraria (0.5 m) se mide la temperatura del mismo, que será la temperatura reflejada en esa ubicación y para esas condiciones. Se estableció como temperatura reflejada la temperatura media del reflector difuso y se introdujo como parámetro de corrección.
- Posteriormente, en las imágenes capturadas se modifica el coeficiente de emisividad del material de la superficie que se termografió, hasta que la temperatura medida en la cinta y la medida en el material de la superficie coincidan.

Análisis digital de imagen

Para la adquisición de las imágenes se empleó el escáner CanoScan Lide 210 y software Canon MP Navigator EX 4.0. Para cubrir la pantalla del escáner durante la digitalización de las creps se construyó una tapa hueca, forrando una fuente metálica para horno con fieltro negro.

Las creps obtenidas para la determinación de la cinética de cambio de color se troquelaron con un sacabocados cilíndrico de 60 mm de diámetro y se escanearon con una resolución de 300 ppp, obteniendo imágenes en formato JPEG de 767x767 píxeles, con una profundidad de color de 24 bits y presentación sRGB. Con un programa desarrollado para el software MATLAB, se determinó el valor medio del color en coordenadas CIELab. Mediante el software se seleccionó el área de cálculo, por lo general un diámetro de 250 píxeles, para evitar los bordes desconchados por el troquelado. En algunos casos concretos en que el área con color homogéneo era menor, se redujo este diámetro a 200 o 150 píxeles, con la única implicación de reducir la población empleada para calcular los valores medios.

Las creps cocinadas en condiciones reales se escanearon directamente tras enfriarse, sin troquelarlas, a una resolución de 300 ppp, obteniendo imágenes en formato JPEG de 2551x2551 píxeles. Tras esto se redujo su tamaño hasta 766x766 píxeles, para poder realizar las medidas de color empleando el código empleado para las medidas del color con MATLAB.

Determinación de la humedad de las creps

Para cada tiempo de cocción se pesó la masa después de retirarla de la sartén, utilizando una balanza analítica de precisión Mettler Toledo, modelo AE200. A continuación se introdujo en una estufa (Digitronic de Selecta S.L.) a 100 °C durante 48 h, tras lo cual se pesó la masa desecada. Por diferencia de pesada se obtuvo la humedad de las creps cocinadas a diferentes temperaturas y tiempos. Adicionalmente, se determinó por el mismo procedimiento la humedad de las masas crudas utilizadas para la elaboración de las creps.

2.3. Diseño experimental

Ensayos de caracterización térmica de superficies

Dada la importancia de disponer de una fuente de calor homogénea, se determinó en primer lugar la distribución de temperaturas en la placa calefactora y en las sartenes mediante termografía. Para ello se estableció en la placa calefactora un punto de consigna de 100 °C hasta alcanzar un estado estacionario, primero en la placa y luego en el conjunto placa-sartén.

Sobre la imagen térmica de la superficie de la placa calefactora se identifican áreas con mayores gradientes de temperatura en las esquinas de la placa y en las aristas. Además se observó que la temperatura era 12 °C superior en las zonas cóncavas del enrejado que en el resto de la superficie. Dado que no es necesario conocer con exactitud la temperatura en la superficie, no se determinó el coeficiente de emisividad del material refractario. El análisis visual de la imagen térmica de la superficie determinó que la zona óptima para la ubicación de la sartén era el centro de la placa, por ser el área con menores gradientes de temperatura entre sus puntos. Dado que la temperatura en la superficie de la sartén es un parámetro crítico en el proceso de cocción, se determinó la emisividad de la sartén obteniendo un valor de 0.95. Se comprobó que la zona central de la sartén es la que menos gradientes de temperatura presenta, alcanzando un máximo de 3 °C en un radio de 10 cm. En el Anexo II se incluyen las imágenes térmicas obtenidas en la caracterización térmica de las superficies.

Ensayos para la elección de la sartén

Los factores críticos en la elección de la superficie de cocción son la emisividad de la superficie, que ante la dificultad de instalar termopares embebidos en el fondo de la sartén, determina la precisión de las medidas de temperatura mediante termografía, y el nivel de adherencia entre la sartén y la masa.

De entre las superficies disponibles se descartaron aquellas sin recubrimiento de teflón o cerámico, por tener un coeficiente de emisividad que no permite obtener medidas precisas ($\epsilon < 0.6$). Se hicieron pruebas de cocinado para determinar qué tipo de recubrimiento ofrece la adherencia adecuada, para que el contacto entre la masa y la sartén permita conseguir un color homogéneo en toda la superficie de la masa, y para que sea posible desmoldarla tras la cocción sin dejar restos en la superficie. Finalmente se eligió una superficie anti-adherente rugosa, empleando una sartén con el recubrimiento de teflón parcialmente desgastado por el uso, como alternativa a un tratamiento superficial por métodos físicos o químicos que deteriorase en exceso la capa antiadherente.

Ensayos de cocción de creps para determinación de color y humedad

Con la finalidad de obtener muestras lo más homogéneas posibles tanto para la medida de color como para las medidas de humedad., se evaluaron diferentes métodos de cocción de las creps:

- Se prepararon creps colocando un molde circular de 60 mm de diámetro sobre la superficie de la sartén antiadherente y llenándolo con 10 mL de masa. Se obtuvieron creps circulares del tamaño del molde y espesor constante con grandes heterogeneidades en el color, originadas por bolsas de vapor de cocción atrapadas en la intercara entre la superficie de la sartén y la crep y las paredes del molde.

- Se prepararon muestras vertiendo directamente 10 mL de masa sobre la sartén antiadherente y transcurridos 30 segundos se colocó un contra-molde plano circular de 200 g sobre la masa. Se observó un aumento de la homogeneidad en el color y de la velocidad en el cambio de color, debido a un mejor contacto entre la sartén y la crep, aunque sin llegar a ser homogéneas.
- Finalmente se decidió preparar las muestras en la sartén WMF, modelo Sensor, añadiendo directamente en el centro de la sartén 25 mL de masa con un cazo vertedor, retirándola tras el tiempo de cocción previsto. Aunque previamente se había caracterizado por termografía la superficie de la sartén, antes de verter la masa se comprobaba la temperatura en la superficie de la sartén con la cámara termográfica y mediante un termopar tipo K y un registrador de datos TESTO 177-T4 conectado a un PC con el software proporcionado por el fabricante.

Siguiendo la metodología seleccionada se prepararon creps a diferentes temperaturas desde 110 °C hasta 260 °C. Para cada temperatura se elaboraron creps con distintos tiempos de cocción entre 1 y 25 min. De todas las condiciones se realizaron cuatro réplicas. Dos de las muestras de cada condición se utilizaron para la medida de color, para lo cual se troquelaron, se escanearon y se analizaron digitalmente. Las otras dos muestras se usaron para determinar la humedad.

Ensayos de cocción de creps en condiciones reales

Para llevar a cabo la cocción de las creps en condiciones reales se trató de simular el método doméstico empleado para cocinar creps, con la salvedad de que para obtener unos resultados comparables, era necesario tener un cierto control y conocimiento de las condiciones de temperatura existentes en la sartén al inicio de la cocción.

Para preparar cada crep se establecieron unas condiciones iniciales en las que la sartén está a temperatura ambiente y la placa de inducción apagada. Partiendo de estas condiciones, se enciende la placa de inducción y se selecciona el nivel de potencia 3 hasta que la temperatura en la sartén medida directamente con la cámara termográfica alcanza los 110 °C. En ese momento se vierten 70 mL de masa previamente medidos y se extienden con suaves movimientos circulares durante 5 segundos para cubrir toda la superficie de la sartén. Tras esto, se seleccionan las condiciones de potencia y tiempo predefinidas para cada una de las creps, que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de cocinados para las creps reales.

ID.	ETAPA 0 Temperatura/ Nivel de potencia	ETAPA 1 Nivel de potencia / tiempo	ETAPA 2 Nivel de potencia / tiempo
1	110 °C / P3	P3 / 120 s	P9 / 60 s
2	110 °C / P3	P6 / 300 s	-
3	110 °C / P3	P6 / 330 s	-
4	110 °C / P3	P6 / 360 s	-
5	110 °C / P3	P6 / 420 s	-
6	110 °C / P3	P7 / 120 s	-
7	110 °C / P3	P7 / 180 s	-
8	110 °C / P3	P7 / 240 s	-

Una vez transcurrido el tiempo de cocción se extrae la crep de la sartén y se deja enfriar sobre una superficie plana cubierta por papel, con la cara que estaba en contacto con la sartén hacia arriba, para evitar que se humedezca antes de escanearla. En paralelo, se captura la imagen térmica de la superficie de la sartén, inmediatamente después de retirar la crep. Las crepes obtenidas mediante este método tienen un diámetro aproximado de 210 mm.

El postprocesado de los datos experimentales y el ajuste a los diferentes modelos cinéticos planteados se realizó con el software Microsoft Excel con la herramienta SOLVER habilitada.

3. RESULTADOS

3.1. Evolución del color, humedad y pérdida de peso durante la cocción de creps a temperatura homogénea

El punto de partida para la medida del color de las creps fueron las imágenes digitalizadas obtenidas al escanearlas. En la Figura 1 se presentan a modo de ejemplo las imágenes de las creps obtenidas a diferentes tiempos de cocción para una temperatura de 160 °C. A partir de cada una de estas imágenes se obtuvieron las correspondientes coordenadas de color CIELab mediante un programa en MATLAB. Se puede observar la evolución del color conforme el tiempo de cocción aumenta desde un tono amarillo claro, propio de la masa cruda, hacia tonos tostados y dorados propios de los subproductos de la reacción de Maillard. Las imágenes digitalizadas correspondientes al resto de condiciones de cocción están recogidas en el Anexo III.

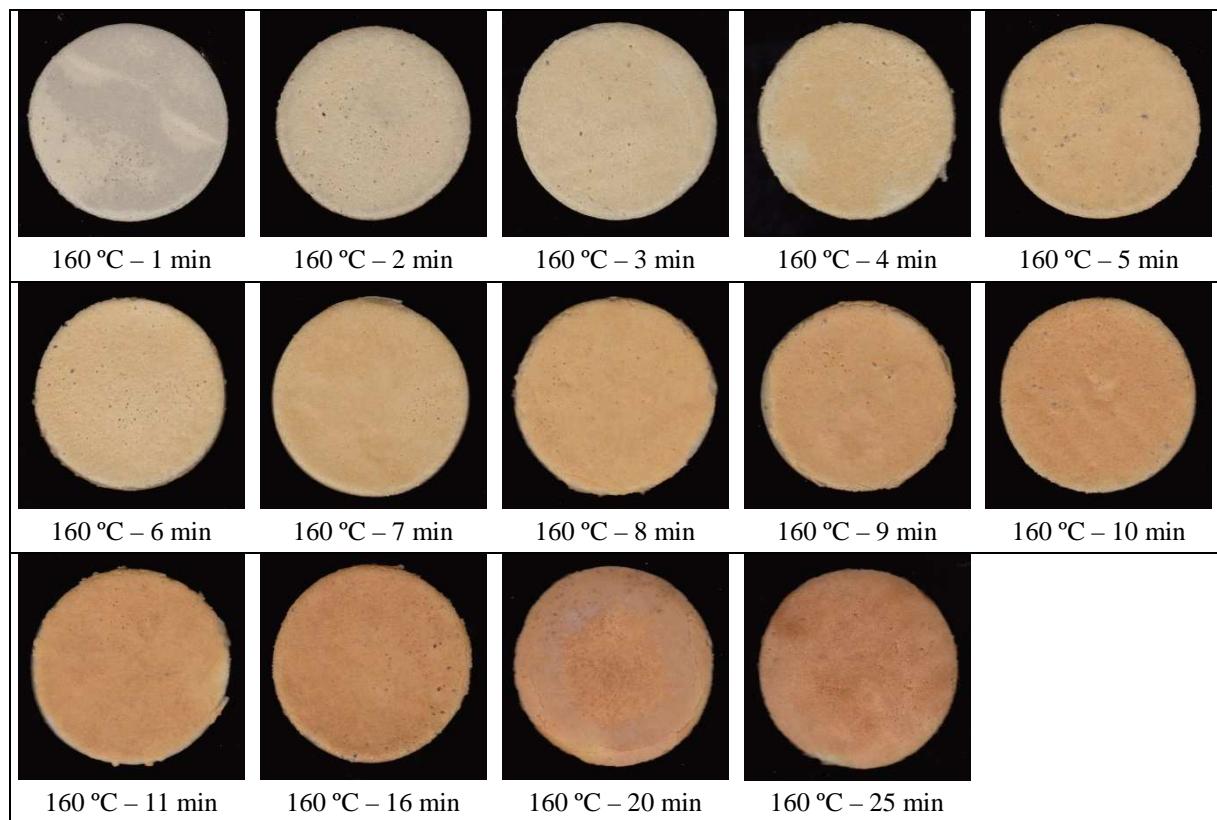


Figura 1. Imágenes digitalizadas de las creps elaboradas a 160 °C y diferentes tiempos.

En las Tablas 2 a 12 se recogen los resultados obtenidos de la evolución del color, de la humedad y de la pérdida de peso para las creps elaboradas a diferentes tiempos y temperaturas de cocción. Los valores mostrados corresponden a las medias entre réplicas, con sus correspondientes desviaciones estándar.

Además de las coordenadas de color L*, a* y b*, se incluye el color absoluto ΔE*, que es una forma más global de expresar los cambios de color, calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (3)$$

donde L_0^*, a_0^*, b_0^* son los valores iniciales de dichas coordenadas.

Tabla 2. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 110 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 110 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					66.2 ±0.2	0.0 ±0.2
1	60.7 ±0.1	5.6 ±0.1	10.5 ±0.3		64.4 ±0.2	5.1 ±0.3
2					63.2 ±0.3	8.0 ±0.4
3	62.7 ±0.3	5.8 ±0.1	10.7 ±0.1	2.3 ±0.1	63.3 ±0.4	7.8 ±0.4
4					62.1 ±0.2	10.7 ±0.3
5	64.6 ±0.2	5.5 ±0.0	10.8 ±0.0	3.9 ±1.4	60.7 ±0.4	13.9 ±0.4
6					60.0 ±0.1	15.5 ±0.2
7	65.3 ±0.6	5.4 ±0.1	11.0 ±0.3	4.7 ±1.1	59.3 ±0.2	17.0 ±0.2
9	65.2 ±0.2	5.2 ±0.0	10.4 ±0.0	4.7 ±1.4	58.4 ±0.2	18.7 ±0.3
11					57.3 ±0.3	20.9 ±0.4
16	64.8 ±0.3	5.2 ±0.1	10.0 ±0.0	5.0 ±1.1	54.4 ±0.2	25.8 ±0.2
20	64.5 ±0.4	5.2 ±0.0	10.2 ±0.2	4.8 ±0.8	53.2 ±0.4	27.7 ±0.4
25	64.6 ±0.3	5.5 ±0.1	10.7 ±0.2	5.0 ±0.9	50.9 ±0.3	31.1 ±0.4

Tabla 3. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 120 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 120 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					66.7 ±0.2	0.0 ±0.2
1	60.2 ±0.5	7.1 ±0.1	13.5 ±0.2		64.6 ±0.1	5.9 ±0.1
2					63.2 ±0.3	9.5 ±0.3
3	64.2 ±0.2	5.9 ±0.1	10.9 ±1.1	5.0 ±0.8	62.7 ±0.2	10.6 ±0.3
4					62.4 ±0.3	11.3 ±0.3
5	66.5 ±1.3	5.8 ±0.2	12.1 ±0.5	6.5 ±0.7	61.2 ±0.1	14.0 ±0.1
6					60.9 ±0.3	14.8 ±0.3
7	63.5 ±0.4	5.9 ±0.0	11.2 ±0.3	4.3 ±0.2	60.4 ±0.3	15.8 ±0.4
9	65.1 ±0.3	5.8 ±0.3	12.1 ±1.0	5.4 ±0.2	59.8 ±0.2	17.2 ±0.3
11					57.8 ±0.5	21.0 ±0.5
16	64.9 ±2.9	5.9 ±0.2	13.3 ±1.0	5.0 ±0.3	52.1 ±0.4	30.4 ±0.4
20	67.0 ±1.3	5.9 ±0.2	15.3 ±0.8	4.8 ±1.1	50.6 ±0.4	32.6 ±0.4
25	64.4 ±0.9	6.9 ±0.3	15.6 ±0.7	4.9 ±2.3	51.2 ±0.3	31.7 ±0.3

Tabla 4. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 130 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 130 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					65.5 ±0.1	0.0 ±0.2
1	60.9 ±1.1	6.1 ±0.0	10.6 ±0.9		64.1 ±0.4	4.2 ±0.4
2	62.1 ±1.3	5.6 ±0.2	8.1 ±2.5	2.9 ±1.3	62.7 ±0.3	9.9 ±0.3
3	65.2 ±1.6	5.4 ±0.0	10.7 ±0.8	4.3 ±0.5	61.7 ±0.2	10.9 ±0.3
4	65.8 ±1.5	5.3 ±0.1	11.0 ±1.3	5.0 ±0.4	61.4 ±0.4	10.5 ±0.4
5	65.9 ±1.7	5.3 ±0.1	11.1 ±0.9	5.1 ±0.6	60.6 ±0.4	12.4 ±0.4
6	67.0 ±1.6	5.2 ±0.1	11.5 ±0.4	6.3 ±0.5	60.0 ±0.2	13.8 ±0.2
7	67.1 ±1.1	5.2 ±0.1	11.9 ±0.3	6.5 ±0.2	58.8 ±0.1	16.2 ±0.1
8	66.8 ±1.3	5.4 ±0.1	12.2 ±0.5	6.2 ±0.1	±	
9	66.7 ±1.7	5.6 ±0.1	12.7 ±0.4	6.2 ±0.4	57.4 ±0.4	19.0 ±0.4
10	67.3 ±1.0	5.6 ±0.2	13.1 ±0.6	6.9 ±0.6	±	
11					55.6 ±0.3	23.0 ±0.3
16	65.1 ±2.1	7.1 ±0.6	16.0 ±0.3	7.0 ±0.5	53.0 ±0.1	28.3 ±0.2
20	65.6 ±1.3	6.9 ±0.4	15.3 ±0.9	5.7 ±0.5	51.4 ±0.5	28.4 ±0.5
25	63.3 ±1.1	7.5 ±1.2	18.2 ±1.3	8.1 ±0.1	48.5 ±0.4	32.9 ±0.4

Tabla 5. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 140 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 140 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					66.0 ±0.3	0.0 ±0.3
1	67.3 ±0.1	5.6 ±0.1	10.6 ±0.1		65.0 ±0.2	2.8 ±0.2
2	68.0 ±0.7	5.5 ±0.1	11.2 ±0.5	1.0 ±0.7	64.0 ±0.1	5.4 ±0.2
3	68.3 ±0.4	5.4 ±0.0	12.1 ±0.5	1.9 ±0.5	63.4 ±0.3	7.1 ±0.3
4	69.0 ±0.2	5.4 ±0.1	13.1 ±0.3	3.0 ±0.3	62.2 ±0.2	9.9 ±0.3
5	67.8 ±0.1	5.3 ±0.0	14.6 ±0.2	4.1 ±0.0	61.3 ±0.3	12.0 ±0.3
6	68.1 ±0.4	5.5 ±0.1	15.1 ±0.1	4.6 ±0.1	61.1 ±0.5	12.5 ±0.5
7	67.0 ±0.3	5.4 ±0.1	17.5 ±0.2	7.1 ±0.1	60.5 ±0.5	13.8 ±0.5
8	66.0 ±0.2	5.4 ±0.0	18.2 ±0.1	8.1 ±0.1		
9	64.9 ±0.0	5.5 ±0.2	19.4 ±0.2	9.7 ±0.2	59.8 ±0.4	15.3 ±0.4
10	64.5 ±0.0	5.5 ±0.5	20.2 ±0.0	10.7 ±0.1		
11	64.9 ±0.4	5.7 ±0.1	19.9 ±0.5	10.3 ±0.2	58.4 ±0.4	18.1 ±0.4
16	61.5 ±0.7	6.1 ±0.4	23.1 ±0.3	15.4 ±0.6	55.3 ±0.4	23.9 ±0.5
20	59.9 ±0.7	6.0 ±0.4	22.9 ±0.3	16.7 ±0.3	53.7 ±0.5	26.4 ±0.5
25	59.7 ±1.0	6.6 ±1.0	21.3 ±1.0	16.0 ±0.1	50.6 ±0.5	31.0 ±0.5

Tabla 6. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 150 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 150 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					65.7 ±0.2	0.0 ±0.2
1	66.0 ±0.3	5.7 ±0.1	12.1 ±0.3		63.0 ±0.2	7.3 ±0.3
2	67.7 ±0.4	5.9 ±0.1	12.0 ±0.1	1.7 ±0.0	61.4 ±0.4	11.2 ±0.4
3	66.6 ±0.8	6.2 ±0.1	13.1 ±0.1	1.5 ±0.2	60.7 ±0.5	13.0 ±0.5
4	67.4 ±0.1	6.4 ±0.1	14.4 ±0.2	2.8 ±0.2	59.9 ±0.2	14.8 ±0.2
5	65.1 ±0.6	7.8 ±0.2	17.0 ±0.2	5.4 ±0.0	59.3 ±0.2	15.8 ±0.2
6	63.5 ±0.0	7.4 ±0.3	16.7 ±0.7	5.5 ±0.2	58.4 ±0.3	18.5 ±0.4
7	64.0 ±0.6	8.7 ±0.3	19.9 ±0.3	8.6 ±0.7	57.0 ±0.4	21.3 ±0.4
8	63.8 ±0.6	9.9 ±0.5	21.3 ±0.3	10.4 ±0.2	±	
9	61.5 ±0.2	11.3 ±0.1	20.5 ±0.1	11.1 ±0.3	55.9 ±0.2	22.2 ±0.2
10	62.0 ±1.7	11.0 ±0.4	21.2 ±0.5	11.3 ±0.8	±	
11	61.5 ±0.1	11.7 ±0.5	21.4 ±0.5	12.0 ±0.3	54.4 ±0.3	24.0 ±0.4
16	58.4 ±0.2	14.9 ±0.0	21.5 ±0.0	15.2 ±0.3	51.7 ±0.4	26.3 ±0.4
20	55.4 ±1.2	16.4 ±0.7	20.7 ±0.2	17.4 ±0.8	49.6 ±0.6	28.8 ±0.6
25	55.0 ±0.9	15.8 ±0.4	18.6 ±0.5	16.3 ±1.0	47.1 ±0.5	31.6 ±0.5

Tabla 7. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 160 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 160 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					65.3 ±0.2	0.0 ±0.2
1	65.8 ±0.0	5.5 ±0.0	8.8 ±0.1		62.2 ±0.3	8.3 ±0.3
2	68.1 ±0.1	5.7 ±0.0	12.9 ±0.1	4.8 ±0.1	61.0 ±0.5	11.0 ±0.5
3	66.7 ±0.3	6.9 ±0.2	15.5 ±0.3	6.9 ±0.4	60.0 ±0.1	13.3 ±0.2
4	65.3 ±0.5	8.5 ±0.1	18.9 ±0.4	10.6 ±0.5	58.5 ±0.4	16.4 ±0.4
5	66.2 ±0.8	9.1 ±0.4	19.4 ±0.6	11.3 ±0.8	56.9 ±0.3	19.4 ±0.4
6	64.5 ±0.0	9.8 ±0.4	19.6 ±0.6	11.7 ±0.4	57.2 ±0.2	18.8 ±0.2
7	63.9 ±0.1	10.6 ±0.6	20.7 ±0.5	13.1 ±0.8	56.1 ±0.3	21.0 ±0.3
8	62.6 ±0.6	12.9 ±0.6	22.2 ±0.2	15.7 ±0.7		
9	60.0 ±0.5	13.6 ±0.2	20.6 ±0.3	15.4 ±0.6	53.2 ±0.2	25.9 ±0.2
10	59.5 ±0.2	14.5 ±0.1	21.1 ±0.2	16.5 ±0.2		
11	59.0 ±0.5	14.9 ±0.2	20.6 ±0.5	16.6 ±0.0	51.0 ±0.3	29.2 ±0.3
16	55.9 ±1.7	14.7 ±0.7	18.8 ±1.7	16.9 ±0.3	51.5 ±0.4	28.4 ±0.4
20	56.4 ±0.2	15.3 ±0.4	17.6 ±0.8	16.2 ±0.8	50.4 ±0.3	30.0 ±0.3
25	54.8 ±0.2	15.1 ±1.2	17.5 ±0.1	17.0 ±0.5	49.4 ±0.5	31.4 ±0.5

Tabla 8. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 170 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 170 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					66.4 ±0.2	0.0 ±0.3
1	67.1 ±0.4	6.2 ±0.0	12.5 ±0.3		63.3 ±0.3	8.5 ±0.2
2	66.0 ±0.4	7.0 ±0.2	15.8 ±0.7	3.5 ±0.7	61.4 ±0.5	11.4 ±0.2
3	65.0 ±0.1	9.0 ±0.1	19.7 ±0.3	8.0 ±0.5	60.6 ±0.1	13.1 ±0.3
4	63.1 ±0.3	10.9 ±0.5	20.9 ±0.8	10.4 ±1.1	59.4 ±0.4	17.1 ±0.5
5	62.0 ±1.4	12.4 ±1.2	21.8 ±0.3	12.2 ±1.5	58.6 ±0.3	18.4 ±0.3
6	59.6 ±0.4	13.5 ±0.6	21.6 ±0.3	13.9 ±0.7	57.7 ±0.2	19.9 ±0.4
7	57.5 ±0.4	14.8 ±0.5	21.5 ±0.5	15.7 ±0.3	56.3 ±0.3	22.5 ±0.2
8	56.1 ±0.7	15.6 ±0.3	19.6 ±0.7	16.1 ±0.3		
9	53.9 ±0.6	14.2 ±0.0	17.5 ±0.6	16.2 ±0.6	55.0 ±0.2	26.4 ±0.2
10	56.8 ±0.6	14.5 ±0.6	19.2 ±0.5	14.3 ±0.9		
11	56.9 ±0.8	15.0 ±0.2	19.1 ±0.5	15.0 ±0.7	53.4 ±0.3	27.6 ±0.4
16	53.8 ±0.5	15.9 ±0.1	16.6 ±0.5	17.0 ±0.4	50.6 ±0.4	32.1 ±0.6
20	51.2 ±0.3	15.8 ±0.5	14.8 ±0.4	18.7 ±0.6	47.2 ±0.3	36.5 ±0.5
25	54.3 ±0.6	15.0 ±0.4	15.2 ±0.4	15.8 ±0.9	44.7 ±0.5	39.3 ±0.4

Tabla 9. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 180 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 180 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					65.9 ±0.3	0.0 ±0.3
1	66.2 ±0.8	6.8 ±0.7	15.4 ±1.2		63.2 ±0.4	7.3 ±0.4
2	64.0 ±0.3	9.7 ±0.2	19.9 ±0.1	5.7 ±1.8	61.5 ±0.2	11.2 ±0.2
3	60.1 ±1.0	13.6 ±0.9	21.4 ±0.1	10.9 ±0.5	60.2 ±0.4	14.3 ±0.4
4	56.1 ±1.8	15.4 ±0.3	20.3 ±0.5	14.1 ±2.3	59.0 ±0.4	16.7 ±0.4
5	55.4 ±0.1	15.9 ±0.1	20.0 ±0.2	14.8 ±1.4	58.1 ±0.4	18.5 ±0.4
6	54.2 ±0.5	16.4 ±0.2	19.3 ±0.6	15.9 ±1.2	57.2 ±0.2	15.7 ±0.2
7	55.1 ±0.5	16.3 ±0.0	18.6 ±0.3	14.9 ±1.7	55.6 ±0.7	18.0 ±0.8
8	51.9 ±0.5	16.3 ±0.0	15.9 ±0.6	17.2 ±0.7	±	
9	54.3 ±0.6	16.3 ±0.1	17.7 ±0.9	15.4 ±1.6	54.2 ±0.4	19.0 ±0.4
10	53.1 ±0.7	16.4 ±0.2	16.8 ±0.2	16.2 ±0.7	±	
11	51.0 ±1.7	16.1 ±0.6	14.7 ±1.9	17.9 ±0.2	52.5 ±0.2	22.4 ±0.2
16	53.9 ±0.9	14.9 ±0.4	14.5 ±0.7	14.7 ±0.4	49.7 ±0.3	32.7 ±0.3
20	53.5 ±0.6	14.7 ±0.4	14.3 ±0.6	14.9 ±0.4	46.7 ±0.4	33.6 ±0.5
25	51.5 ±1.5	14.2 ±0.2	12.8 ±0.8	16.7 ±2.4	44.4 ±0.6	38.9 ±0.6

Tabla 10. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 190 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 190 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
0					65.5 ±0.3	0.0 ±0.3
1	65.7 ±0.6	8.3 ±0.5	18.1 ±0.5		63.7 ±0.3	5.0 ±0.4
2	63.6 ±0.3	10.9 ±0.0	21.2 ±0.1	4.6 ±0.8	60.8 ±0.2	8.4 ±0.2
3	59.5 ±0.7	13.9 ±0.4	22.1 ±0.4	9.3 ±1.0	59.8 ±0.2	11.6 ±0.2
4	57.5 ±0.3	15.7 ±0.1	21.5 ±0.0	11.6 ±1.1	58.3 ±0.4	12.6 ±0.4
5	55.6 ±0.6	16.3 ±0.2	19.5 ±0.3	13.4 ±1.4	57.7 ±0.4	17.4 ±0.4
6	55.2 ±0.2	16.7 ±0.1	19.5 ±0.0	13.5 ±0.6	56.4 ±0.3	17.1 ±0.4
7	52.5 ±0.8	16.5 ±0.1	16.1 ±0.6	15.7 ±0.0	55.0 ±0.3	21.6 ±0.4
8	52.3 ±0.8	16.6 ±0.1	16.5 ±0.8	15.9 ±1.5		
9	51.5 ±0.2	16.5 ±0.1	15.8 ±0.2	16.5 ±0.6	53.3 ±0.5	23.8 ±0.5
10	50.8 ±1.4	16.1 ±0.4	14.5 ±1.6	17.3 ±0.7		
11	50.8 ±0.6	16.1 ±0.1	14.7 ±0.2	17.2 ±1.2	51.0 ±0.4	22.8 ±0.4
16	49.0 ±0.8	14.6 ±0.1	11.6 ±0.4	19.0 ±0.6	47.9 ±0.5	29.4 ±0.5
20	51.3 ±0.8	13.6 ±0.3	12.0 ±0.4	16.5 ±0.9	45.1 ±0.6	37.1 ±0.6
25	50.1 ±0.6	13.4 ±0.2	11.4 ±0.6	17.8 ±0.4	43.8 ±0.4	38.0 ±0.4

Tabla 11. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a 200 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 200 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	65.7 ±0.5	8.7 ±0.2	19.7 ±0.2			
2	61.9 ±0.6	12.9 ±0.4	22.4 ±0.1	6.3 ±0.2		
3	59.9 ±0.5	14.3 ±0.3	21.0 ±0.5	8.2 ±0.5		
4	56.3 ±0.4	15.7 ±0.6	19.3 ±0.4	11.8 ±0.6		
5	53.2 ±0.6	16.4 ±0.5	17.1 ±0.5	15.0 ±0.4		
6	52.0 ±0.7	16.1 ±0.4	15.6 ±0.4	16.1 ±0.1		
7	50.0 ±0.4	15.7 ±0.4	13.5 ±0.6	18.3 ±0.3		
8	49.4 ±0.7	15.7 ±0.5	13.2 ±0.9	18.9 ±0.7		
9	48.3 ±0.9	15.1 ±0.3	11.7 ±0.6	20.1 ±0.6		
10	53.3 ±1.1	13.6 ±0.8	12.9 ±0.6	15.0 ±0.7		

Tabla 12. Coordenadas de color, humedad y pérdida de peso de las creps cocinadas a más de 200 °C.

TEMPERATURA SARTÉN 210 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	63.1 ±0.7	10.7 ±0.4	21.2 ±0.3			
2	60.9 ±0.5	13.2 ±0.4	22.3 ±0.4	3.5 ±0.4		
5	51.7 ±1.0	15.7 ±0.2	14.8 ±0.6	14.0 ±0.8		
8	50.8 ±1.1	13.7 ±0.5	11.8 ±0.9	15.8 ±0.9		
10	47.4 ±0.9	13.1 ±0.5	9.8 ±0.7	19.5 ±0.7		
TEMPERATURA SARTÉN 220 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	61.9 ±0.7	11.2 ±0.6	21.7 ±0.4			
2	57.1 ±0.8	15.1 ±0.4	20.3 ±0.2	6.3 ±0.6		
5	48.4 ±0.9	15.8 ±0.4	12.6 ±0.6	17.0 ±0.8		
8	48.6 ±1.1	13.4 ±0.6	10.3 ±0.8	17.7 ±0.9		
10	43.7 ±1.2	12.7 ±0.7	7.5 ±0.7	23.2 ±1.2		
TEMPERATURA SARTÉN 230 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	61.3 ±0.7	12.8 ±0.3	21.6 ±0.6			
2	55.1 ±0.5	15.6 ±0.6	18.4 ±0.4	3.3 ±0.4		
5	46.3 ±1.0	14.3 ±0.6	9.7 ±0.5	9.2 ±0.6		
8	43.8 ±1.1	12.2 ±0.6	6.8 ±0.7	19.5 ±0.8		
TEMPERATURA SARTÉN 240 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	60.0 ±0.5	13.1 ±0.2	21.2 ±0.2			
5	46.3 ±0.9	14.6 ±0.4	9.9 ±0.5	17.8 ±0.3		
8	42.6 ±1.1	11.1 ±0.6	5.7 ±0.5	23.3 ±0.8		
TEMPERATURA SARTÉN 250 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	56.4 ±0.4	14.9 ±0.6	18.8 ±0.3			
3	46.3 ±0.8	14.3 ±0.6	9.7 ±0.5	13.7 ±0.8		
4	43.8 ±0.9	12.2 ±0.6	6.8 ±0.6	17.6 ±0.9		
TEMPERATURA SARTÉN 260 °C						
Tiempo (min)	L*	a*	b*	ΔE*	Humedad (%)	Pérdida de peso (%)
1	54.7 ±0.6	15.3 ±0.4	19.0 ±0.4			
2	49.8 ±0.9	15.8 ±0.6	14.3 ±0.4	6.9 ±0.7		
5	46.3 ±1.2	12.7 ±0.8	8.7 ±0.6	13.6 ±1.1		

Según los datos de las Tablas 2 a 12, por debajo de 140 °C el valor de L^* experimenta un leve aumento al inicio de la cocción, y a partir de los 5 o 6 min se estabiliza en valores en torno a 65. Para las tandas a temperaturas superiores, se observan mayores cambios de color, con un comportamiento diferente. A 140, 150 y 160 °C, la luminosidad alcanza su valor máximo en los 4 primeros minutos de cocción y posteriormente disminuye gradualmente, hasta 60 en el caso de 140 °C y hasta 55 a 150 y 160 °C. Shibukawa et al. (1989) atribuyen este comportamiento al secado de la superficie, mientras que Broyart et al. (1998) lo achacan, además, al cambio inicial de volumen. Es posible que la causa sea el conjunto de los cambios físicos que ocurren en la superficie de la masa, ya que en los primeros minutos de cocción se torna regular y lisa, aumentando su capacidad para reflejar la luz respecto a la superficie más irregular medida tras el primer minuto (Purlis y Salvadori, 2007). A partir de 170 °C, el valor de L^* disminuye directamente conforme avanza la cocción, sin observarse el aumento inicial, posiblemente porque la evolución es más rápida y tiene lugar durante los 60 segundos iniciales. La cocción a estas altas temperaturas, se caracteriza por el rápido oscurecimiento de la superficie debido a reacciones de Maillard siguiendo una cinética que algunos autores han descrito como de primer orden (Ibarz et al, 2000). En algunos trabajos además han encontrado una buena correlación entre este descenso de la luminosidad durante el cocinado de masas con la formación de HMF (Ameur et al., 2006). Al final de la cocción la luminosidad tendría una tendencia asintótica hacia un valor correspondiente al de una muestra quemada (Zanoni et al., 1995).

Los datos de la coordenada a^* recogidos en las tandas a 110, 120 y 130 °C indican que a esas temperaturas tan apenas se producen cambios, manteniéndose en valores próximos al inicial (en torno a 6). A partir de 140 °C, se observa un aumento de dicha coordenada con el tiempo de cocción, tendiendo hacia un valor máximo en torno a 16. Con temperaturas por encima de los 170 °C, este máximo se alcanza antes de los 10 minutos de cocción, disminuyendo posteriormente al prolongarse la cocción durante más tiempo, como si los compuestos responsables del cambio de color hacia tonalidades marronáceas se degradasen.

Los datos obtenidos en la coordenada b^* muestran que a 110 °C no se producen apenas cambios en esta coordenada, y aunque a partir de 120 °C comienza a observarse alguna modificación, no aparece una evolución sostenida hasta los 140 °C. A partir de esa temperatura, se alcanza un valor máximo cercano a 21. Al igual que ocurre en la coordenada a^* , a temperaturas altas y tiempos prolongados, se produce un descenso. La caída en el valor de b^* es especialmente abrupta por encima de 200 °C, ya que los compuestos responsables del cambio de color que han experimentado las creps se degradan. En esta etapa, en la que el tiempo de cocción excede al que se utilizaría en el proceso de elaboración, la superficie de la crep se puede describir como quemada.

Como resultado de los cambios descritos en las coordenadas L^* , a^* y b^* , el cambio de color absoluto, ΔE^* , muestra con el tiempo de cocción una tendencia ascendente a partir de 140 °C. El aumento del color absoluto es más rápido conforme más alta es la temperatura de cocción, hasta alcanzar asintóticamente un valor máximo de 16-17 en las tandas de hasta 200 °C. Por encima de los 200 °C el cambio de color absoluto sobrepasa este límite debido a la fuerte caída de la luminosidad. Cuando la crep ya está cocida y se prolonga el tiempo de cocción, la crep se torna muy oscura y se quema en una etapa de degradación excesiva. La humedad de las muestras desciende con el tiempo de cocción, a mayor velocidad cuanto más alta sea la temperatura, desde un valor inicial en torno al 65.8 % (masa sin cocinar) hasta alcanzar a los 25 minutos, valores entre el 51.2 y el 43.8%, dependiendo de la temperatura de cocción. En cuanto a la pérdida de peso, se observa un comportamiento análogo al de la humedad pero en sentido ascendente, encontrándose los datos en un abanico entre el 31.0 y el 39.8%.

3.2. Cinética de cambios de color

Los cambios que experimentan las creps a temperaturas inferiores a 140 °C son pequeños comparados con los que sufren a partir de esa temperatura, ya que a bajas temperaturas la reacción de Maillard se produce a una velocidad tan lenta que apenas se manifiesta en cambios de color. La escasa extensión de la reacción de Maillard a bajas temperaturas también se pone de manifiesto en la ausencia de compuestos como acrilamida e hidroximetilfurfural (Granda et al., 2004).

Con los datos resultantes de las medidas de color a distintos tiempos durante el cocinado a temperatura entre 140 °C y 190 °C, se han obtenido los modelos cinéticos para el color absoluto, ΔE^* , y para la coordenada a^* .

Los valores experimentales obtenidos se ajustaron a un modelo cinético de primer orden, de forma análoga a la que otros autores han realizado para los cambios de color de la corteza de pan (Zanoni et al., 1995; Purlis y Salvadori, 2009) y para la evolución de la coordenada L^* en galletas (Broyart et al., 1998). La ecuación a la que se ajustaron los datos experimentales es:

$$\Delta E^* = \Delta E_\infty^* \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (4)$$

donde ΔE_∞^* es color absoluto a tiempo infinito, ya que los datos experimentales tienden de forma asintótica a un valor comprendido entre 15.8 y 17.8, mientras que el modelo matemático se ajusta asumiendo un ΔE^* de 17 para todas las temperaturas con un resultado aceptable.

En la Figura 2 se muestran los datos experimentales del color absoluto y los predichos por la ecuación planteada. Existe una gran diferencia en el desarrollo del color entre las creps elaboradas a 140 y 150 °C y el resto de temperaturas. Para un mismo tiempo de cocción, entre 160 y 190 °C el cambio de color máximo es de cuatro unidades y a los diez minutos el color ya se ha desarrollado casi por completo, mientras que a 140 y 150 °C el cambio más acusado en el valor de ΔE^* se produce a partir de ese momento.

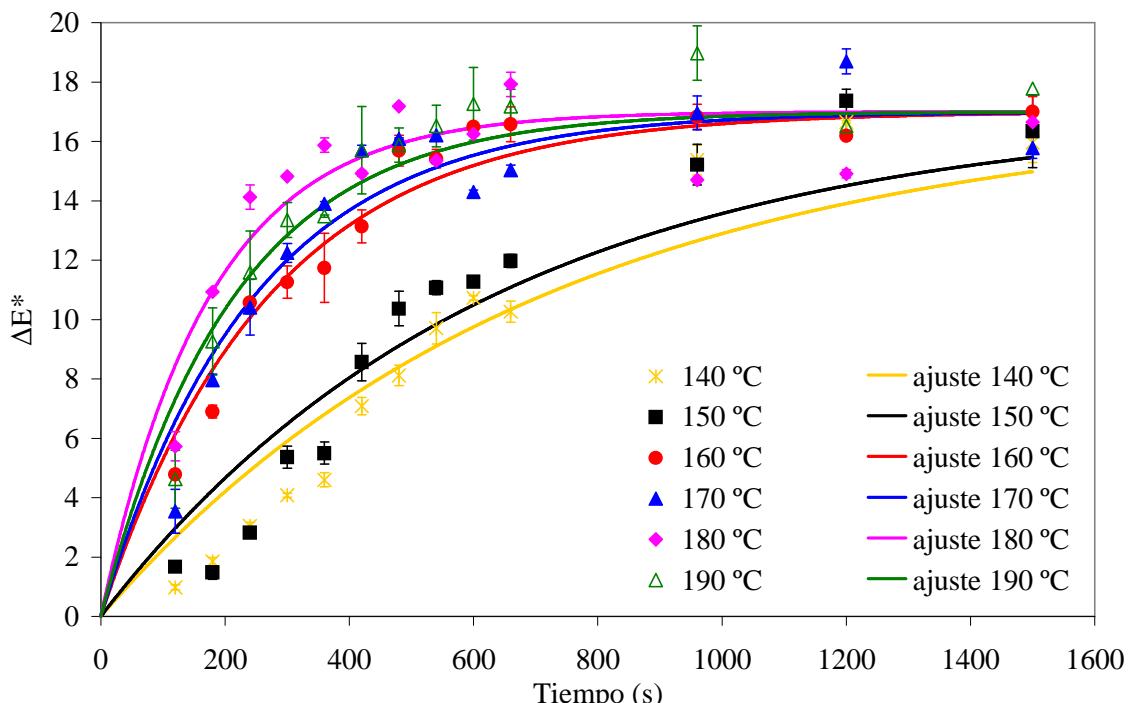


Figura 2. Datos experimentales y predichos según una cinética de primer orden para la evolución del color absoluto.

Puesto que la mayor contribución en el cambio del color absoluto procede de la evolución de la coordenada a^* durante la cocción, se obtiene también la cinética para ésta coordenada. En este caso también se han ajustado los datos experimentales a una ecuación de primer orden:

$$a^* = a_{\infty}^* + (a_{\infty}^* - a_0^*) \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (5)$$

donde a_0^* es el valor inicial de esta coordenada (5.0) y a_{∞}^* el valor al que tiende a tiempo infinito (16.0).

En la Figura 3 se muestran los datos experimentales y los predichos según la ecuación anterior (ec. 5). Para la coordenada de color a^* , los cambios son graduales con la temperatura, a diferencia de lo que ocurría con el color absoluto. A los 5 minutos para 180 y 190 °C prácticamente ya se han producido todos los cambios en la coordenada a^* , alcanzando el valor al que tiende.

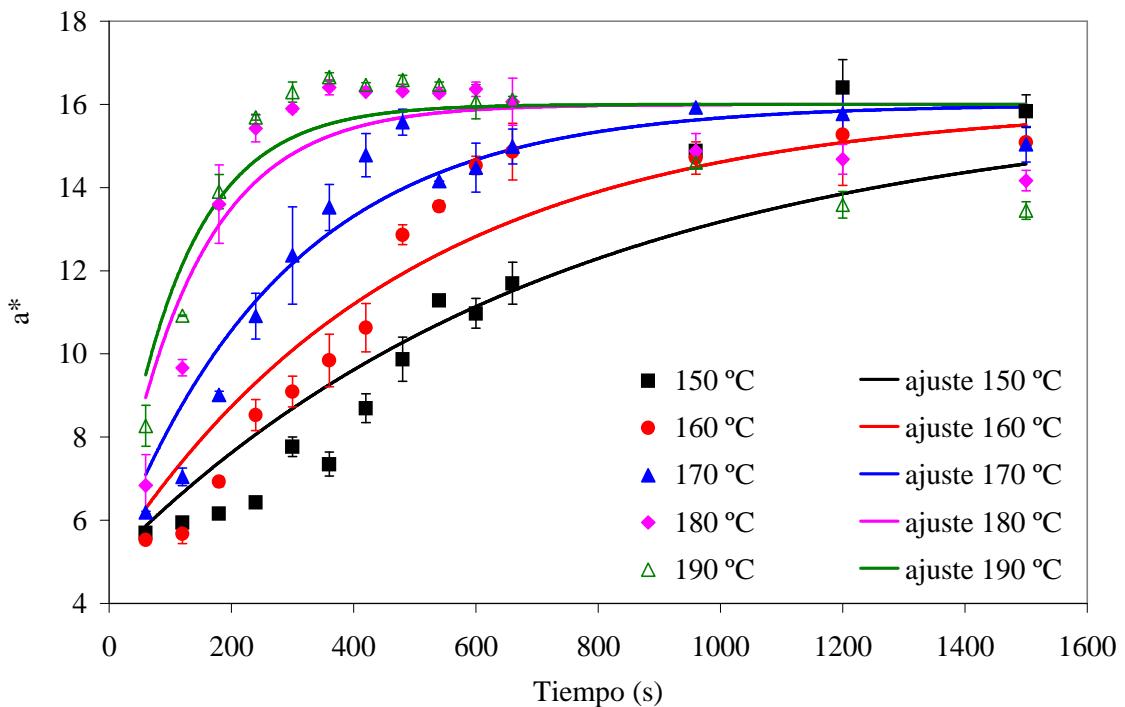


Figura 3. Datos experimentales y predichos según una cinética de primer orden para la evolución de la coordenada a^* .

Se ha considerado una dependencia de las constantes cinéticas con la temperatura tipo Arrhenius, tanto para el color absoluto como para la coordenada a^* .

En las Figuras 4 y 5 se representa la evolución del logaritmo neperiano de la constante cinética frente a la inversa de la temperatura y los correspondientes ajustes lineales.

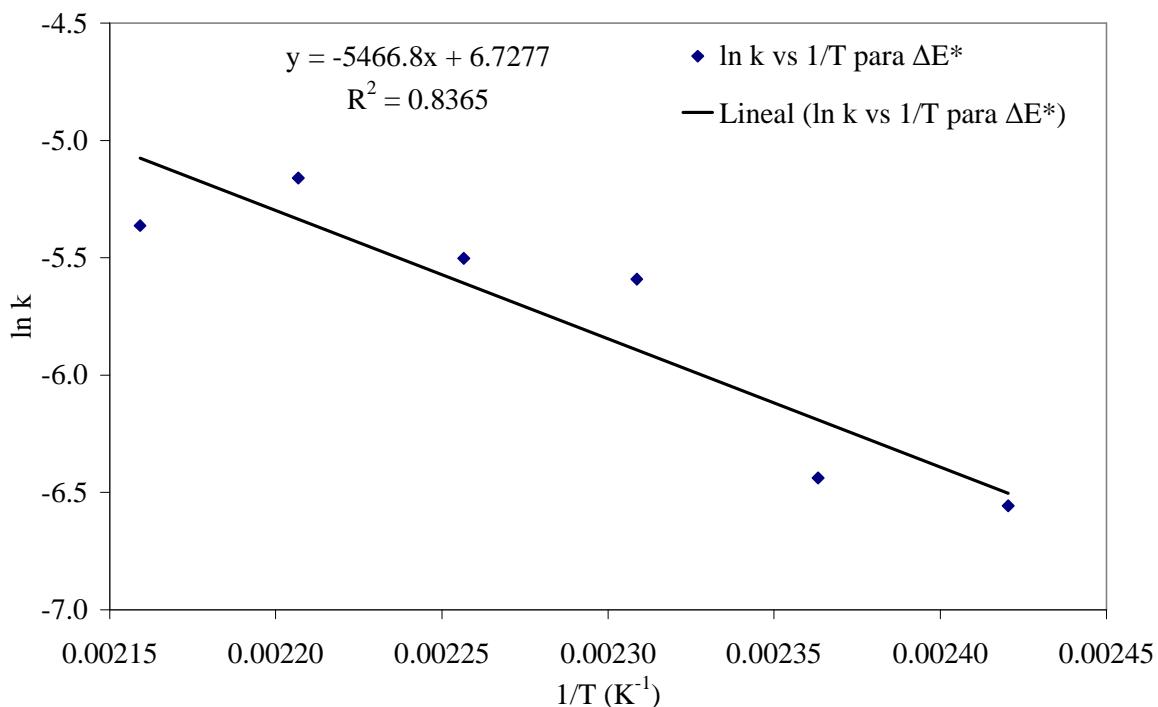


Figura 4. Dependencia de la constante cinética del color absoluto, ΔE^* , con la temperatura de cocción.

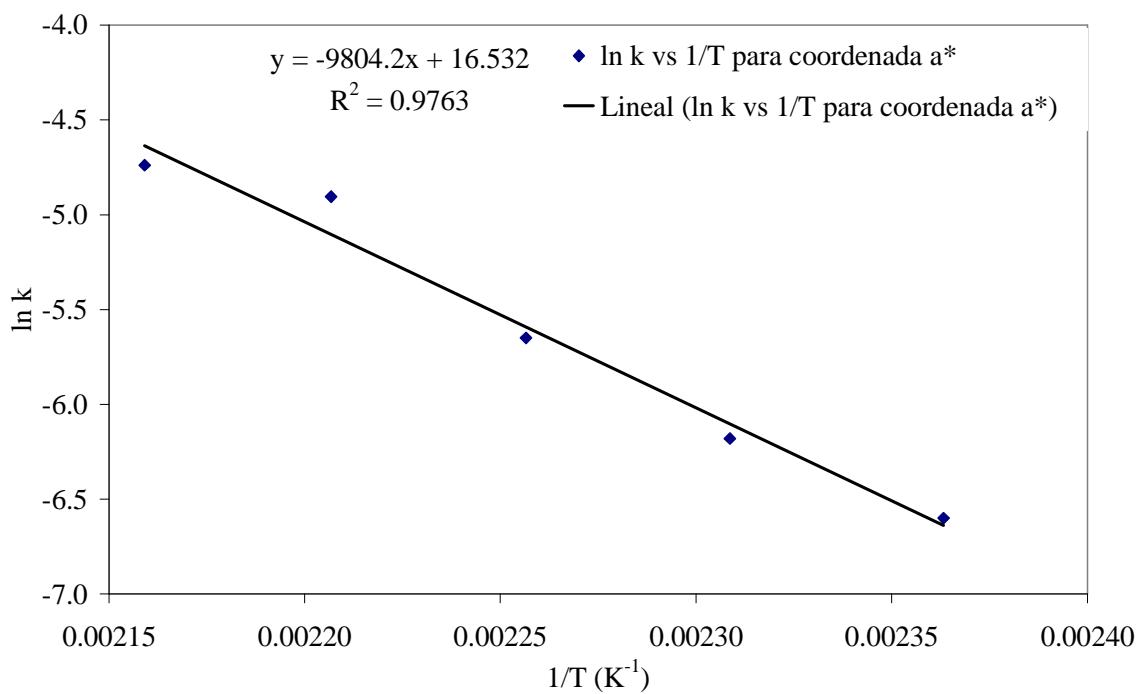


Figura 5. Dependencia de la constante cinética de la coordenada a^* con la temperatura de cocción.

En el caso de la coordenada a^* la correlación entre el logaritmo neperiano de la constante cinética y la inversa de la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius, con un coeficiente de regresión de 0.9763. Sin embargo, la constante cinética para el cambio de color absoluto presenta una correlación peor ($R^2 = 0.8365$). Esto se debe a que los cambios en el color absoluto a 190 °C eran menores que a 180 °C, como se pone de manifiesto en los valores de las constantes cinéticas a esas temperaturas. Los valores de k_o y E_a para cada caso se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de k_o y E_a para la evolución según una cinética de primer orden de ΔE^* y a^* , durante la cocción de creps.

ΔE^*	k_o (s^{-1})	E_a ($J \cdot mol^{-1}$)
	742.5	45006
a^*	15.28E6	81554

En los estudios sobre tostado de corteza de pan realizados por Zanoni (1995) se obtuvieron los siguientes valores para la cinética de variación de ΔE^* : $k_o = 42.0 s^{-1}$ y $E_a = 64151 J/mol$. Aunque dado que tanto el producto objeto de estudio, como las condiciones de cocción son bastante diferentes, la comparación directa de los valores no tiene sentido, sin embargo si es significativo el hecho de que el modelo cinético obtenido sea semejante.

3.3. Cinética de pérdida de agua

De forma similar al color, con los datos resultantes de las medidas de humedad de las creps tras el cocinado se ha determinado la cinética de pérdida de agua considerando una cinética de primer orden. La ecuación de ajuste ha sido:

$$H = H_0 + (H_\infty - H_0) \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (6)$$

donde H_0 es el valor inicial de humedad (66.0 %) y H_∞ el valor al que tiende a tiempo infinito (40.0 %).

La Figura 6 muestra los datos experimentales obtenidos y los predichos según la ecuación anterior.

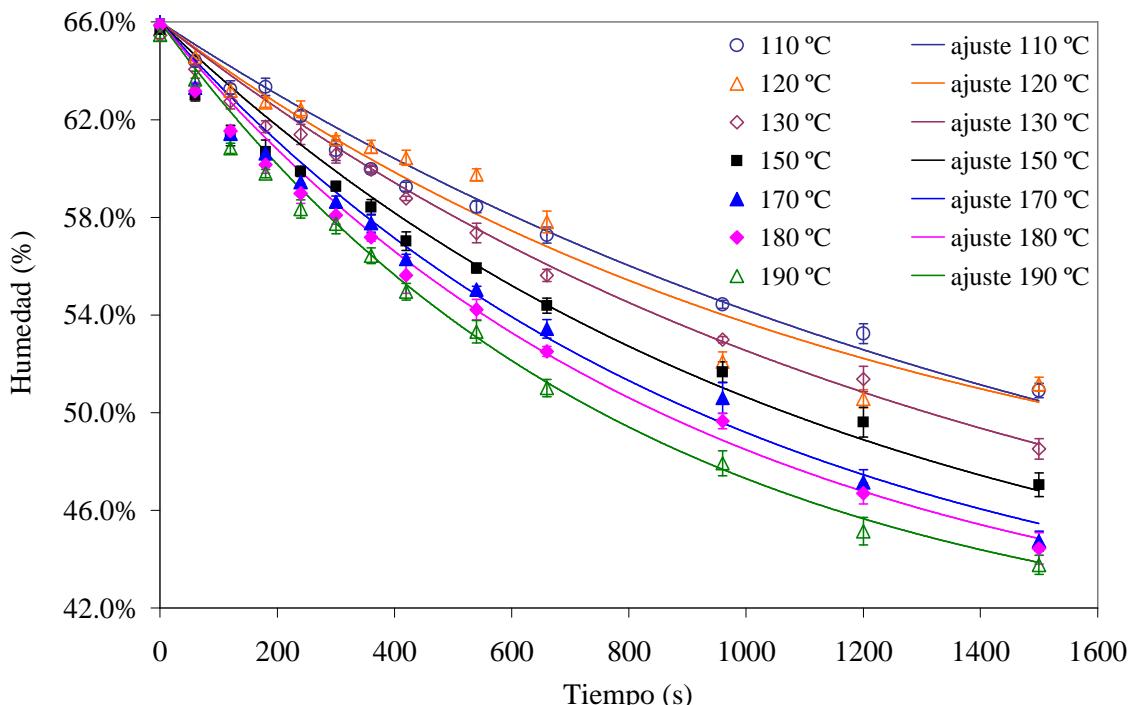


Figura 6. Datos experimentales y predichos según una cinética de primer orden para la evolución de la humedad.

Atendiendo a los datos experimentales, se encuentran valores de humedad finales entre el 51,2 % (120 °C) y el 43,8% (190 °C), siguiendo la relación, a priori lógica, de menor porcentaje de humedad para una mayor temperatura y mismos tiempos de cocción. Se pueden establecer semejanzas

entre la evolución de la humedad de las creps y la pérdida de agua en un proceso de secado. Al principio el agua se pierde a velocidad constante hasta que se alcanza un punto crítico en el que la superficie de la crep deja de estar saturada y entonces la pérdida de humedad se ralentiza cada vez más, aproximándose asintóticamente al valor final.

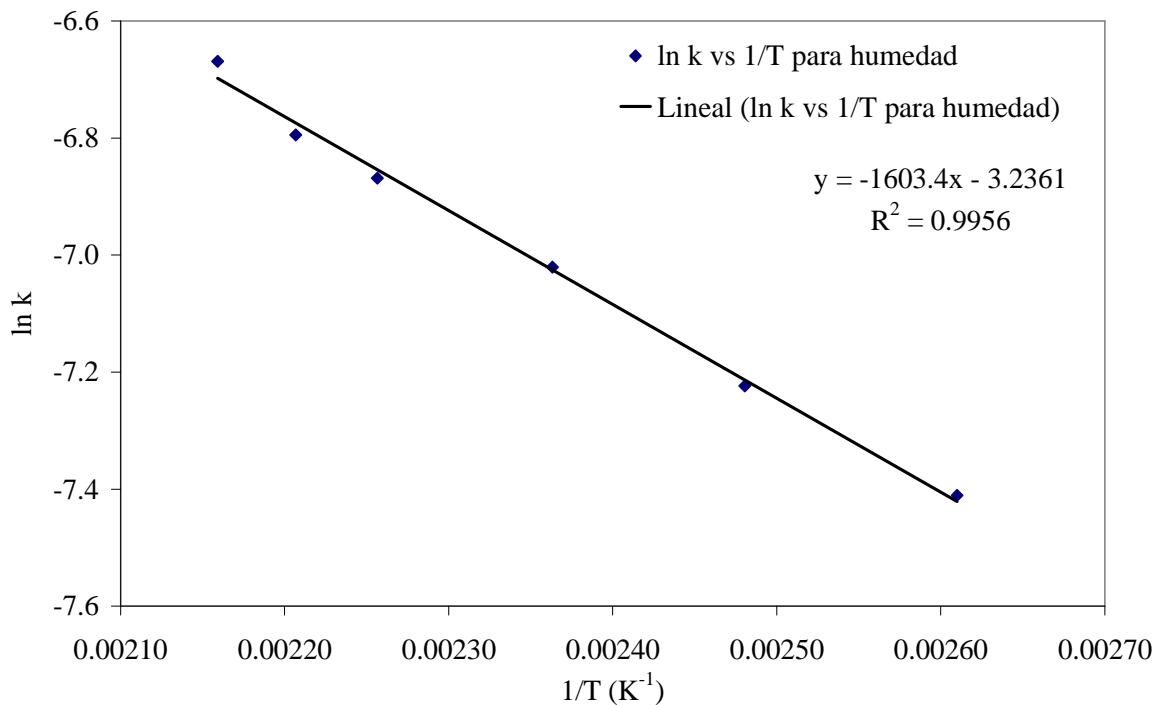


Figura 7. Variación de la constante cinética de pérdida de humedad con la temperatura de cocción.

La constante cinética de pérdida de humedad varía con la temperatura del modo que se muestra en la Figura 7. La correlación entre el logaritmo neperiano de la constante cinética y la inversa de la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius, con un coeficiente de regresión de 0.99451. Los valores de k_0 y de la energía de activación, E_a , son de 0.0393 s^{-1} y de $13331 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}$, respectivamente.

3.4. Relación entre cambio de color y humedad

La Figura 8 muestra la relación existente entre el cambio de color absoluto y la humedad de las creps para diferentes temperaturas.

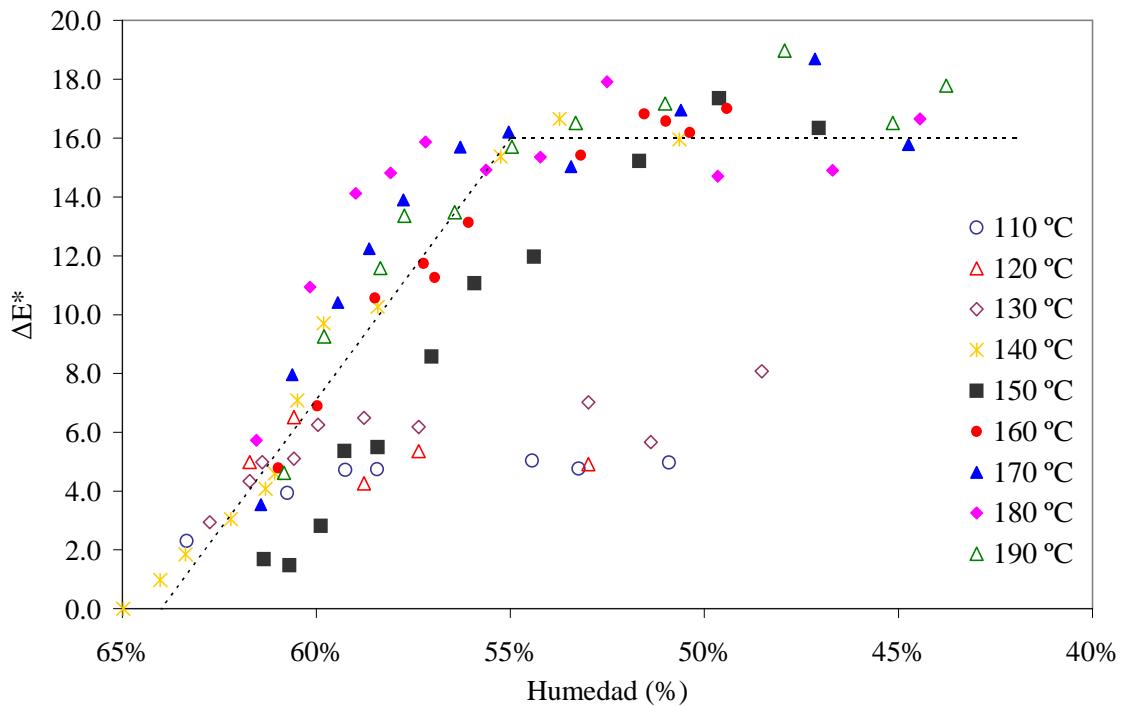


Figura 8. Relación entre el cambio de color absoluto y la humedad de las creps.

Para temperaturas mayores de 140 °C, en las que el color de las creps llega a desarrollarse completamente, el cambio en el color absoluto se produce cuando la humedad desciende desde el 65 hasta el 55 %. A partir de ese punto, aunque se sigue produciendo una pérdida de agua, ésta no se acompaña de una modificación en el color. Este intervalo de humedades corresponde además con el periodo de secado a velocidad prácticamente constante. Como se observa en la Figura 8, no se puede establecer una relación clara entre la generación de colores tostados y la pérdida de humedad con la temperatura, si bien en términos generales se puede decir que hay una relación lineal entre ΔE^* y la humedad en el periodo de secado a velocidad constante.

Así, Purlis y Salvadori (2007) han propuesto la siguiente ecuación para relacionar los cambios de color en la corteza del pan con la humedad:

$$\Delta E^* = k \cdot WL \quad (7)$$

donde $k = k_0 \cdot T_{horno} + k_1$, es la tasa de pardeamiento y se asume que es una constante de proporcionalidad dependiente de la temperatura del horno y WL es la pérdida de peso.

3.5. Predicción de la temperatura a partir del color absoluto

Uno de los objetivos del trabajo era estudiar la viabilidad de efectuar predicciones de temperatura en la sartén a partir de los datos de los cambios de color que experimenta la crep durante su cocción. Para ello se han utilizado las imágenes digitales de las creps elaboradas en condiciones reales de cocción. Mediante análisis digital de imagen, empleando el software MATLAB, se ha obtenido el cambio de color absoluto, ΔE^* , en cada píxel de la imagen escaneada. A partir de dichos valores de ΔE^* , se ha estimado la temperatura en cada píxel mediante la ecuación cinética obtenida para la variación del color absoluto, ec.(4) y Tabla 13. Para corroborar la bondad de la predicción, se ha comparado la distribución de las temperaturas estimadas con la imagen termográfica de la superficie de la sartén inmediatamente después de retirar la crep. A continuación, a modo de ejemplo, se muestran los resultados obtenidos para dos de las creps cocinadas en condiciones reales, concretamente las correspondientes a las condiciones 6 y 7 especificadas en la Tabla 1.

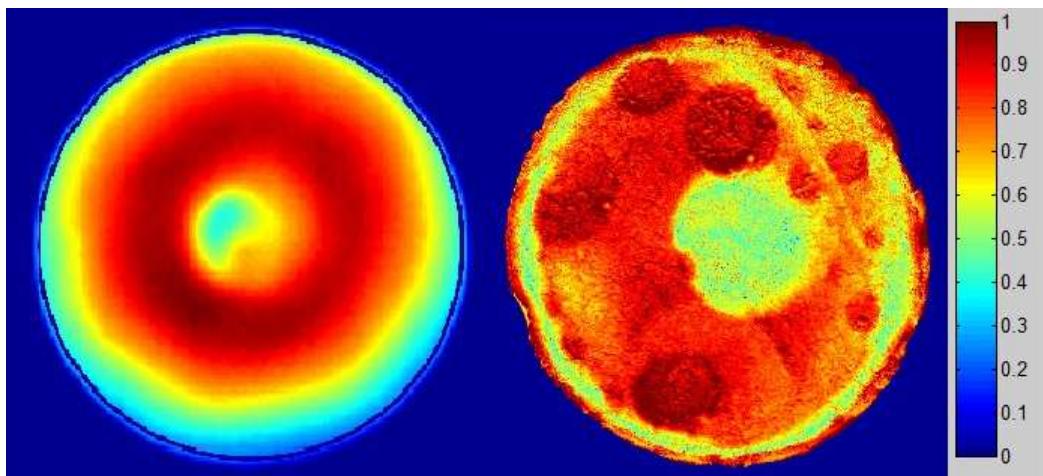


Figura 9. Termograma de la distribución de temperatura en la superficie de la sartén (izda) y predicción de la distribución de temperaturas en la superficie de la crep (dcha.) en condiciones de cocción 6.

$$T_{\min} = 170 \text{ }^{\circ}\text{C} - T_{\max} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

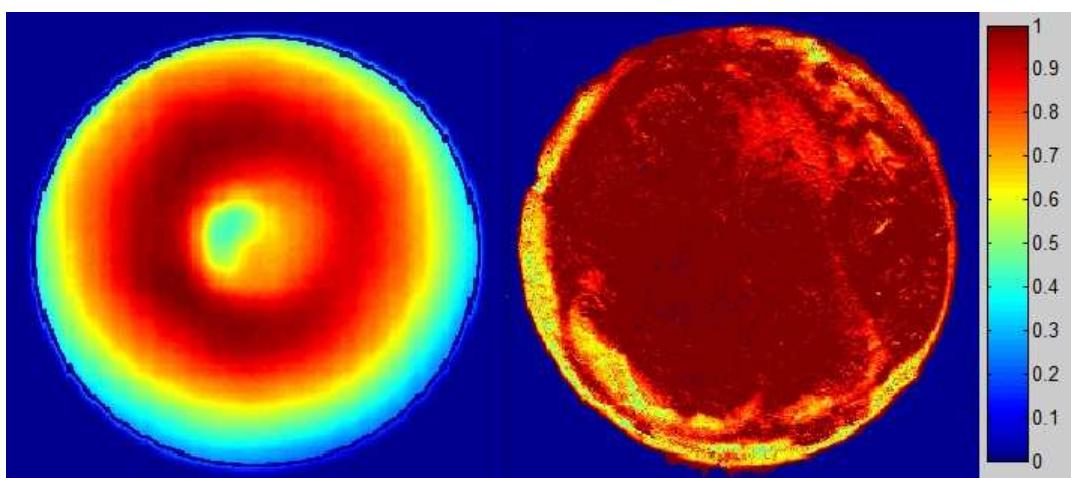


Figura 10. Termograma de la distribución de temperatura en la superficie de la sartén (izda) y predicción de la distribución de temperaturas en la superficie de la crep (dcha.) en condiciones de cocción 7.

$$T_{\min} = 170 \text{ }^{\circ}\text{C} - T_{\max} = 190 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

La Figura 9, corresponde a la crep cocinada con la condición 6. Se muestran, de izquierda a derecha, la imagen térmica de la superficie de la sartén y el mapa de temperaturas estimadas en la superficie de la crep. La escala unitaria es una escala lineal definida entre la temperatura mínima y la temperatura máxima medida en la imagen térmica de la superficie de la sartén. De forma semejante, la

Figura 10 muestra la misma información para la crep cocinada con la condición 7.

La Figura 11 muestra las imágenes digitales de las creps cocinadas en condiciones 6 y 7. Las imágenes digitales del resto de creps cocinadas en condiciones reales se recogen en el Anexo IV.

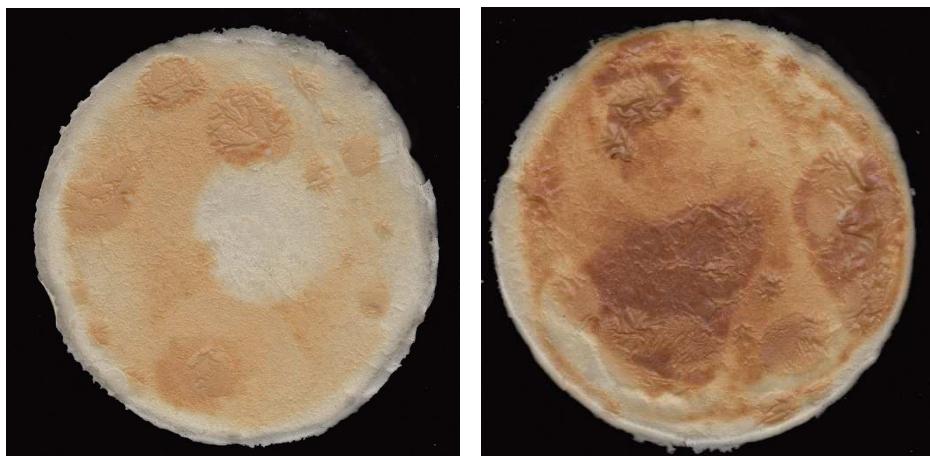


Figura 11. Imágenes digitales de las creps cocinadas en condiciones 6 y 7.

En la Figura 9 se observa una semejanza cualitativa entre las distribuciones de temperatura en las imágenes térmicas y en las predicciones. En ambas se aprecia una zona central más fría y una corona circundante en la que se alcanzan las máximas temperaturas de la distribución. Sin embargo, en la estimación la corona que rodea la zona central no está completamente cerrada y, además, aparecen zonas circulares con temperatura más elevada. Estas irregularidades se deben a factores como la formación de bolsas de gas en el interior de la masa durante el cocinado, la mejora o pérdida de contacto con la superficie de la sartén, o una distribución irregular de la masa sobre la superficie, y resultan difíciles de controlar con la metodología empleada. Las zonas con menor espesor o con burbujas desarrollan el color a mayor velocidad, lo que conduce a errores por exceso en la estimación de la temperatura. Este comportamiento se ilustra en la Figura 12, donde se aprecian las bolsas de gas formadas durante el cocinado.



Figura 12. Formación de bolsas de gas durante la cocción.

Sin embargo, en la Figura 10 no se aprecia una correspondencia entre la imagen termográfica de la superficie y la distribución de temperatura estimada. En la predicción hay una zona central muy amplia donde la temperatura estimada supera el valor máximo de la escala. Esto es debido a que los cambios de color producidos durante la cocción superan el umbral para el cual se ha construido el modelo. Esto podría deberse a que la temperatura en la sartén es mayor y por tanto provoca cambios mayores en el color o por efecto de un mejor contacto entre la masa y la sartén, sin necesidad de que haya un incremento proporcional de la temperatura.

4. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este estudio son:

1. El análisis digital de imagen es una técnica que ha permitido evaluar y modelar adecuadamente los cambios de color que tienen lugar en la masa de las creps durante la cocción.
2. Los cambios de color producidos por la reacción de Maillard durante la cocción de la masa empleada para este estudio no son significativos a temperaturas inferiores o iguales a 130 °C en los tiempos de cocción establecidos.
3. La aparición de tonalidades marronáceas propias de los productos de la reacción de Maillard se manifiesta acusadamente en los cambios que experimentan las coordenadas CIELab de color: la coordenada a^* aumenta, virando hacia el rojo; la coordenada b^* disminuye porque la masa deja de tener el tono crema inicial, y la coordenada de color L^* disminuye también, reflejando una pérdida de luminosidad. El color absoluto, ΔE^* , es un parámetro que recoge en su computo las modificaciones de las tres coordenadas de color y que en este caso se ha mostrado fuertemente dependiente de los cambios de la coordenada a^* .
4. A temperaturas comprendidas entre 140 y 190 °C, la coordenada a^* aumenta con el tiempo de cocción hasta estabilizarse en un valor máximo de 16. De forma análoga se comporta el color absoluto, ΔE^* , estabilizándose en torno a un valor de 17. En este intervalo de temperaturas los cambios de la coordenada a^* y de ΔE^* se han podido describir mediante cinéticas de primer orden.
5. Por encima de los 200 °C, aparecen fenómenos de degradación del color que se perciben por la aparición de tonos grisáceos, un cambio de la tendencia ascendente de a^* por una descendente y una caída más acusada de las coordenadas L^* y b^* .
6. La variación del contenido en agua de las creps tras la cocción se rige por una cinética de primer orden. Se ha observado además, que durante el periodo de secado a velocidad constante hay una relación lineal entre ΔE^* y la humedad.
7. La dependencia con la temperatura de las constantes cinéticas que describen la pérdida de humedad y el aumento de la coordenada a^* , se ajusta aceptablemente bien a la ecuación de Arrhenius. Sin embargo, no se puede afirmar lo mismo para la constante cinética del cambio de color absoluto.
8. La comparación de las imágenes termográficas de la superficie de cocción, con las imágenes construidas a partir de los modelos cinéticos obtenidos y el análisis digital de imagen, muestra que la metodología propuesta tiene potencial para su uso en la predicción y simulación del proceso de cocción estudiado.
9. La adherencia de la superficie de la sartén, así como la formación de burbujas, afectan al grado de contacto entre la masa y la sartén, siendo éste un factor crítico que influye acusadamente en el color que desarrolla la masa y por lo tanto en la reproducibilidad experimental en condiciones de cocción reales.

5. BIBLIOGRAFÍA

1. Ait Ameur L., Trystram G., Birlouez-Aragon I. (2006). Accumulation of 5-hydroxymethyl-2-furfural in cookies during the baking process: validation of an extraction method. *Food Chemistry*, 98 (4), 790–796.
2. Amrein T.A., Limacher A., Conde-Petit B., Amado R., Escher F. (2006). Influence of thermal processing conditions on acrylamide generation and browning in a potato model system. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 5910–5916.
3. Amrein T.A., Schönbächler B., Escher F., Amado R. (2004). Acrylamide in gingerbread: critical factors for formation and possible ways for reduction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 4282–4288.
4. Ballard D.A., Brown C.M. (1982). Computer vision. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
5. Broyart B., Trystram G., Duquenoy A. (1998). Predicting colour kinetics during cracker baking. *Journal of Food Engineering*, 35, 351–368.
6. Fennema O.W. (1993). Química de los alimentos (2^a ed.). Editorial Acribia, S. A. Zaragoza, España.
7. Gökmen V., Burçe (2010). Computer vision-based image analysis for rapid detection of acrylamide in heated foods. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods* 2, 203–207.
8. Gökmen V., Açıar Ö.Ç., Arribas-Lorenzo G., Morales F.J. (2008). Investigating the correlation between acrylamide content and browning ratio of model cookies. *Journal of Food Engineering*, 87, 380–385.
9. Gökmen V., Şenyuva H.Z. (2006) Study of colour and acrylamide formation in coffee, wheat flour and potato crisps during heating. *Food Chemistry*, 99, 238–243.
10. Gökmen V., Şenyuva H.Z., Dülek B., Çetin A.E. (2006). Computer vision based analysis of potato crisps – A tool for rapid detection of acrylamide level. *Molecular Nutrition & Food Research*, 50, 805–810.
11. Gökmen V., Şenyuva H.Z., Dülek B., Çetin A.E. (2007). Computer vision-based image analysis for the estimation of acrylamide concentrations of potato crisps and French fries. *Food Chemistry*, 101, 791–798.
12. Granda C., Moreira R.G., Tichy S.E. (2004). Reduction of acrylamide formation in potato chips by low-temperature vacuum frying. *Journal of Food Science* 69, E405–E411.
13. Gunasekaran S. (1996). Computer vision technology for food quality assurance. *Trends in Food Science and Technology*, 7, 245–256.
14. Hodge J. E. (1953). Chemistry of browning reactions in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1(15), 928–943.
15. Ibarz A, Pagán J., Garza S. (2000). Kinetic models of non-enzymatic browning in apple puree. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 1162-1168.
16. Leon K., Mery D., Pedreschi F., Leon J. (2006). Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39, 1084-1091.
17. Lukac H., Amrein T.M., Perren R., Condé-Petit B., Amado R., Escher E. (2007). Influence of roasting conditions on the acrylamide content and the color of roasted almonds. *Journal of Food Science*, 72, 33–38.

18. Magdic D., Seruga B., Budzaki S., Pranjic K., Lukinac J. (2006). Optimization of frying process of different dough shapes by applying digital image analysis. Proceedings of 3rd International Congress 'Flour Bread 05' and 5th Croatian Congress of Cereal Technologists, Opatija, 285-291.
19. Maillard L.C. (1912). Action des acides aminés sur les sucres: formation des mélanoïdines par voie méthodique. Compte rendu de l'Académie des Sciences, 154, 66–68.
20. Martins S.I.F.S, Jongen W.M.F., Van Boekel M.A.J.S. (2001). A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11, 364–373.
21. McCaig, T. N. (2002). Extending the use of visible/near-infrared reflectance spectrophotometers to measure colour of food and agricultural products. *Food Research International*, 35, 731-736.
22. Meléndez-Martínez A. J., Vicario I. M., Heredia, F. J. (2005). Instrumental measurement of orange juice colour: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 894-901.
23. Mir-Bel J., Oria R., Salvador M.L. (2013). Reduction in hydroxymethylfurfural content in 'churros', a Spanish fried dough, by vacuum frying. *International Journal of Food Science and Technology*, 48, 2042–2049.
24. Mottram D.S., Wedzicha B.L., Dodson A.T. (2002). Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature*, 419, 448–449.
25. Mustafa A., Andersson R., Rosen J., Kamal-Eldin A., Åman P. (2005). Factors influencing acrylamide content and color in rye crisp bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51, 5985–5989.
26. Pascale D. (2003). A review of RGB color spaces. Montreal: The Babel Color Company.
27. Pedreschi F., Kaack K., Granby K. (2006). Acrylamide content and color development in fried potato strips. *Food Research International*, 39, 40–46.
28. Purlis E., Salvadori V.O. (2007). Bread browning kinetics during baking. *Journal of Food Engineering*, 80, 1107–1115.
29. Purlis E., Salvadori V.O. (2009). Modelling the browning of bread during baking. *Food Research International*, 42 (7), 865–870.
30. Şenyuva H.Z., Gökmen V. (2005). Study of acrylamide in coffee using an improved liquid chromatography mass-spectrometry method: Investigation of colour changes and acrylamide formation in coffee during roasting. *Food Additives and Contaminants*, 22 (3), 214–220.
31. Shibukawa S., Sugiyama K., Yano T. (1989). Effects of heat transfer by radiation and convection on browning of cookies at baking. *Journal of Food Science*, 54 (3), 621–624. 699.
32. Stadler R.H., Blank I., Varga N., Robert F., Hau J., Guy P.A., Robert M.C., Riediker S. (2002). Acrylamide from Maillard reaction products. *Nature*, 419, 449–450.
33. Sun D.-W. (2000). Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method. *Journal of Food Engineering*, 44, 245-249.
34. Sun D.-W. (2008). Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation, 1^a ed. Academic Press, Burlington, MA, USA.

35. Surdyk N., Rosén J., Andersson R., Aman P. (2004). Effects of asparagine, fructose, and baking conditions on acrylamide content in yeast-leavened wheat bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 2047–2051.
36. Tareke E., Rydberg P., Karlsson P., Eriksson S., Törnqvist M. (2002). Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 4998–5006.
37. Wählby U., Skjöldebrand C. (2002). Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. *Journal of Food Engineering*, 53, 177–184.
38. Wang H.-H., Sun D.-W. (2003). Assessment of cheese browning affected by baking conditions using computer vision. *Journal of Food Engineering*, 56, 339–345.
39. Wu D., Sun D.-W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control - A review *Trends in Food Science & Technology*, 29, 5-20.
40. Yam K.L., Papadakis S.E. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61 (1), 137–142.
41. Zanoni B., Peri C., Bruno D. (1995). Modelling of browning kinetics of bread crust during baking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 28 (6), 604–609.

6. ANEXOS

ANEXO I - Reacción de Maillard

En el presente Anexo I se detallan las diferentes etapas de la reacción de Maillard, que interviene tanto en la generación de color como en el resto de modificaciones organolépticas que se producen durante la cocción de la masa de creps.

La formación de los polímeros de escisión responsables del sabor y el aroma, así como de las melanoidinas y otros polímeros responsables del color pardo, es el resultado de una serie de etapas que constituyen, en conjunto, la reacción de Maillard. Las diferentes reacciones que tienen lugar en su desarrollo han sido objeto de estudio durante el último siglo, lo que ha permitido alcanzar un conocimiento detallado de la reacción de Maillard^{1,2}. En la Figura I.1, se muestra un esquema general dónde identifican las tres etapas principales en las que tiene lugar la reacción de Maillard:

- Condensación de Maillard.
- Reordenamiento (reestructuración de Heyns y reestructuración de Amadori)
- Degradación de Strecker.

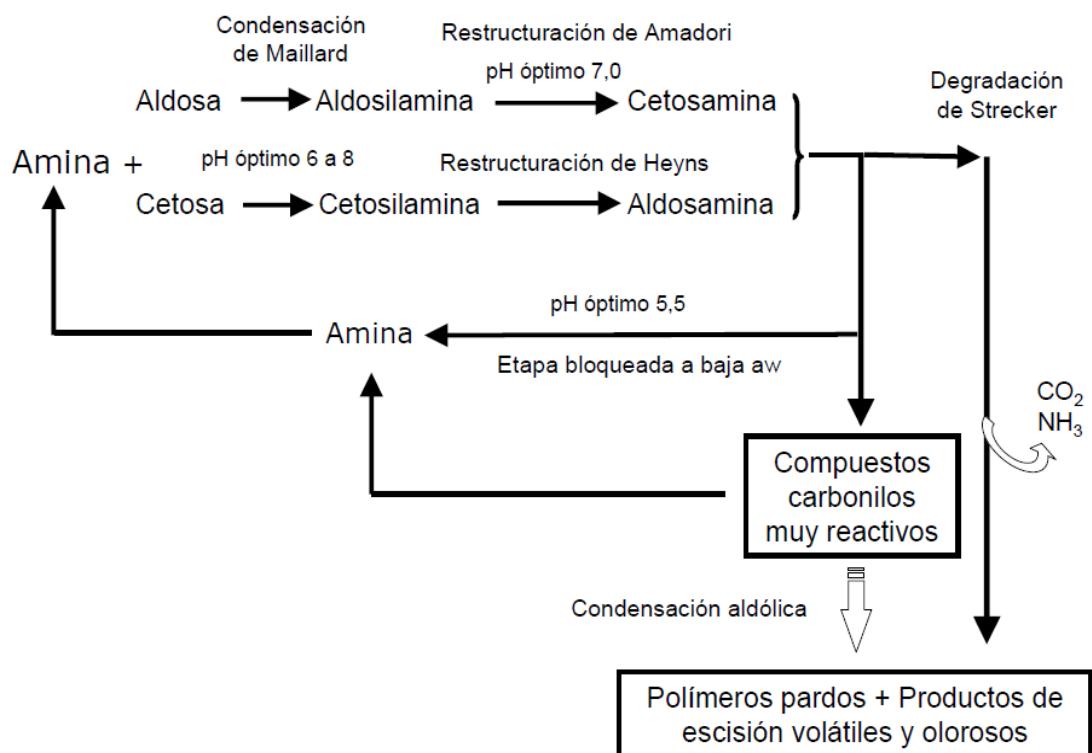


Figura I.1. Esquema general de la reacción de Maillard.

¹ Hodge J. E. (1953). Chemistry of browning reactions in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1(15), 928–943.

² Nursten, H. (2005). The Maillard reaction: chemistry, biochemistry and implications, Royal Society of Chemistry, ISBN 0-85404-964-9, London, UK.

Condensación de Maillard

La reacción de Maillard se inicia al producirse las reacciones de condensación entre azúcares reductores (aldosa y cetosa) y aminas para formar glicosilaminas. En las condiciones de pH apropiadas, las glicosilaminas dan lugar a las bases de Schiff, un producto intermedio de la reacción de Maillard. Las reacciones de condensación pueden ocurrir bien entre azúcares reductores y aminoácidos, o bien con otros grupos amino libres procedentes de péptidos y proteínas. La Figura I.2 muestra las reacciones que tienen lugar en esta etapa.

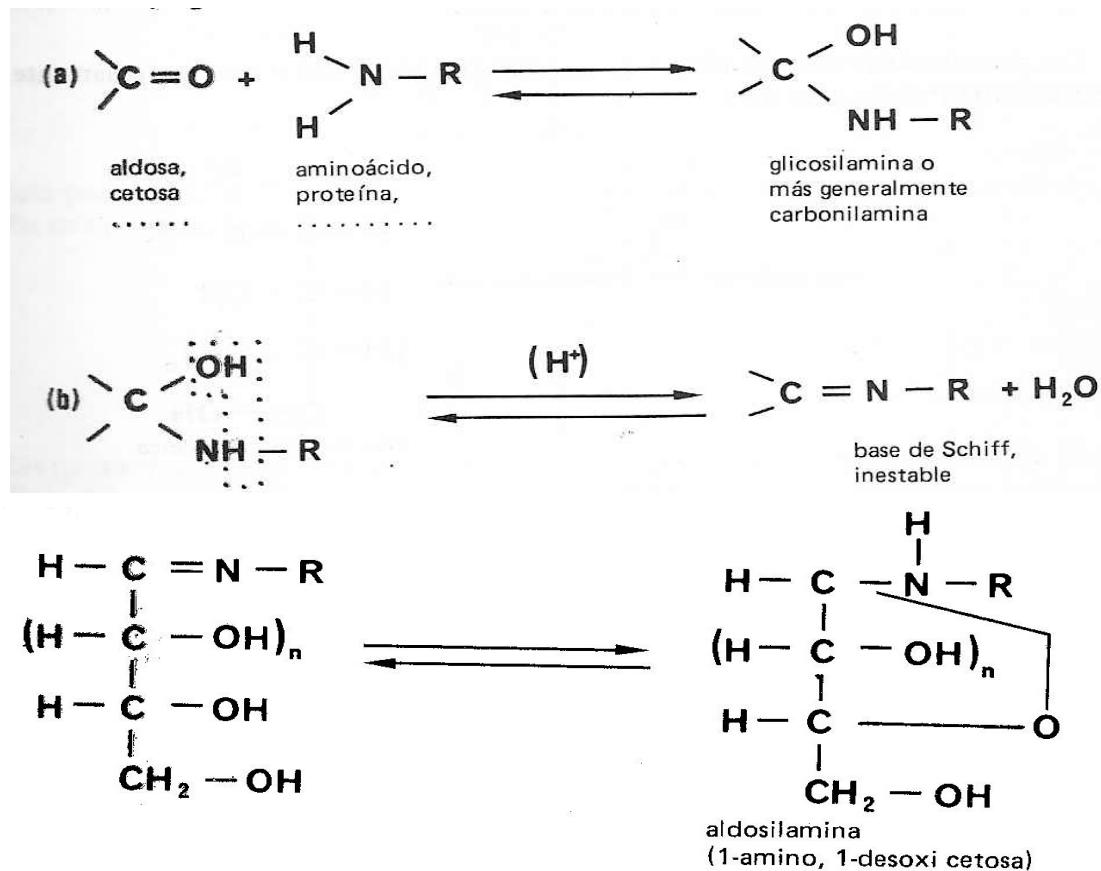


Figura I.2. Reacciones de condensación y formación de bases de Schiff.

En la reacción de condensación se libera una molécula de agua, tal y como se ilustra en la reacción de condensación entre la glucosa y la glicina mostrada en la Figura I.3.

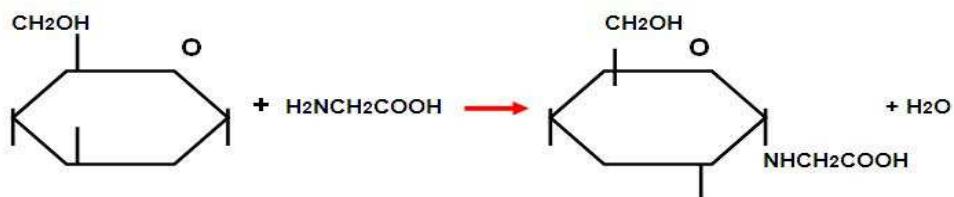


Figura I.3. Reacción de condensación con liberación de una molécula de agua.

Los productos iniciales que se forman tras las primeras reacciones de glucosilación entre aminoácidos y azúcares reductores son incoloros. Sin embargo, conforme la reacción progresá se forman uniones no saturadas y aumenta la concentración de grupos carbonilo libres, dando lugar a productos cada vez más reductores.

Reordenamiento de los productos de condensación

Tras la glucosilación, se produce el reordenamiento de los productos de condensación. En esta etapa, a partir de glucosilamida (aldosamida) se obtiene fructosilamida (cetosilamida) mediante isomerización, constituyendo la denominada reestructuración de Amadori. Si por el contrario, la isomerización es de cetosilamidas a aldosaamidas, la reacción recibe el nombre de reestructuración de Heyns. La Figura I.4 muestra el reordenamiento de Amadori que tiene lugar tras las reacciones de condensación.

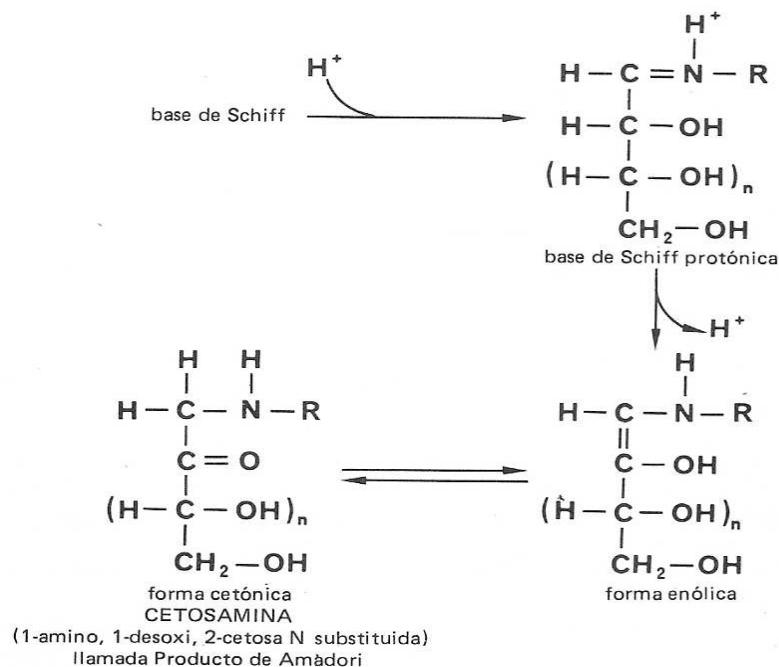


Figura I.4. Reestructuración de Amadori.

Degradación de Strecker

En esta etapa se produce la deshidratación de los productos de la reestructuración mediante diferentes rutas, que en síntesis, liberan moléculas de agua y CO_2 . Además, se forman también compuestos volátiles, responsables de los aromas y sabores propios de las reacciones de pardoamiento, y polímeros de condensación responsables del color. Las diferentes vías por las que la reacción continua tras el reordenamiento se detallan a continuación.

Uno de los mecanismos es la formación de compuestos carbonilo muy reactivos a partir de las aldosaaminas y las cetosaaminas. La transformación de los productos del reordenamiento da lugar inicialmente a productos intermedios de menor estabilidad, formándose dicetosaaminas, como la difructosamina, por condensación de la cetosamina con una molécula adicional de azúcar, seguida de un reordenamiento. La poca estabilidad de las dicetosaaminas facilita su descomposición, produciéndose una enolización en posición 1 y 2, lo que desplaza al doble enlace de la cetosamina, y deriva en la formación de compuestos dicarbonilo muy reactivos, del modo que se ilustra en la Figura I.5.

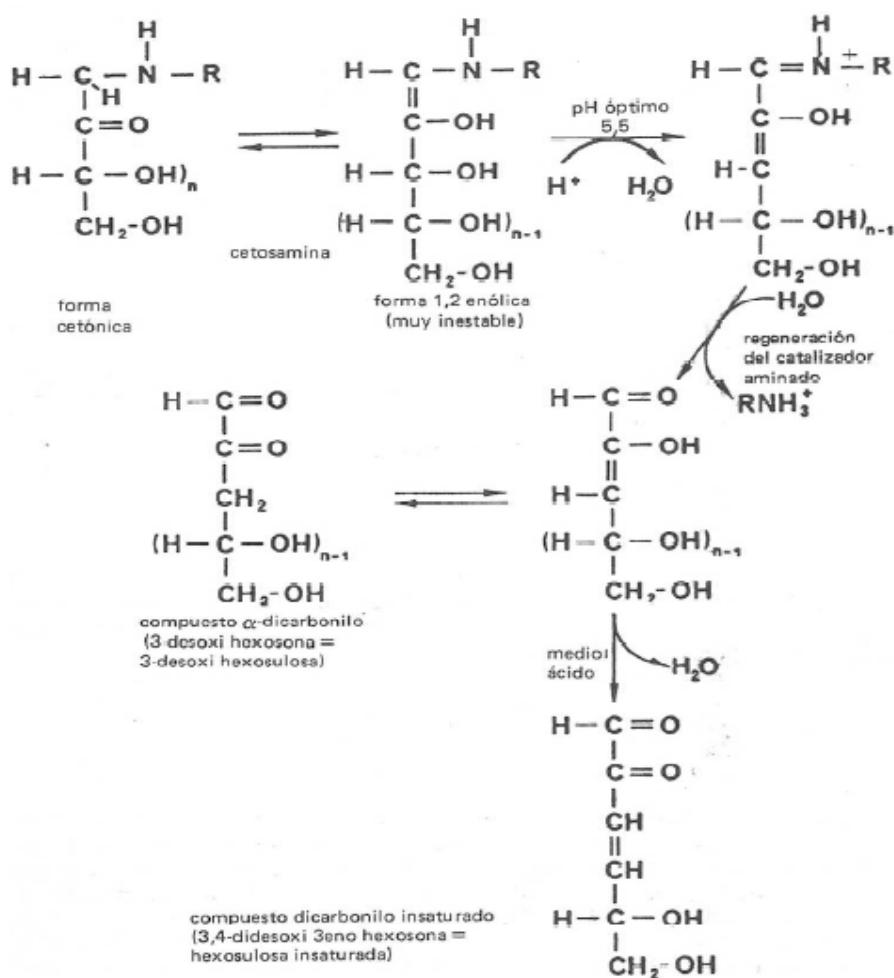


Figura I.5. Reacción de degradación de las cetosamidas por enolización en posición 1 y 2.

Además, tras el reordenamiento, se forman compuestos dicarbonilo insaturados precursores del pardeamiento químico. Al calentar estos compuestos en medio ácido, aparecen 5-hidroximetilfurfural (a partir de aldosas) y furfural (a partir de cetosas), dos moléculas de gran interés por sus efectos sobre la salud. La Figura I.6 muestra la estructura de la molécula de 5-hidroximetilfurfural.

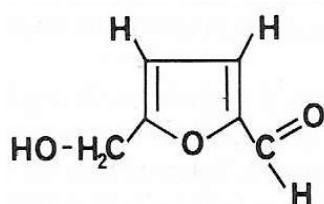


Figura I.6. 5-hidroximetilfurfural.

Existe otra vía para la degradación de las cetosamidas que se inicia con una enolización en posición 2 y 3 y conduce a la formación de reductonas. Esta reacción sucede cuando el pH es próximo a 6.0. En paralelo puede dar lugar a productos de escisión hidrolítica como el isomaltol y la furanona, de sabor ligeramente amargo. La ruta completa se muestra en la Figura I.7.

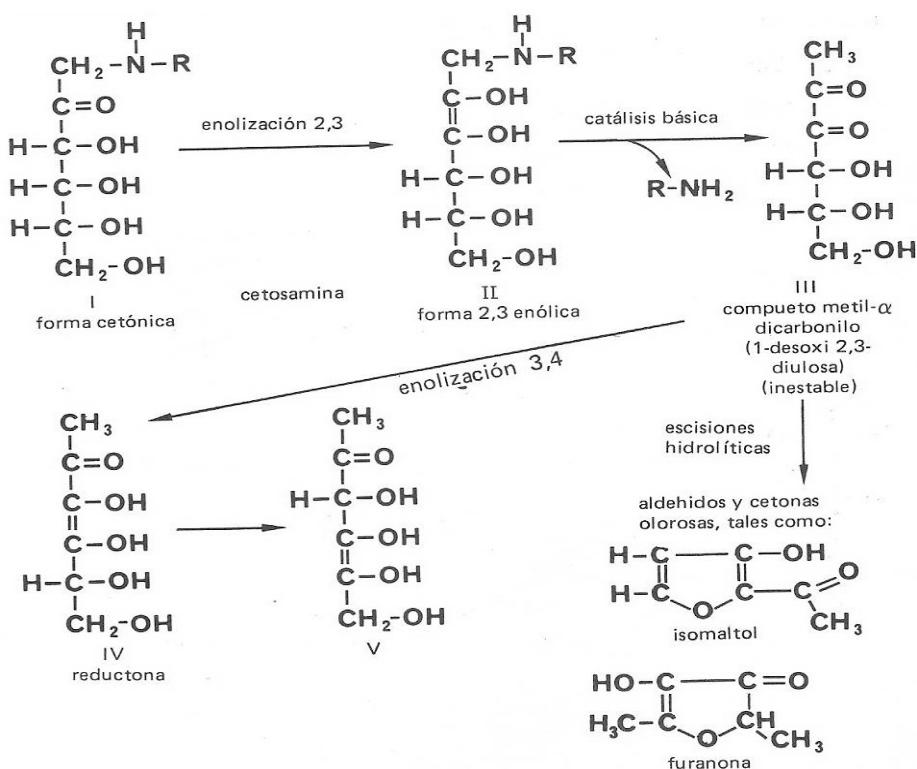


Figura I.7. Reacción de degradación de las cetosamidas por enolización en posición 2 y 3.

La tercera vía para la degradación de los compuestos de reordenación se muestra en la Figura I.8. Este mecanismo se inicia con la formación de una triacetona, que reacciona con una amina secundaria para dar lugar a la generación de compuestos susceptibles de formar polímeros heterocíclicos.

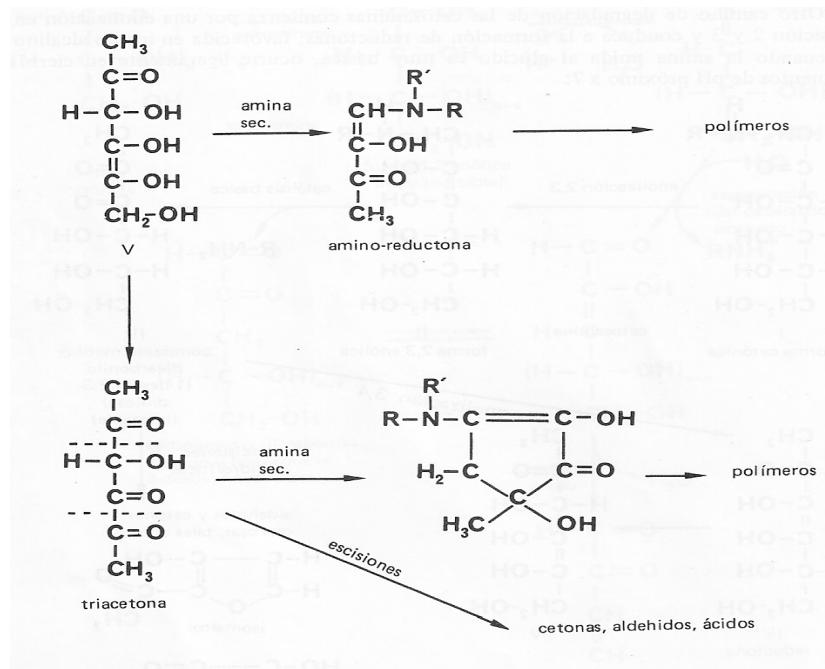


Figura I.8. Reacciones de degradación por reacción de una triacetona con una amina secundaria.

Finalmente, al reaccionar con los aminoácidos libres que se encuentran en el medio, se produce la degradación de los compuestos dicarbonilo formados en las etapas anteriores, liberándose una molécula de agua, tal y como muestra la Figura I.9. En la desaminación y la descarboxilación simultáneas del aminoácido, se forman compuestos carbonilo nuevos y un aldehído con un átomo de carbono menos que el aminoácido inicial, liberando CO_2 . Los carbonilos reaccionan entre sí con los aldehídos o con moléculas tipo amino, produciendo pirazinas, componentes que contribuyen al desarrollo del aroma. Estas reacciones conducen a la formación de productos intermedios de bajo peso molecular como los aldehídos de Stecker, el ácido pirúvico y el diacetilo, fácilmente detectables por el olfato.

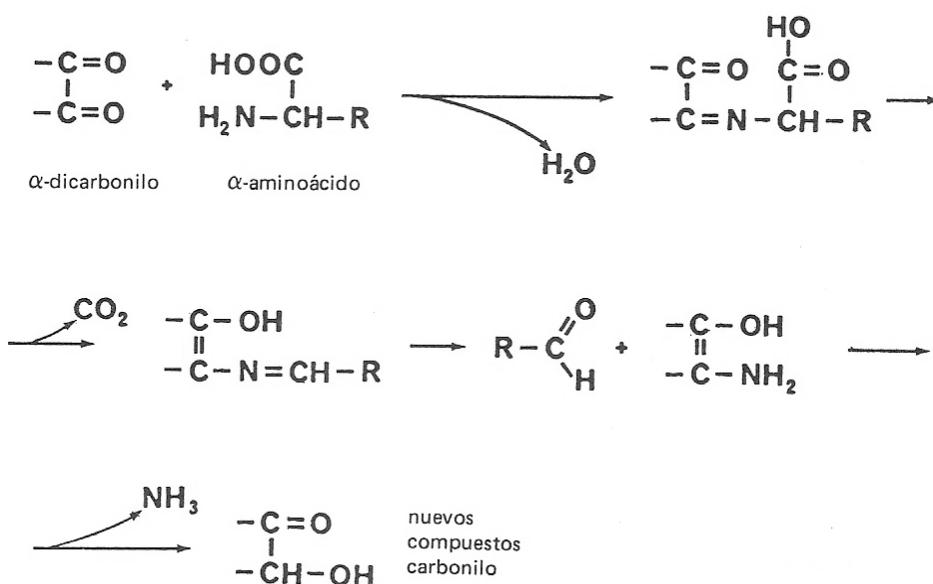


Figura I.9. Reacción de degradación de Strecker.

Las reacciones de deshidratación y degradación contribuyen en su conjunto a la formación de compuestos químicos y polímeros de condensación de pigmentación oscura que se denominan melanoidinas. Su formación discurre a través de complejos mecanismos que implican la polimerización de muchos de los compuestos formados durante las etapas 2 y 3 de la reacción de Maillard. En las etapas finales de la reacción de Maillard continúan produciéndose reacciones de polimerización y se generan productos cada vez más oscuros y menos solubles en agua. Este proceso se acelera en presencia de grupos amino libre, oxígeno y temperaturas elevadas.

ANEXO II - Caracterización térmica de superficies

En el presente Anexo II se muestran las imágenes térmicas capturadas para la caracterización térmica de las superficies, junto con los histogramas y distribuciones porcentuales que se han considerado necesarios, tanto para interpretar la información correctamente, como para valorar la aptitud de las distribuciones de temperatura obtenidas de cara a ejecutar los ensayos experimentales.

Distribución de temperatura en la placa calefactora

Se efectuó una primera medida mediante termografía para conocer la distribución de temperaturas de la placa calefactora.

La Figura II.1 muestra una imagen térmica de la placa. En ella se aprecia una distribución de temperaturas en la que los bordes de la placa y especialmente la esquina del cuadrante superior derecho están notablemente más frías ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $110\text{ }^{\circ}\text{C}$) que el resto de la placa ($115\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $130\text{ }^{\circ}\text{C}$). Además, dado que la geometría de la superficie presenta bandas longitudinales con un resalte de 5 mm espaciadas 20 mm, aparecen diferencias de temperatura entre las bandas en resalte y las concavidades, aunque al estar distribuidas homogéneamente en toda la placa su efecto no es significativo.

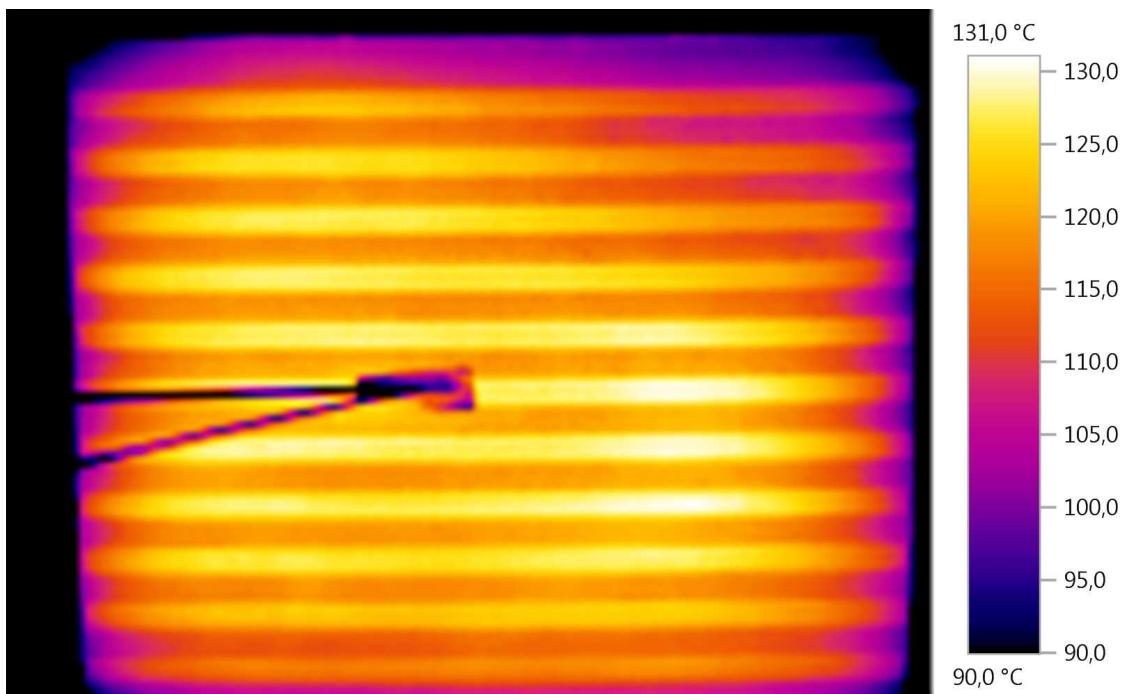


Figura II.1. Distribución de temperatura en la placa calefactora, tomando como zona de interés toda la placa.

En la Figura II.2, obtenida a partir del mismo termograma que la Figura I.1 se ha tomado como zona de interés específicamente la superficie de la placa, de forma que las zonas coloreadas en la imagen están comprendidas entre $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $131\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se observa que en los resaltos la temperatura es de unos $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en las concavidades oscila entre $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ en las zonas laterales y $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el centro.

Por su parte, la Figura II.3 es un histograma que muestra la distribución porcentual por rangos de temperatura existente en la figura II.2. La distribución en el conjunto de la placa, se puede considerar homogénea, ya que exceptuando las zonas más periféricas, más del 75% de la superficie de interés está entre los $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ de las concavidades y los $131\text{ }^{\circ}\text{C}$ de los resaltos, y corresponde además, con la zona interior de la placa.

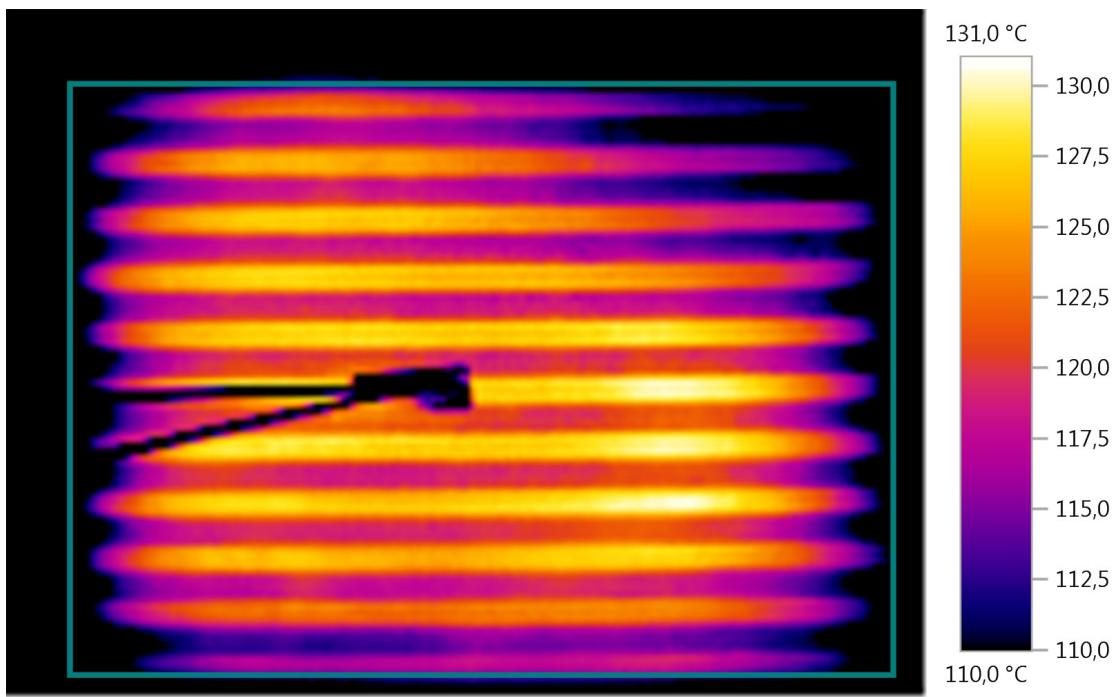


Figura II.2. Distribución de temperatura de la zona de interés entre 110 °C y 131 °C.

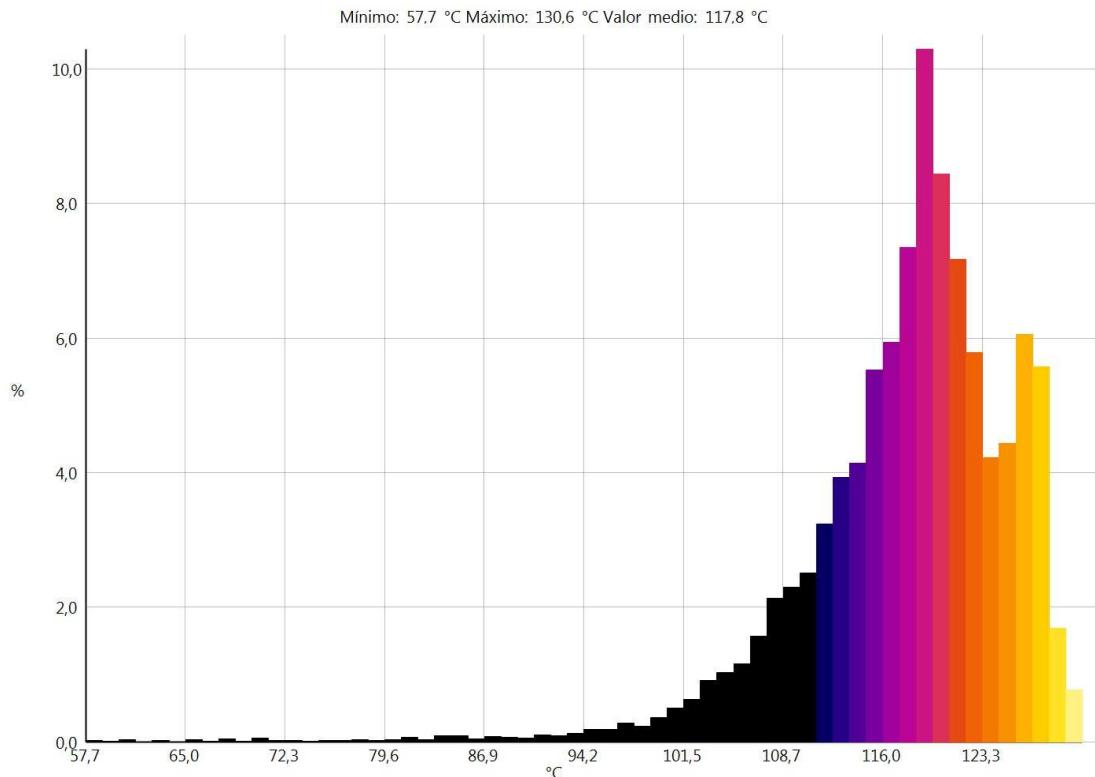


Figura II.3. Distribución porcentual de temperaturas en la placa. Valor inferior de saturación 110 °C. Valor superior de saturación 131 °C.

Distribución de temperatura en la superficie de la sartén

Dado que la distribución de temperatura en la superficie de la placa es suficientemente homogénea, se seleccionó la zona central de la placa como la ubicación óptima, colocando el centro de la sartén sobre la sonda termopar para el control de temperatura, instalada en una de las bandas cóncavas.

Determinada la ubicación de la sartén, se realizó el estudio de la distribución de temperaturas en la superficie de la sartén durante el funcionamiento estacionario de la placa. Se efectuaron medidas de temperatura y humedad ambiente entre la cámara y la sartén, de la temperatura reflejada y de la emisividad del material. Estos valores, que se muestran en la Tabla II.1, se introdujeron como parámetros de corrección en la imagen térmica registrada para obtener una medida de temperatura en la superficie de la sartén lo más precisa posible.

Tabla II.1. Valores de los parámetros de corrección.

Humedad ambiente (%)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura reflejada (°C)	Emisividad
35	46	44	0.95

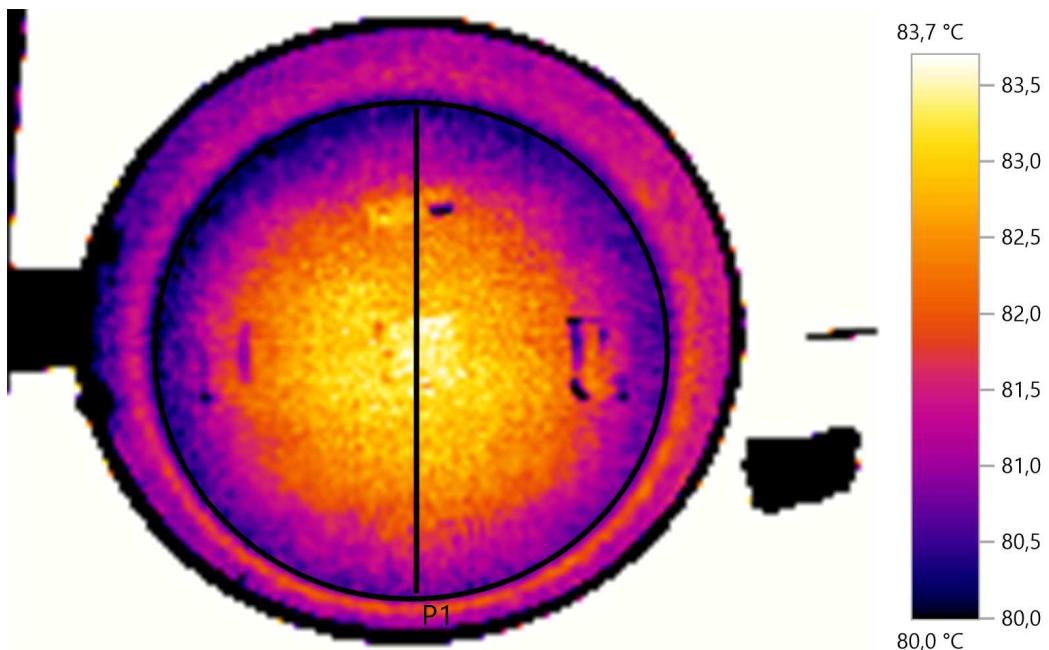


Figura II.4. Área de interés y línea de perfil seleccionadas.

En la Figura II.4 se muestra un termograma de la superficie de la sartén, en el que se ha tomado como zona de interés la superficie plana de la misma. Se puede distinguir también la ubicación de las tiras de cinta empleadas para la determinación de la emisividad de la sartén en zonas puntuales que aparecen más frías que el resto (arriba, abajo, izquierda, derecha y centro de la sartén), debido a que por efecto del calor, las esquinas se han despegado.

Observando la escala, a primera vista se puede comprobar que la distribución de temperatura en la superficie de la sartén es homogénea, encontrando gradientes de temperatura entre el centro y la zona perimetral menores de 3.7 °C, ya que la temperatura más baja registrada en la zona de interés corresponde al efecto producido por los pliegues de la cinta.

En la Figura II.5 se aprecia que más del 80% de la superficie se encuentra a una temperatura entre 80.4 °C y 83.2 °C. Observando el perfil diametral de temperaturas de la Figura II.6 (en sentido descendente) se puede comprobar que las diferencias en la zona central son mínimas, y que hay una banda muy ancha de superficie donde las temperaturas oscilan menos de 1.3 °C respecto a la temperatura media calculada de 82.2 °C.

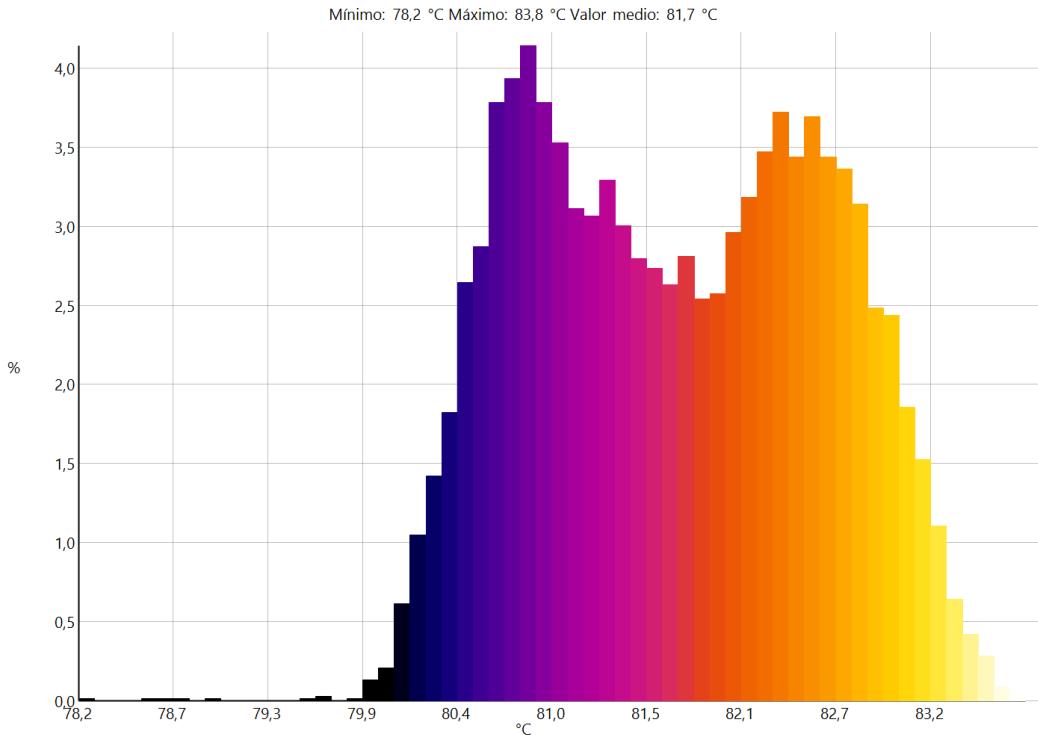


Figura II.5. Distribución porcentual de temperaturas en el área de interés.,.

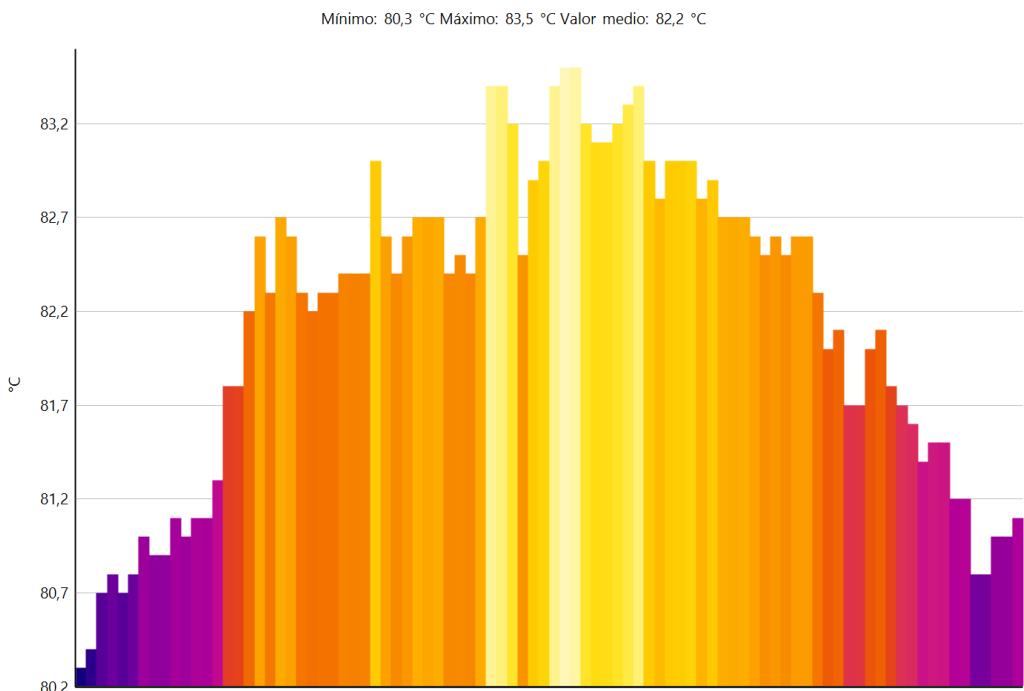


Figura II.6. Temperaturas a lo largo del perfil. (Nótese que el lado izquierdo de la grafica corresponde al extremo superior de la línea de perfil y el lado derecho al extremo inferior).

ANEXO III - Imágenes digitales de las creps preparadas a temperatura homogénea

En la Figura 1 de la memoria de este trabajo, dentro del apartado 4.1 "Evolución del color, humedad y pérdida de peso durante la cocción de creps a temperatura homogénea" se han mostrado las imágenes digitales correspondientes de las creps preparadas a 160 °C para la medida del color y la obtención de la cinética de cambio de color a dicha temperatura. A continuación se muestran las imágenes digitales correspondientes al resto de temperaturas de cocción empleadas.

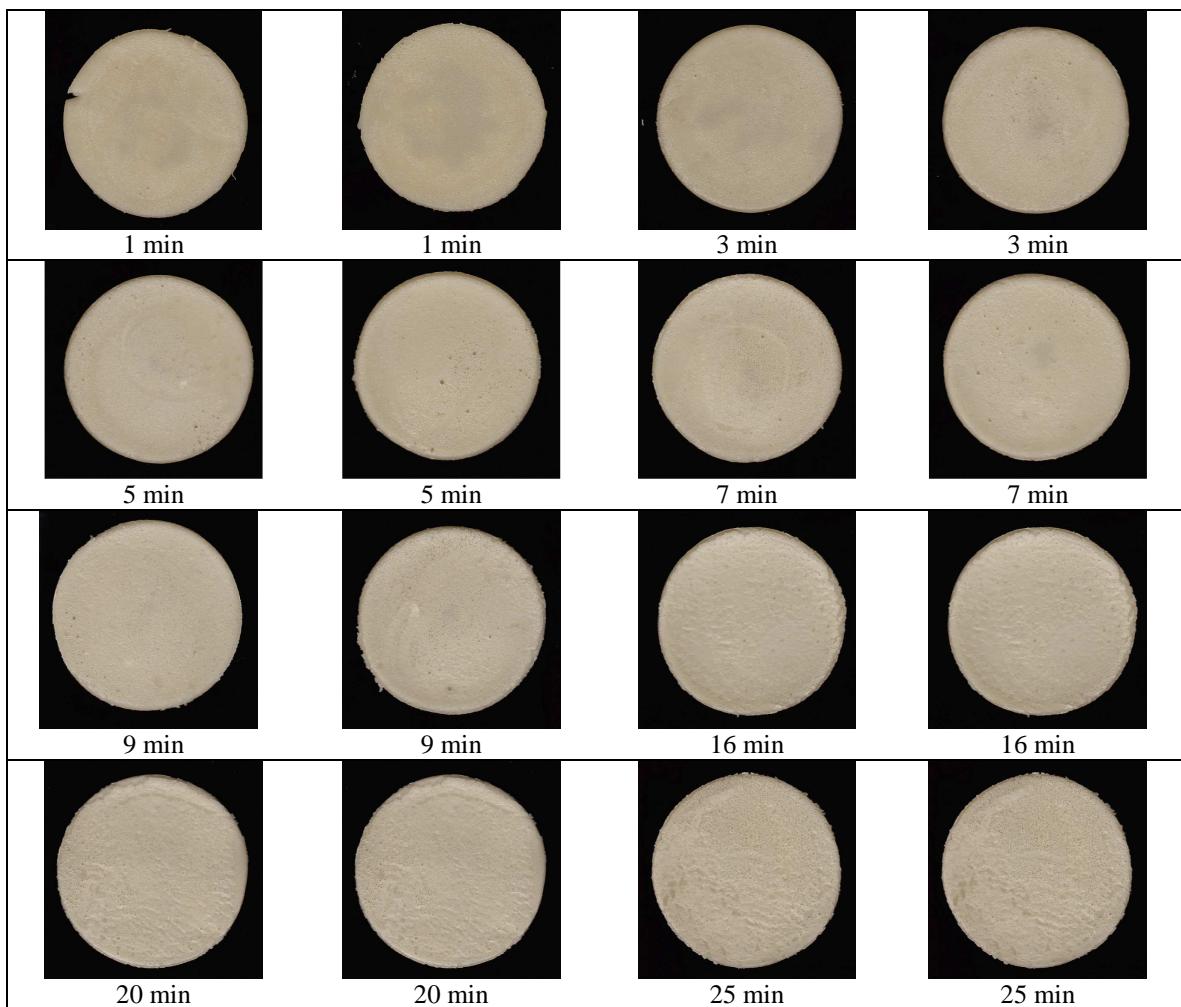


Figura III.1. Imágenes escaneadas de las creps a 110 °C para diferentes tiempos de cocción.

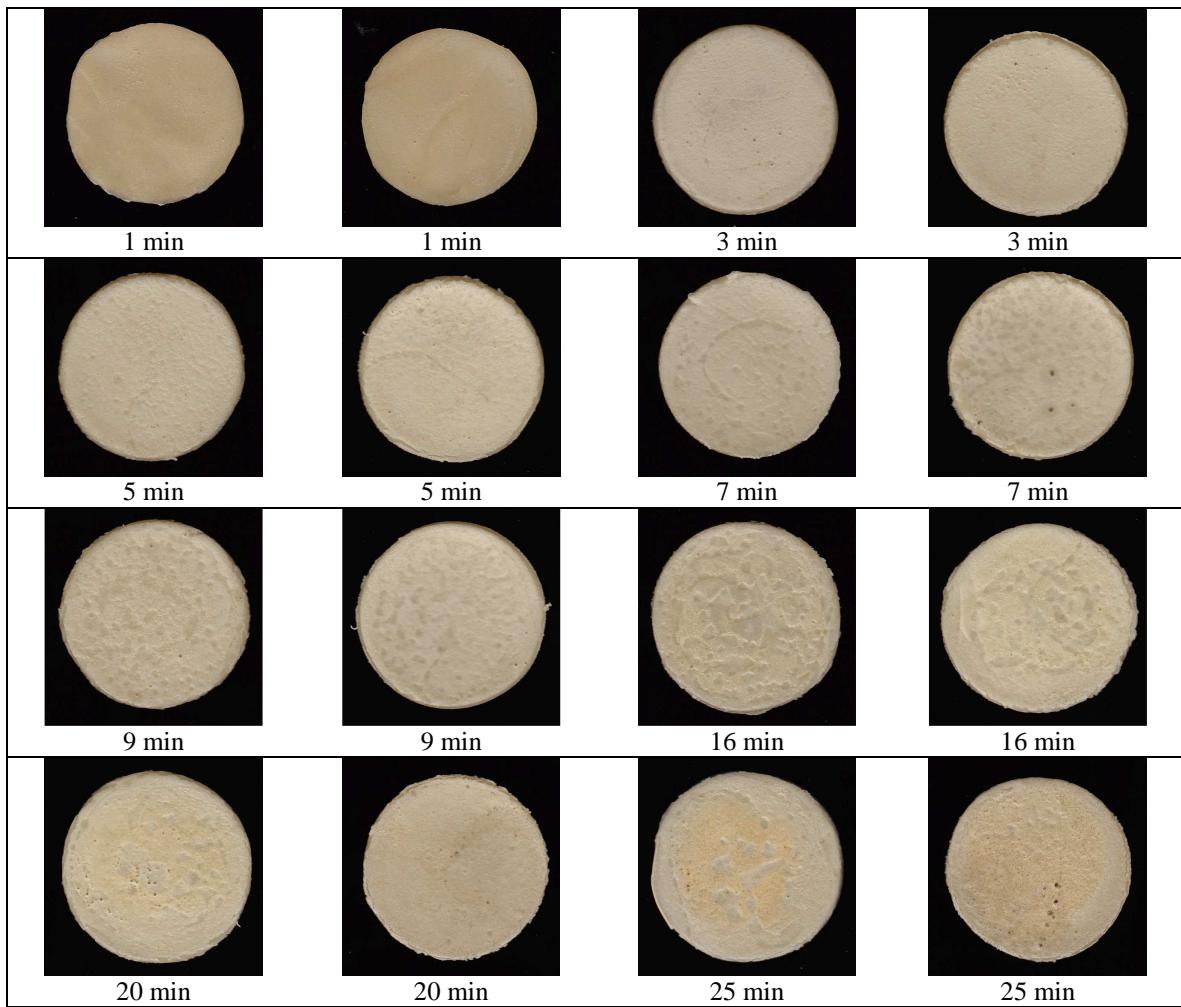


Figura III.2. Imágenes escaneadas de las creps a 120 °C para diferentes tiempos de cocción.



Figura III.3. Imágenes escaneadas de las creps a 130 °C para diferentes tiempos de cocción.



Figura III.4. Imágenes escaneadas de las creps a 140 °C para diferentes tiempos de cocción.



Figura III.5. Imágenes escaneadas de las creps a 150 °C para diferentes tiempos de cocción.

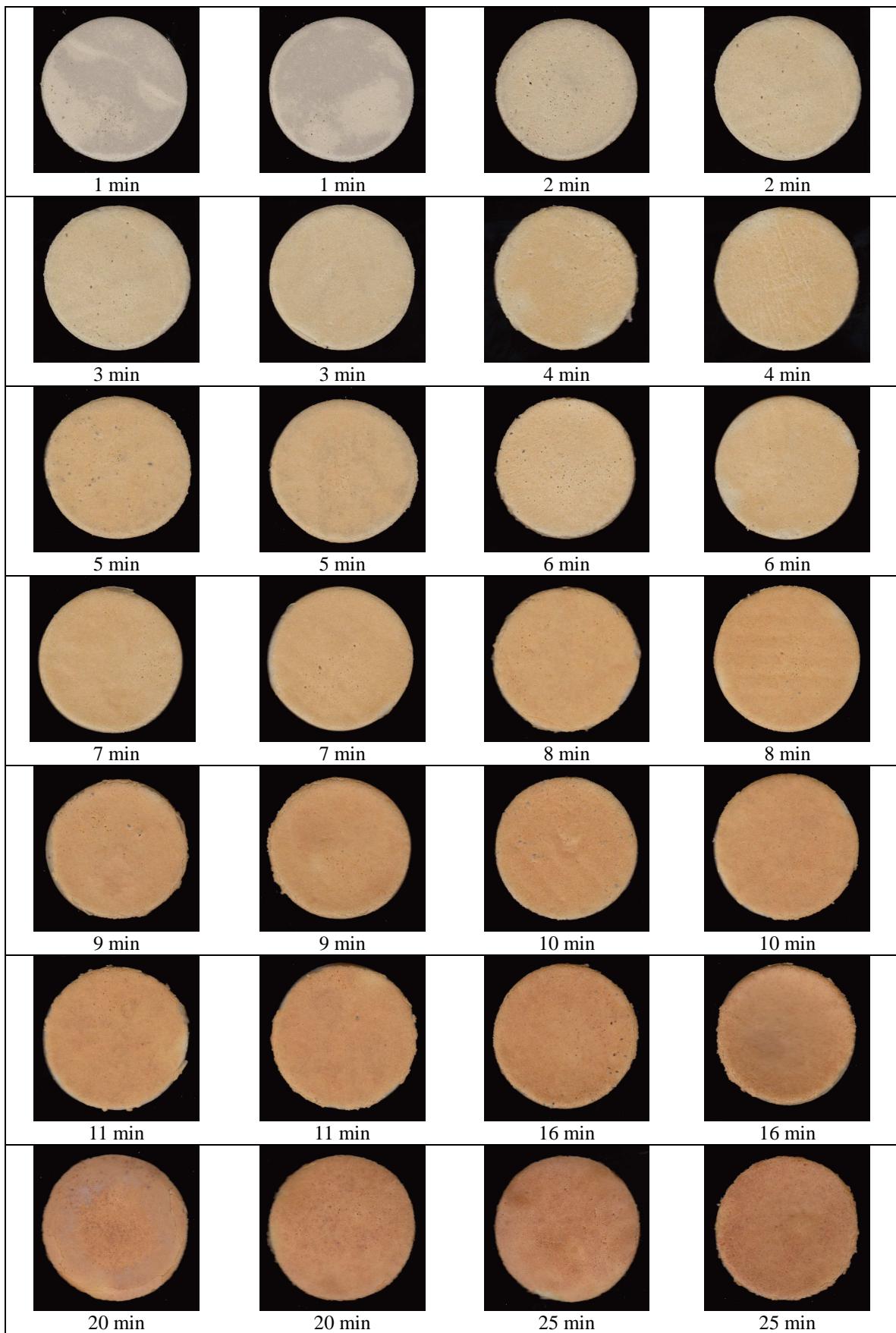


Figura III.6. Imágenes escaneadas de las creps a 160 °C para diferentes tiempos de cocción.

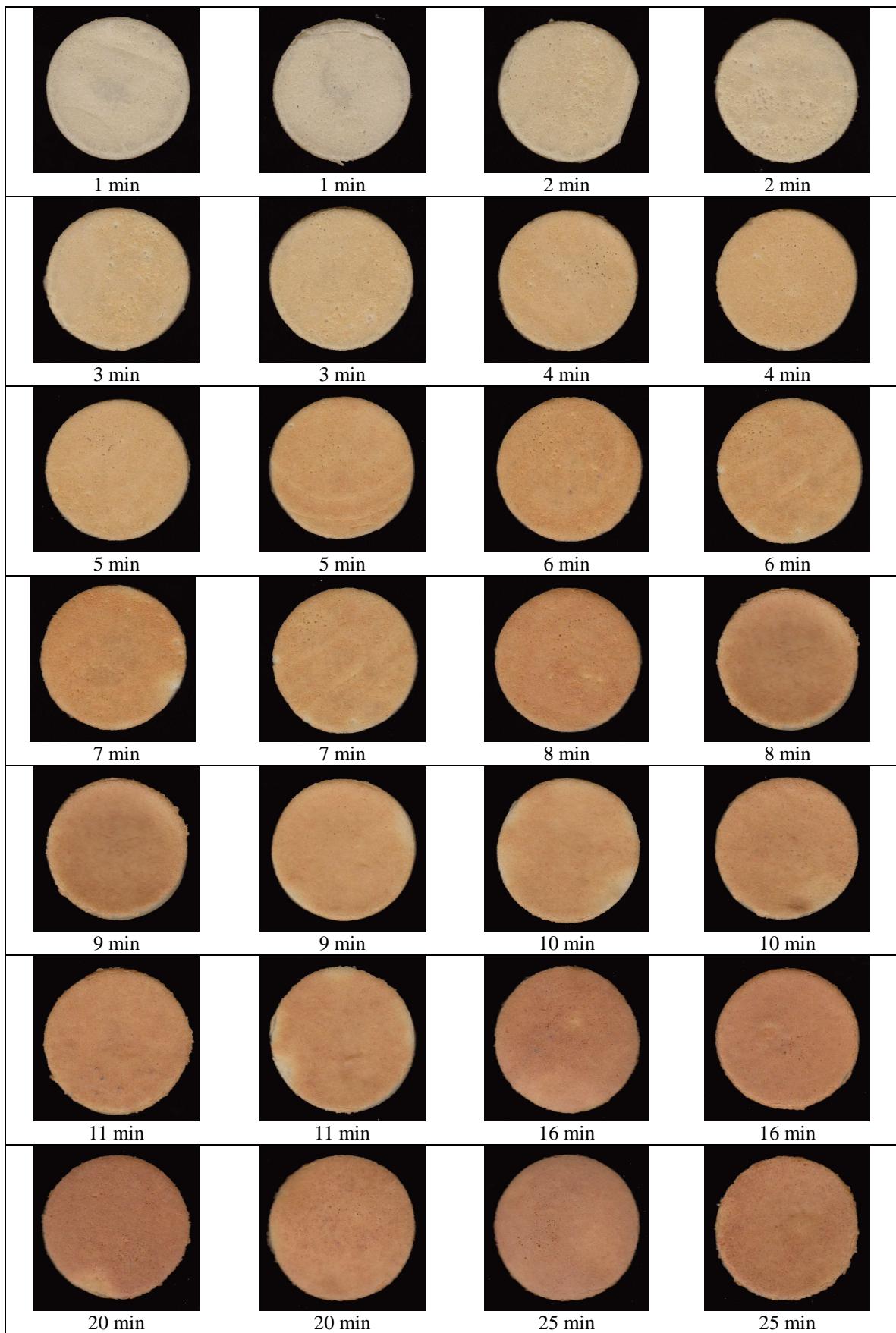


Figura III.7. Imágenes escaneadas de las creps a 170 °C para diferentes tiempos de cocción.

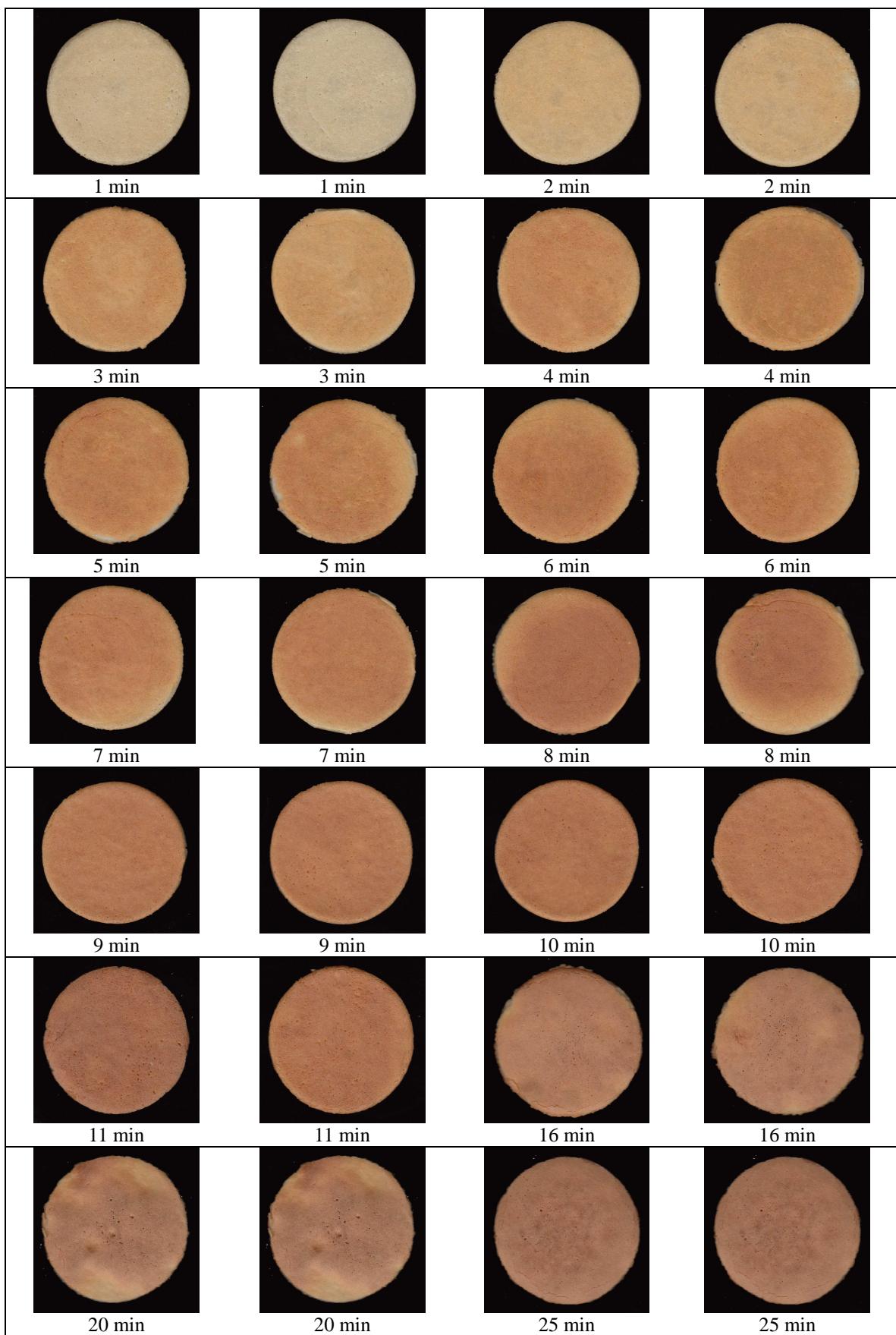


Figura III.8. Imágenes escaneadas de las creps a 180 °C para diferentes tiempos de cocción.

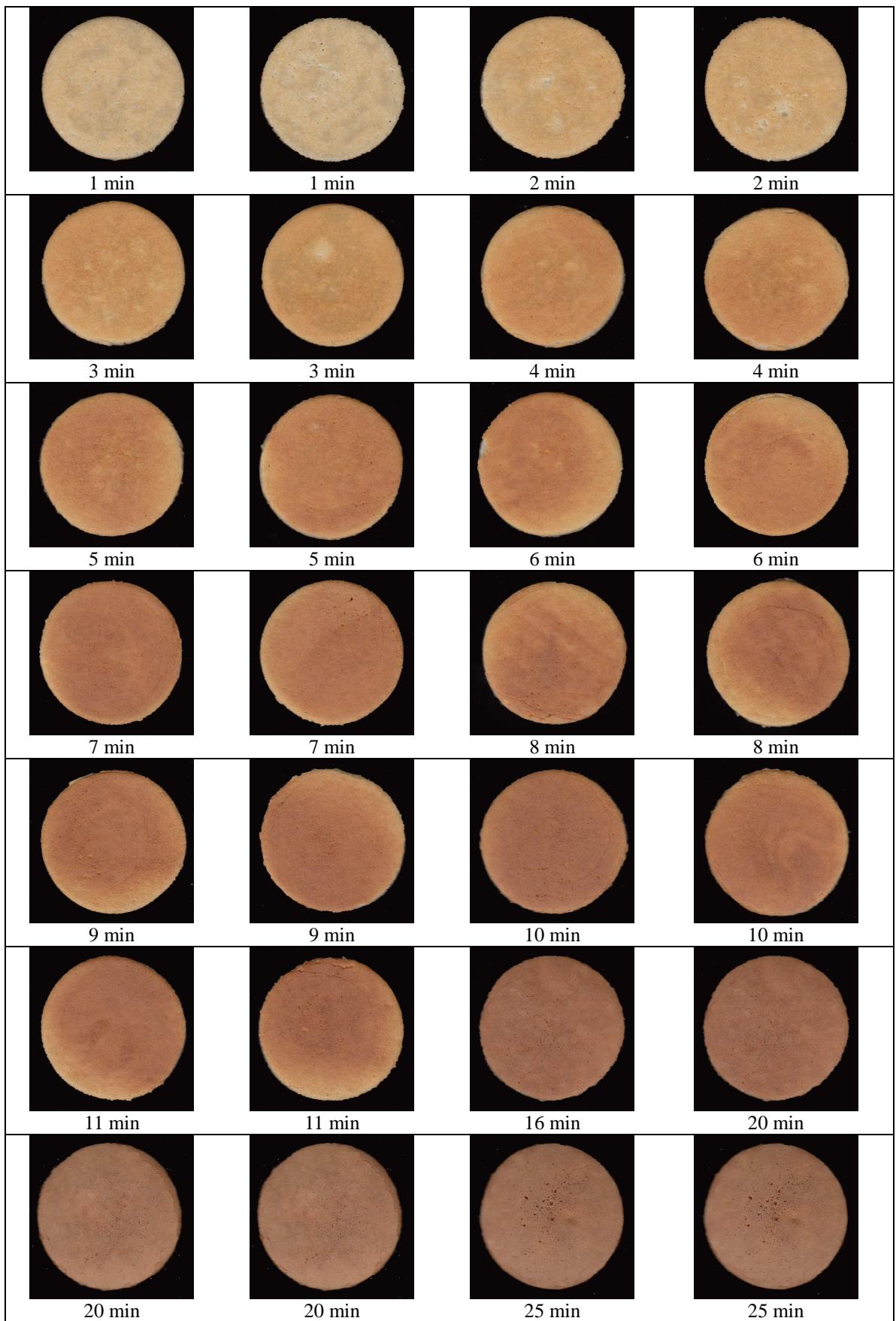


Figura III.9. Imágenes escaneadas de las creps a 190 °C para diferentes tiempos de cocción.

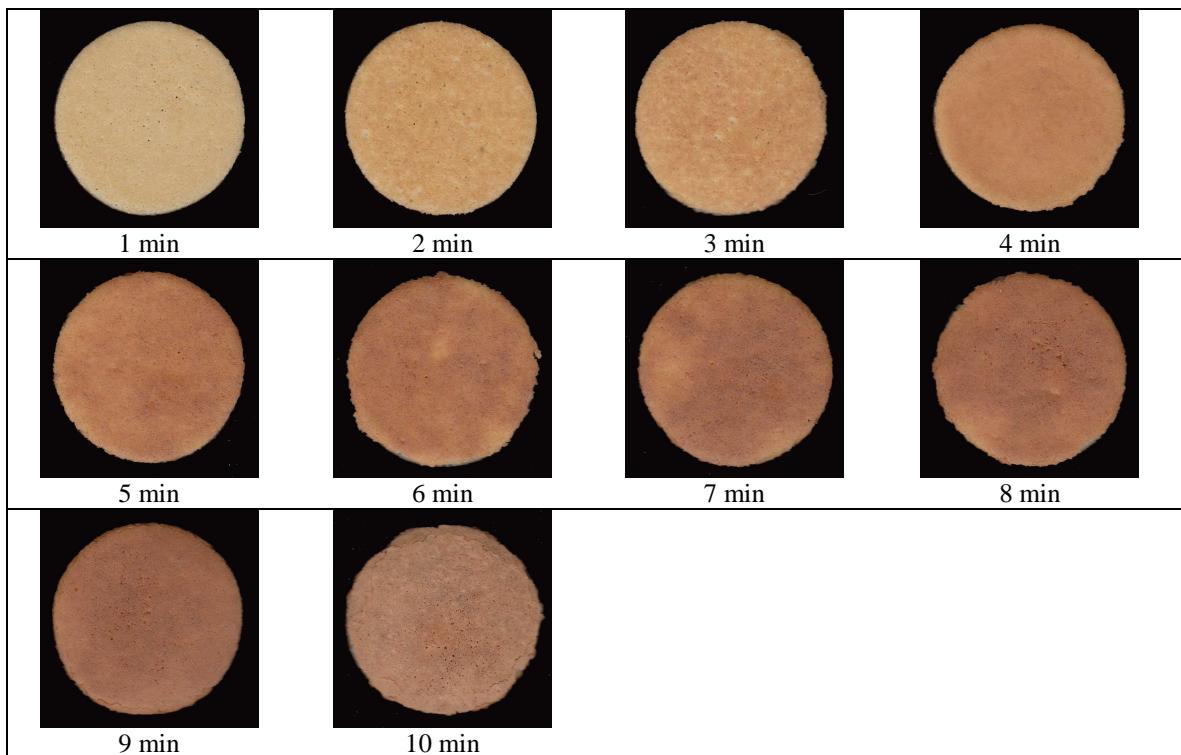


Figura III.10. Imágenes escaneadas de las creps a 200 °C para diferentes tiempos de cocción.

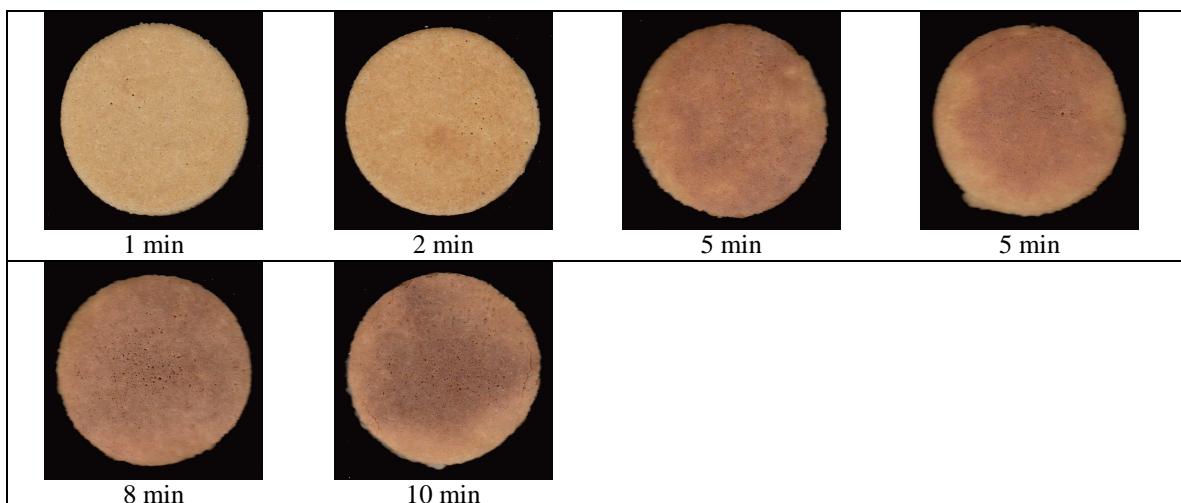


Figura III.11. Imágenes escaneadas de las creps a 210 °C para diferentes tiempos de cocción.

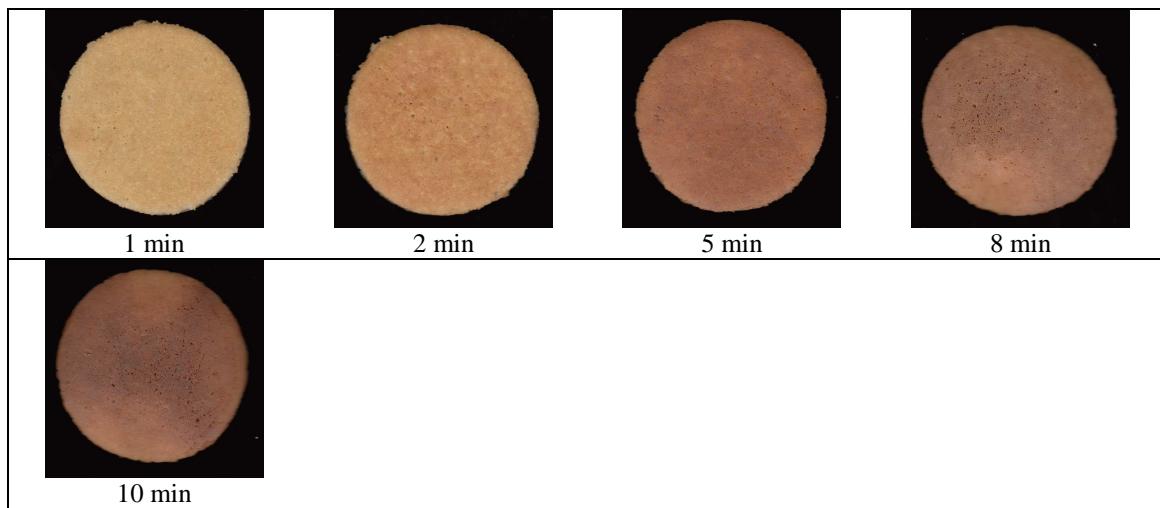


Figura III.12. Imágenes escaneadas de las creps a 220 °C para diferentes tiempos de cocción.

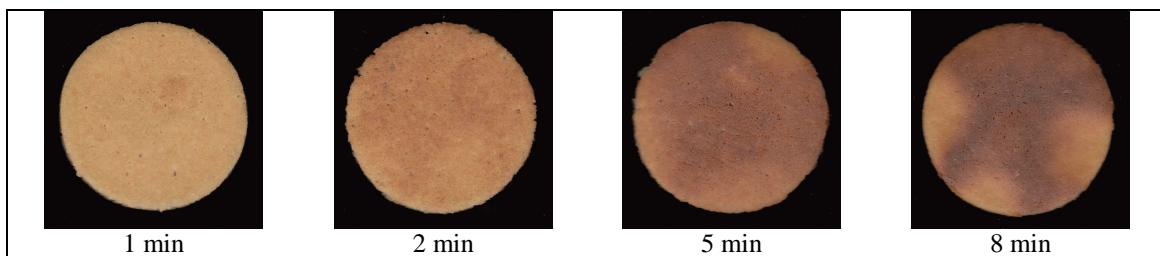


Figura III.13. Imágenes escaneadas de las creps a 230 °C para diferentes tiempos de cocción.

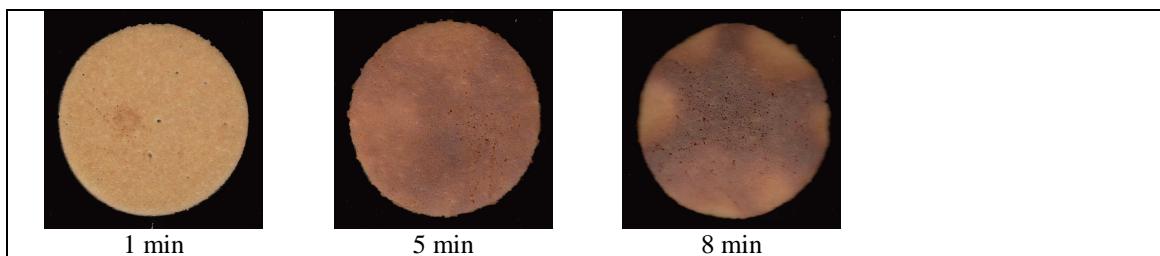


Figura III.14. Imágenes escaneadas de las creps a 240 °C para diferentes tiempos de cocción.

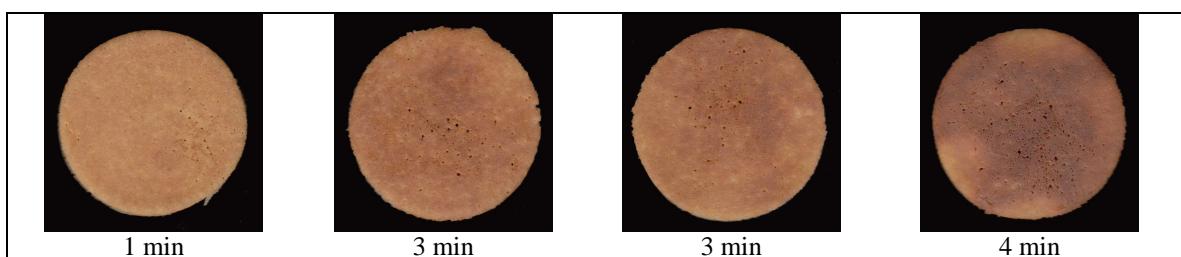


Figura III.15. Imágenes escaneadas de las creps a 250 °C para diferentes tiempos de cocción.

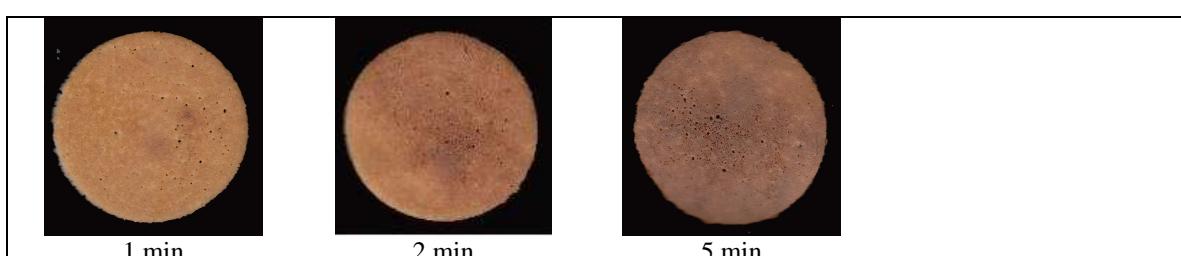


Figura III.16. Imágenes escaneadas de las creps a 260 °C para diferentes tiempos de cocción.

ANEXO IV - Imágenes digitales de las creps preparadas en condiciones reales

En la Tabla 1 de la memoria de este trabajo, dentro del apartado 2.3 “Diseño experimental” se describen las condiciones en las que se prepararon las creps en condiciones reales. A continuación se muestran las imágenes digitales correspondientes a las creps preparadas en las condiciones especificadas en dicha Tabla 1, incluyendo también las imágenes de las condiciones 6 y 7 mostradas en el apartado 3.5 “Predicción de temperatura a partir del color absoluto”.

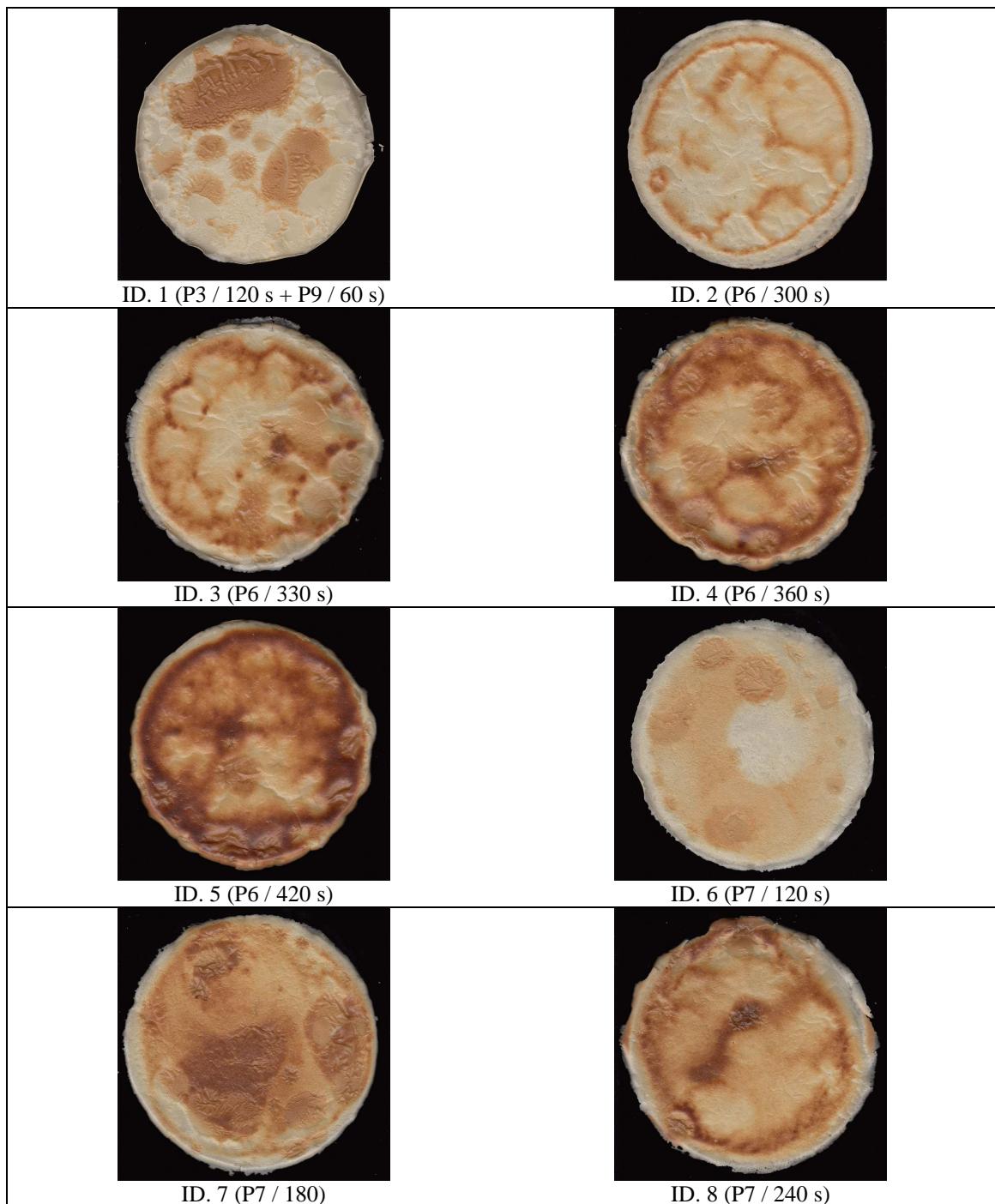


Figura IV.1. Imágenes escaneadas de las creps cocinadas en condiciones reales.