



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MODELAMIENTO Y AJUSTE DE PARÁMETROS DE LA COCCIÓN DE BUCATINI PARA LA DETERMINACIÓN DE SU TEXTURA.

LEIDY VICTORIA MOLINA REGALADO

Tesis para optar al grado de
Magister en ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
JOSE MIGUEL AGUILERA

Santiago de Chile, Septiembre, 2017
© 2017, Leidy Victoria Molina R



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MODELAMIENTO Y AJUSTE DE PARÁMETROS DE LA COCCIÓN DE BUCATINI PARA LA DETERMINACIÓN DE SU TEXTURA.

LEIDY VICTORIA MOLINA REGALADO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JOSE MIGUEL AGUILERA

AMADOR GUZMÁN

JAIME ORTIZ

JORGE GIRONÀS

Para completar las exigencias del grado de
Magister en ciencias de la Ingeniería.

Santiago de Chile, (Septiembre, 2017)

DEDICATORIA

A mi madre, hermano, novio y amigos,
que hicieron parte de este maravilloso
logro.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al profesor José Miguel Aguilera, supervisor de mi tesis por su apoyo, orientación y buena acogida, al profesor Amador Guzmán por todas sus enseñanzas y experiencia, a todos los miembros del laboratorio de Biomateriales por su buena disposición y ayuda.

Agradezco a mi familia por su constante comprensión, sobre todo a mi madre y mi novio por su amor y apoyo incondicional.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Bucatini	11
1.2 Métodos de cocción.....	12
1.2.1 Cocción en agua.....	12
1.2.2 Cocción en vapor a presión atmosférica	13
1.2.3. Cocción con vapor a vacío	13
1.3 Propiedades texturales.....	13
1.4 Modelamiento del proceso de cocción.....	16
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	17
2.1 Hipótesis.....	17
2.2 Objetivo general.....	17
2.3 Objetivos específicos.....	17
3 MATERIALES Y METODOS	17
3.1. Materia prima utilizada.....	17
3.2. Diseño y descripción del equipo de cocción a vacío.....	18
3.3. Diseño experimental.....	19
3.4. Proceso de cocción.....	20
3.5. Determinación de textura	20

3.6. Obtención de las correlaciones de textura.....	21
3.7. Modelo matemático de cocción	21
3.7.1 Condiciones de borde.....	26
3.7.2 Obtención de propiedades térmicas de la muestra	27
3.8. Implementación del modelo	28
3.8.1 Análisis de sensibilidad de los parámetros a estimar	29
3.8.2 Implementación del método de líneas.....	31
3.8.3 Ajuste de parámetros del modelo fenomenológico.	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
4.1. Comportamiento de la temperatura, la humedad y la textura en función del tiempo de cocción	34
4.2. Correlaciones de textura.....	38
4.2.1. Sumergida en agua a ebullición.....	38
4.2.2. Cocción con vapor a presión atmosférica.....	39
4.2.3 Cocción con vapor al vacío.....	39
4.3. Resultados del análisis de sensibilidad.....	40
4.4. Resultados del ajuste de parámetros	40
4.5. Resultados del modelo híbrido de textura en función de la humedad y la temperatura.....	44
6. CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	49
APÉNDICES.....	53
APÉNDICE A: Resultados gráficos del análisis de sensibilidad.....	54
APÉNDICE B: Gráficas de las características de textura en función de la humedad y la temperatura.	56
APÉNDICE C: Resultados de la humedad y la temperatura a través del grosor de la muestra durante la cocción.	63

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades mecánicas de la pasta cocida.....	14
Tabla 2. Diseño experimental.....	20
Tabla 3. Rango de respuesta de los parámetros escogidos para cada método de cocción.....	33
Tabla 4. Valores estimados y reportados de los parámetros fijos.....	34
Tabla 5. Parámetros óptimos ajustados a los datos experimentales.....	41
Tabla 6. Coeficientes de determinación y nivel de significancia para cada método de cocción.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Curva fuerza-deformación.....	15
Figura.2. Esquema del bucatini utilizado.....	18
Figura. 3. Esquema del equipo de vapor a vacío.....	19
Figura 4 Esquema del bucatini para cada método de cocción.....	22
Figura 5 Discretización espacial de la mitad superior del bucatini.....	32
Figura 6. Temperatura en el centro de la muestra en los tres métodos de cocción.....	35
Figura 7. Cantidad de agua ganada por la muestra en los tres métodos de cocción.....	36
Figura 8. Firmeza de la muestra en los tres métodos de cocción	37
Figura 9. Rigidez de la muestra en los tres métodos de cocción	37
Figura 10. Trabajo de la muestra en los tres métodos de cocción.....	38
Figura 11. Comparación de los resultados simulados y experimentales de la humedad con el tiempo para el método de cocción con agua en ebullición.....	42
Figura 12. Comparación de los resultados simulados y experimentales de la humedad con el tiempo para el método de cocción con vapor a presión atmosférica.....	43
Figura 13. Comparación de los resultados simulados y experimentales de la humedad con el tiempo para el método de cocción con vapor a vacío.....	43
Figura 14. Resultados de textura para la cocción en agua. (línea roja) resultados simulados, y datos experimentales (asteriscos).....	44
Figura 15. Resultados de textura para la cocción con vapor a presión atmosférica. (línea roja) resultados simulados, y datos experimentales (asteriscos).....	45
Figura 16. Resultados de textura para la cocción con vapor a vacío. (línea roja) resultados simulados, y datos experimentales (asteriscos).....	45

RESUMEN

En ésta tesis se determinan las características de textura del bucatini (rigidez, trabajo y firmeza), durante su cocción por tres métodos diferentes (i) sumergido en agua, (ii) con vapor a presión atmosférica, (iii) y con vapor a vacío, mediante el uso de métodos computacionales. En cada método se midió el contenido de agua absorbida, la temperatura en el centro de la muestra y la textura. Se desarrolló un modelo fenomenológico de transferencia de masa y calor que fue resuelto en Matlab® utilizando el método de líneas. Los parámetros del modelo fueron ajustados por mínimos cuadrados. Estos parámetros están asociados a los coeficientes de transferencia de masa y transferencia de calor que son; el coeficiente de difusión (D), el coeficiente de transferencia de masa por convección (K_c), el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c), y el coeficiente de transferencia de calor del aire quieto (h_{aq}). Además para el caso de los métodos de cocción con vapor se ajustaron la tasa de condensación (C), la actividad del agua (a_w), y la humedad relativa del medio (RH). De esta forma el modelo fue capaz de representar los resultados experimentales obtenidos en cada método de cocción. Las tres propiedades de textura decrecieron con el incremento de la humedad y la temperatura. El tiempo en alcanzar la temperatura del medio de cocción fue menor en la cocción a vacío (5 min), y la firmeza en la cocción con vapor a presión atmosférica obtuvo el mayor tiempo de los tres métodos en alcanzar su estabilidad (20 min).

Con respecto al trabajo aunque no se llegó a estabilizar en ninguno de los métodos de cocción, la tendencia muestra un decrecimiento mayor en la cocción con agua, seguido de la cocción con vapor a vacío, y la cocción con vapor a presión atmosférica. Con el modelo propuesto se logró predecir las características de textura del bucatini, confirmando su dependencia con la transferencia de masa y calor que ocurre durante la cocción. Finalmente los modelos fueron validados con el coeficiente de correlación (R^2), y el nivel del significancia (p), cuyos resultados muestran correlaciones estadísticamente significativas.

ABSTRACT

In this thesis the texture's characteristics of bucatini (rigidity, work and firmness) are determined during cooking by three different methods (i) submerged in water, (ii) steaming under atmospheric pressure, (iii) and vacuum steaming, Through the use of computational methods. In each method, the water content absorbed, the temperature at the center of the sample and the texture were measured. A phenomenological mass and heat transfer model was developed that was solved in Matlab® using the method of lines. The parameters of the model were adjusted by least squares. These parameters are associated with the mass transfer and heat transfer coefficients which are; the diffusion coefficient (D), the convective mass transfer coefficient (Kc), the convective heat transfer coefficient (hc), and the heat transfer coefficient of the quiet air (haq). In addition, the condensation rate (C), the water activity (aw), and the relative humidity of the medium (RH) were adjusted for steaming cooking methods. In this way the model was able to represent the experimental results obtained in each cooking method. The three texture properties decreased with the increase of humidity and temperature. The time to reach the temperature of the cooking medium was lower in the vacuum steaming cooking (5 min), and the firmness in steaming cooking under atmospheric pressure obtained was the longest of the three methods to reach stability (20 min). Although work did not stabilize in any of the cooking methods, the trend shows a greater decrease in cooking with water, followed by vacuum steaming cooking, and steaming at atmospheric pressure. With the proposed model, it was possible to predict the texture's characteristics of the bucatini confirming its dependence on the transfer of mass and heat that occurs during cooking. Finally the models were validated with the correlation coefficient (R^2), and the level of significance (p), whose results show statistically significant correlations.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de pasta en Chile es de 8.4 kilos al año per cápita, situándose en el segundo lugar en Latinoamérica, ya que es un producto accesible en términos de precio y rapidez de preparación (Cavalli, 2015). En cuanto a la calidad de la pasta, la textura juega un rol importante en la aceptación del consumidor. Sin embargo encontrar una textura ideal después de someter la pasta a cocción no es fácil y menos cuantificarla y describirla (Brown, 2013). Asimismo, durante este proceso de cocción se presentan variables que influyen en la calidad de la textura de una pasta como el tiempo y el método de cocción, y los fenómenos de transferencia de masa y calor, los cuales se encuentran directamente relacionados con los cambios estructurales de la pasta y su textura. De este modo nace la importancia de desarrollar un modelo que considere los fenómenos de transferencia de masa y calor que permita predecir de forma robusta las propiedades de textura.

1.1. Bucatini

El bucatini es una pasta alimentaria compuesta principalmente por almidón (75% aproximadamente) y gluten (15% aproximadamente). El almidón es un polisacárido vegetal, que contiene polímeros de glucosa de cadena larga y es insoluble en agua (Vaclavik y Elizabeth, 1998). El gluten es una proteína que juega un papel fundamental en la pasta, ya que le confiere capacidad de absorción de agua, cohesividad, y viscoelasticidad (Wieser, 2007). La interacción de ambos componentes llega a ser relevante durante el calentamiento, debido a los cambios que éste produce a estos componentes (Jekle et al., 2016).

La pasta es obtenida por la mezcla y amasado mecánico de sémolas o harinas de trigo ricos en gluten, con o sin la adición de sustancias colorantes autorizadas a este fin (Sandoval y Álvarez, 2011). El proceso de obtención de la pasta consta de varios pasos: mezclado, amasado, extrusión y secado. En la mezcla del trigo duro y agua se hidrata el almidón y las proteínas del gluten. En el amasado se obtiene una matriz continua de gluten

atrapando gránulos de almidón y sin burbujas de aire. En este momento los gránulos de almidón están intactos, y las proteínas son finamente distribuidas. Para darle la forma final a la pasta, la masa es extruida a través de una boquilla, y luego es cortada en longitudes más pequeñas. Finalmente en el secado, la pasta adquiere una superficie rugosa que permite absorber la salsa más fácilmente después de cocida (López, 2015).

1.2 Métodos de cocción

Actualmente existen dos métodos de cocción de pastas en húmedo, por inmersión en agua hirviendo, y cocción con vapor a presión atmosférica. El vapor ha sido ampliamente utilizado en cocción, ya que posee una gran cantidad de energía que transfiere como calor latente (Myhrvold et al., 2011). Sin embargo, no hay muchos estudios de cocción con vapor a bajas temperaturas ($<100^{\circ}\text{C}$), probablemente debido a que el equipo para realizar este proceso es complejo y requiere de una bomba de vacío.

1.2.1 Cocción en agua.

Es el método convencional de cocción. La transferencia de calor y masa ocurre por convección, y difusión del agua a través de la pasta. La presencia de abundante agua acompañada de una temperatura aproximada de 100°C genera cambios estructurales en el almidón y el gluten. El almidón experimenta una transformación termo-física que es la gelatinización, acompañada por una expansión de volumen o hinchamiento, lo cual ocurre simultáneamente durante el proceso hidrotérmico (Eliasson, 1983). Las proteínas del gluten se desnaturalizan y generan una estructura viscoelástica a la pasta cocida. Hay dos interacciones principales o fenómenos entre el almidón y la proteína. La primera es una hidratación competitiva durante sus cambios estructurales, y la segunda es una barrera de difusión por las proteínas de gluten localizadas en la superficie del gránulo de almidón que pueden cambiar la difusión de agua en los gránulos de almidón (Jekle et al., 2016).

1.2.2 Cocción en vapor a presión atmosférica

Se utiliza vapor saturado que oscila en los $99\pm 1^{\circ}\text{C}$ para cocer la pasta. La transferencia de calor y masa ocurre por convección, el vapor se condensa en la superficie de la pasta y la humedad se difunde a través de ella. A diferencia de la cocción en agua, éste método genera poca hidratación en la pasta lo que provoca una menor gelatinización del almidón.

1.2.3. Cocción con vapor a vacío

En este método la cocción se realiza a una presión menor que la atmosférica, reduciendo el punto de ebullición del agua, obteniendo una temperatura de cocción entre $65\pm 2^{\circ}\text{C}$. Estas condiciones no permiten una completa gelatinización, sino la gelatinización de un menor número de gránulos de almidón, ya que supera la temperatura de gelatinización del almidón de la pasta, que se encuentra en los $55-59^{\circ}\text{C}$ y la temperatura de la desnaturalización del gluten ($55-75^{\circ}\text{C}$) (Kulp y Ponte, 2000). El efecto del vacío en la cocción del almidón fue investigado por Ovalle et al. (2013). A diferencia del método de cocción con vapor a presión atmosférica, el vacío genera la ausencia del aire, lo que puede provocar cambios en la difusión de la humedad a través de la pasta (Bahrani, et al., 2014). De manera similar a los anteriores métodos de cocción la transferencia de masa y calor también se produce por convección y difusión de la humedad.

1.3 Propiedades texturales

La pasta cocida puede ser definida por las propiedades texturales enlistadas en la **Tabla 1**. En donde se ha escogido para este estudio las tres primeras propiedades (firmeza, trabajo y rigidez), las cuales son obtenidas de la curva fuerza vs deformación. (**Figura 1**)

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la pasta cocida.

Dureza/Firmeza (N)	Es la fuerza necesaria para alcanzar una deformación dada (Kilcast, 2004). Es la máxima fuerza requerida para cortar el espagueti, la cual corresponde al máximo peak de la curva fuerza-deformación (Smewing, 1997)
Trabajo (N*mm)	Es la energía necesaria para producir la deformación, la cual equivale al área bajo la curva obtenida desde el inicio de la deformación hasta el peak máximo (Smewing, 1997)
Rigidez (N/mm)	Es la pendiente desde el inicio de la deformación hasta el peak máximo, la cual indica cual debe ser la fuerza distribuida en cada mm del espagueti para que sea cortado en una firmeza específica (Smewing, 1997)
Adhesividad	Es el trabajo necesario para superar las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento, y la superficie de otros materiales que entran en contacto con los alimentos (Kilcast, 2004)
Masticabilidad	Es la energía requerida para reducir el alimento a un estado listo para tragar, es un producto de la dureza, la cohesividad y la elasticidad (Kilcast, 2004)

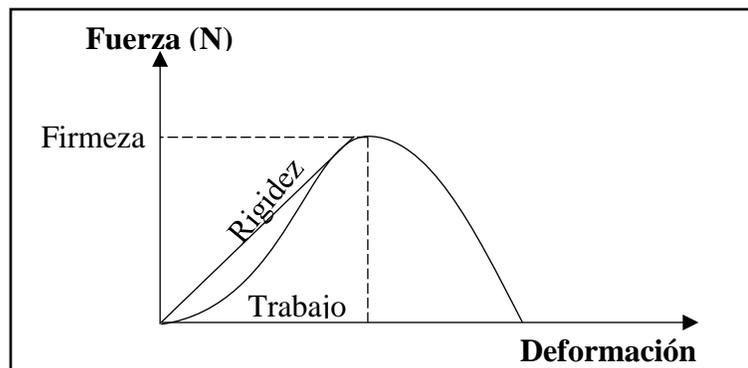


Figura 1. Curva fuerza-deformación

La textura es mayormente influenciada por la gelatinización del almidón, y la desnaturalización de la proteína (Cunin et al., 1995). El tiempo de cocción, y la relación agua-pasta influye en todos los parámetros de textura. Para propósitos experimentales una relación agua-pasta de 10:1 es usada para cocer la pasta de manera óptima, determinando como tiempo de cocción al correspondiente cuando se desaparece el núcleo central (Kilcast, 2004).

La influencia de la humedad y la temperatura sobre la textura de la pasta ha sido ampliamente estudiada. El proceso de cocción, y la distribución del agua han sido monitoreados en tiempo real, encontrando que la tasa de ingreso del agua es dependiente de la composición de la pasta. Las muestras ricas en almidón muestran una distribución del agua y una microestructura más homogénea. En contraste las muestras que fueron ricas en proteína muestran una distribución y una microestructura heterogénea, por lo que el contenido de gluten afecta el contenido local de agua, y la zona de gelatinización (Bernin et al., 2014). Se han evaluado los cambios en la estructura de la pasta durante la cocción en relación con su superficie y a su estructura interna afectada por la baja difusión del agua hacia el centro (Cunin et al., 1995). Se ha estudiado la resistencia de un spaghetti en función del contenido de agua a diferentes temperaturas, durante su proceso de secado, en donde se presentaba una disminución abrupta de esta característica a medida que incrementaba la temperatura y la humedad (Cuq et al., 2003).

1.4 Modelamiento del proceso de cocción.

Para comprender mejor el proceso de transferencia de masa y calor que ocurre durante la cocción, se han utilizado softwares que permitan modelar este proceso. Uno de los métodos numéricos más utilizados son las diferencias finitas y elementos finitos. El método de líneas es un método que se basa en el concepto de diferencias finitas para la transformación de derivadas parciales en ecuaciones diferenciales ordinarias, facilitando su solución mediante el uso de softwares fáciles de programar como lo es Matlab® (Miranda, 2011).

Se ha estudiado la transferencia simultanea de masa y calor en un material de almidón durante un proceso hidrotérmico mediante dos procesos, el primero aplicando vapor de manera directa, y el segundo aplicando vapor pero con una previa generación de vacío, ambos llegando a una temperatura de 120°C. Los resultados simulados se acercaron bastante a los experimentales, y además se realizó un estudio de sensibilidad de los parámetros del modelo utilizado (Bahrani et al., 2014)

Se ha evaluado un modelo de transferencia de masa y calor de una carne en forma cilíndrica durante su cocción, en un horno híbrido con vapor. Los perfiles de humedad y temperatura fueron determinados en función de su posición y del tiempo, cuyos resultados simulados se acercaron bastante a los obtenidos experimentalmente (Isleroglu y Kaymak, 2016).

Se han modelado la cocción del arroz incluyendo la transferencia de masa, las transiciones de fase del almidón y su gelatinización realizando la variación del contenido de agua inicial, cuyo objetivo principal es la predicción de su textura. El modelo fue resuelto con elementos finitos prediciendo satisfactoriamente la captura de agua experimental (Briffaz et al., 2014).

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis.

Si se modela la transferencia de masa y calor que ocurre en el bucatini durante su proceso de cocción, a través de un modelo fenomenológico en estado transiente, entonces es posible predecir su textura.

2.2 Objetivo general.

Determinar las características de textura del bucatini (rigidez, trabajo y firmeza), mediante la modelación de la transferencia de masa y calor durante su cocción por tres métodos diferentes (i) sumergido en agua hirviendo, (ii) con vapor a presión atmosférica, (iii) y con vapor a vacío, mediante el uso de modelos computacionales.

2.3 Objetivos específicos.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Montar y poner en marcha un equipo de cocción con vapor a vacío.
2. Obtener experimentalmente valores de textura después de la cocción del bucatini en los tres métodos de cocción.
3. Plantear, y modelar un modelo fenomenológico de transferencia de masa y calor, y calibrar sus parámetros para ajustarlo a cada método de cocción.

3 MATERIALES Y METODOS.

3.1. Materia prima utilizada

La pasta utilizada fue bucatini No 9 (**Figura 2**), que es una pasta gruesa en forma de espagueti con un agujero que atraviesa el centro. Cada 100g de pasta contiene 70,2g de almidón y 13,5g de proteína de gluten. Se cortaron varias piezas de dimensiones 3 cm de

longitud, diámetro interno de 1 mm y diámetro externo de 3 mm. Fueron almacenadas en bolsas plásticas para evitar la absorción de humedad hasta el momento de la cocción.

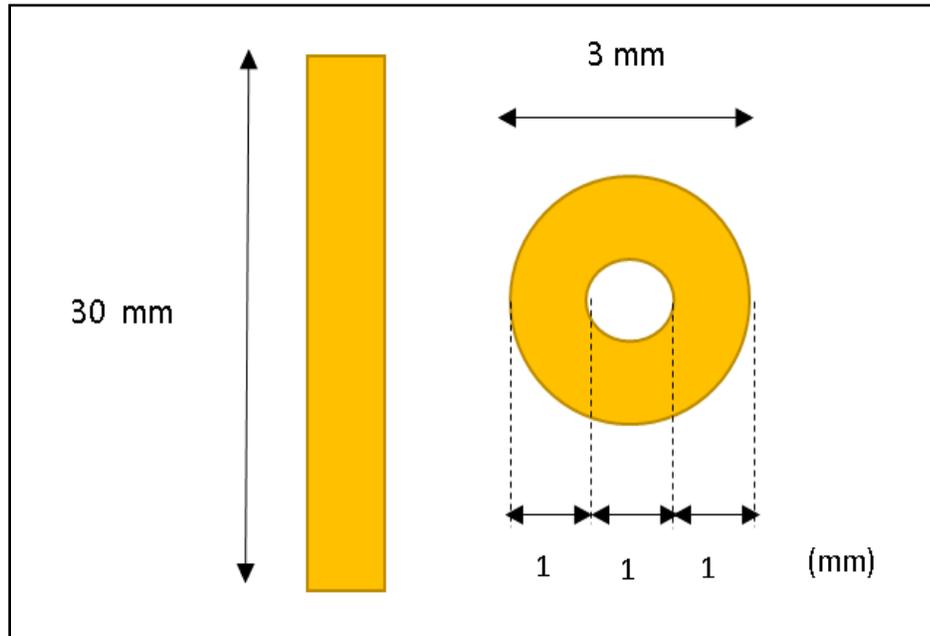


Figura 2. Esquema del bucatini utilizado.

3.2 . Diseño y descripción del equipo de cocción a vacío.

El sistema de cocción al vacío consiste en un matraz redondo de vidrio que contiene agua, el cual es calentado con una manta calefactora, éste se conecta a una cápsula de vidrio donde es colocada la muestra, la cual es conectada a una termocupla midiendo la temperatura en su centro. Paralelamente otra termocupla es utilizada para medir la temperatura alrededor de la muestra. Este arreglo fue conectado a dos condensadores, y a su vez con una bomba de vacío de membrana marca “Rocker”. **(Figura 3.)**

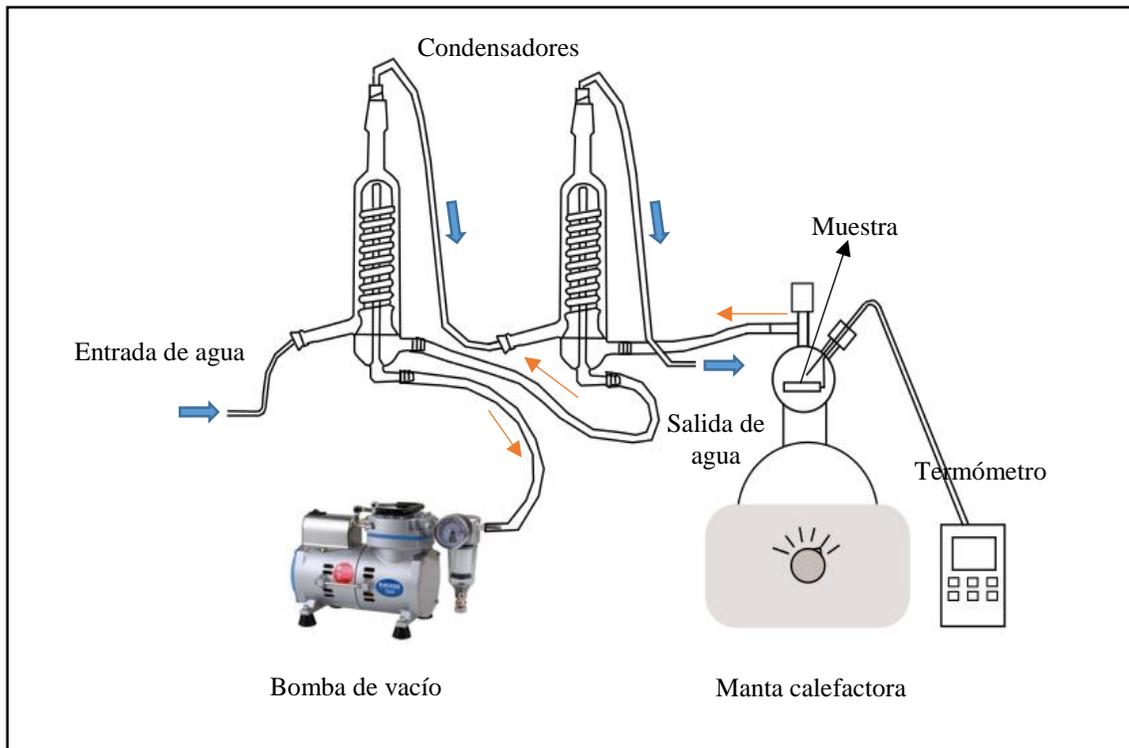


Figura 3. Esquema del equipo de vapor a vacío.

3.3. Diseño experimental

La **Tabla 2.** Muestra el diseño experimental realizado. Las variables especificadas fueron el tiempo y el método de cocción. Los experimentos se realizaron por triplicado. En la cocción con vapor a vacío la presión se reguló a 0,246 bares (el agua hirvió a 65 ± 2 ° C), mientras que con el vapor a presión atmosférica, la bomba de vacío no se utilizó (el agua hirvió a 99 ± 1 ° C). En la cocción con agua la muestra fue sumergida en agua a ebullición (a 99 ± 1 ° C). La desviación estándar corresponde al proceso de cocción.

Tabla 2. Diseño experimental

Método de cocción	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Sumergida en agua	99 ± 1	5
		8
		10
		15
		20
		25
Vapor a presión atmosférica	99 ± 1	5
		8
		10
		15
		20
		25
Vapor a vacío	65 ± 2	5
		8
		10
		15
		20
		25

3.4. Proceso de cocción.

La toma de datos experimentales comenzó cuando la temperatura de cada método de cocción se estabilizó o se mantuvo constante. Cada muestra fue sellada con almidón gelatinizado en el extremo para evitar la entrada de agua hacia su interior. Cada muestra fue pesada y colocada dentro de la cámara de vidrio, a la cual se le colocó una termocupla, que a su vez la sostenía y medía su temperatura. Después de cada cocción las muestras fueron pesadas registrando la cantidad de humedad que habían adquirido durante su cocción.

3.5. Determinación de textura

La prueba mecánica se realizó inmediatamente después de cada cocción. Se analizó la textura de las muestras utilizando un analizador universal de textura TA.XT2 (Corporación de tecnologías de textura., USA), acoplado a un PC con adquisición de

datos. La evaluación de la textura se realizó siguiendo el método AACC 16-50 (AACC, 2000) (Peiró, 2015), que consiste en el uso del conjunto de cuchillas con Warner bratzler (HDP / BSW) mm de espesor a una velocidad constante de 0,5 mm / s hasta la deformación completa de la muestra.

Se obtuvieron Curvas de Fuerza vs Deformación, y se definieron los valores de firmeza, el trabajo y la rigidez utilizando el software *Exponent Stable Micro Systems*.

3.6. Obtención de las correlaciones de textura.

Se obtuvieron usando la herramienta de Matlab® “curve fitting toolbox”, que estima los coeficientes de un modelo que se ajusta a un conjunto de datos utilizando el método de los mínimos cuadrados. Para obtener los coeficientes el método se basa en la minimización de la suma de los residuos al cuadrado (ecuación 2). El residuo del punto i es definido como la diferencia entre el valor de la respuesta y_i y el valor ajustado \hat{y}_i (ecuación 1).

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

En donde n es el número de datos experimentales a ajustar.

3.7. Modelo matemático de cocción

La **Figura 4** representa la muestra durante su proceso de cocción para cada método. El calor y la humedad se transfieren por convección. Se observa la dirección de la transferencia de calor y masa en una dimensión $T(y, t)$ y $W(y, t)$, donde y_0 corresponde a la superficie del bucatini y y corresponde al centro del bucatini. La muestra posee una simetría geométrica y térmica alrededor de su línea central z , lo que permite modelar la

mitad del bucatini (área punteada) y asumir que ocurre el mismo fenómeno de transferencia de masa y calor en la otra mitad del bucatini.

En la **Figura 4(A)**. Los círculos azules corresponden a las moléculas de agua, y los círculos blancos corresponden a las moléculas de aire. Representan el medio de cocción con vapor a presión atmosférica en donde ambas moléculas están presentes. Las moléculas están distribuidas en un volumen mayor, debido a que el vapor posee una densidad baja. En la **Figura 4(B)**. Solo se representan las moléculas de vapor, debido a la ausencia de moléculas de aire que genera el vacío. Finalmente la **Figura 4(C)**, representa las moléculas de agua, las cuales se distribuyen de forma más ordenada y con una densidad mayor en comparación con la fase gaseosa.

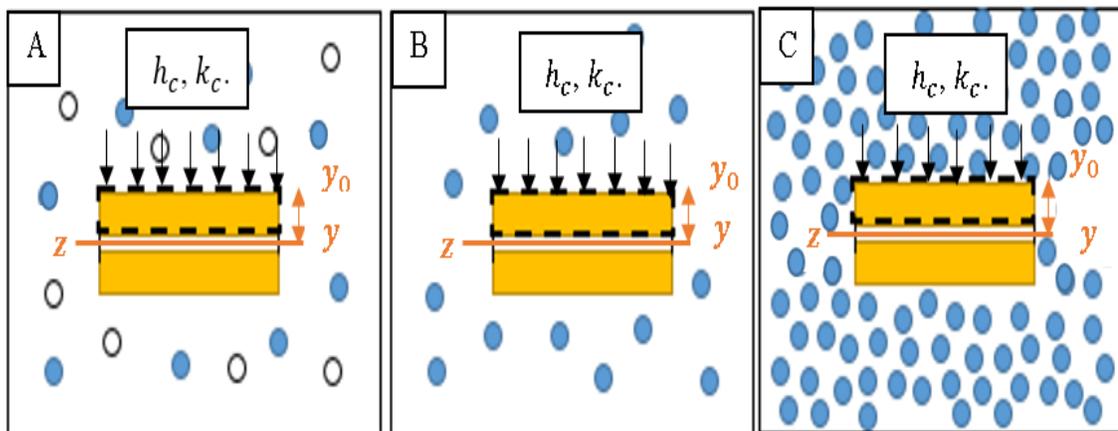


Figura 4. Esquema del bucatini para cada método de cocción. Cocción con vapor a presión atmosférica (A), vapor con presión a vacío (B) y cocción en agua (C).

El modelo propuesto en este trabajo fue adaptado de Bahrani et al. (2014). Estos autores estudiaron la transferencia simultánea de calor y masa en un material amiláceo.

Para el desarrollo del modelo del bucatini se establecieron los siguientes supuestos:

1. La transferencia de masa y calor se presenta en una dimensión, y en estado transiente

2. La distribución de temperatura y humedad iniciales son uniformes.
3. Las propiedades térmicas como el calor específico y la conductividad térmica varían con el tiempo de cocción.
4. Se asumen coeficientes de transferencia de masa (k_c) y calor (h_c) constantes, debido a que la temperatura del medio de cocción es constante.
5. El bucatini es considerado como un sólido homogéneo isotrópico cuyas propiedades físicas no dependen de su orientación.
6. El calor es transferido a la superficie por convección y hacia el centro geométrico por conducción.
7. La transferencia de masa desde el medio hacia el bucatini es debido a un gradiente de concentración.
8. El flujo de calor es uniforme a lo largo del bucatini.

Balance de energía

$$\rho_{bs} C_{ps} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

En donde ρ_{bs} es la densidad de la muestra, C_{ps} es el calor específico de la muestra, k es la conductividad térmica de la muestra, Q_1 es el calor por condensación, y Q_2 es el calor por gelatinización.

Balance de masa

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla W) + \frac{I}{\rho_{db}} \quad (4)$$

En donde D es el coeficiente de difusión, I es la tasa de condensación, y ρ_{db} es la densidad de la muestra en base seca.

$$Q_1 = L_c I \quad (5)$$

En donde Q_1 es el calor de condensación, L_c es el calor latente de condensación, y I es la tasa de condensación.

$$Q_2 = \theta \Delta H_{melt} \quad (6)$$

En donde Q_2 es el calor de gelatinización, θ es la tasa de fusión de las partículas de almidón, y ΔH_{melt} es la entalpia de fusión del almidón.

Ecuaciones constitutivas

$$\theta = \rho_{db} * \frac{\partial \zeta_{melt}}{\partial t} \quad (7)$$

En donde ρ_{db} es la densidad de la muestra en base seca, ζ_{melt} es la fracción de almidón gelatinizado y t es el tiempo.

$$\frac{\partial \zeta_{melt}}{\partial t} = k e^{-k(t-teq)} \quad (8)$$

En donde k es la constante cinética de la reacción de primer orden, t es el tiempo y teq es el tiempo en equilibrio.

$$I = C * (P_v - P_{v,eq}) \quad (9)$$

En donde C es el coeficiente de condensación, P_v es la presión de vapor, y $P_{v,eq}$ es la presión de vapor a la temperatura de equilibrio.

$$P_v = RH_{env} * P_{sat}(T_{env}) \quad (10)$$

En donde RH_{env} es la humedad relativa del ambiente, y $P_{sat}(T_{env})$ es la presión de saturación a temperatura ambiente.

$$P_{v,eq} = a_w * P_{sat}(T) \quad (11)$$

En donde a_w es la actividad de agua, y $P_{sat}(T)$ es la presión de saturación.

$$P_{sat}(T) = 133.32 \cdot \exp \left[46.784 - \frac{6435}{T} - 3.868 - \ln(T) \right] \quad (12)$$

Las ecuaciones 3 y 4 corresponden al balance de energía y masa para los métodos de cocción con vapor atmosférico y a vacío. El calor de condensación (ecuación 5) depende de la tasa de condensación I (ecuación 9). Esta depende de la diferencia entre la presión de vapor que hay entre la temperatura de la muestra y la temperatura del medio ambiente (ecuación 10 y 11). La presión de saturación (ecuación 12) es una relación empírica de Dupré-Bernard, la cual es una modificación de la relación de Clausius-Clapeyron. Esta relación es válida para las temperatura de -50 a $+200^\circ\text{C}$ (Bahrani et al., 2014). Finalmente L_c es el calor latente de condensación.

Por otra parte, el calor de gelatinización es descrito en la (ecuación 6) la cual depende de ΔH_{melt} , que es la entalpia de fusión del almidón, y θ , la cual es la tasa de fusión de las partículas de almidón (ecuación 7). Este último depende a su vez de la densidad en base seca ρ_{db} y de $\partial \zeta_{melt} / \partial t$ que es la tasa de cambio de las propiedades termo-físicas descritas como una reacción irreversible de primer orden (ecuación 8) (Gopalakrishna et al., 1992).

Para este caso de estudio determinar si existe o no gelatinización en la cocción con vapor es un poco difícil, ya que para que exista esta reacción se necesita un exceso de agua con respecto a la cantidad de almidón, por lo que esta respuesta deberá darla la simulación, ya

que Q_2 depende del calor latente de fusión del almidón ΔH_{melt} , el cuál será uno de los parámetros a ajustar más adelante, determinando si afecta en poca o gran cantidad el ajuste del modelo a los datos experimentales. Para el caso del balance de masa y energía para el método de cocción con agua, El término Q_1 se elimina de las ecuaciones 3 y 4 puesto que no existe calor por condensación para este caso.

3.7.1 Condiciones de borde

En la **Figura 4** se puede observar el dominio especificado (correspondiente al recuadro punteado), para determinar las condiciones de frontera para cada uno de los métodos de cocción. Se especificaron dos condiciones de frontera para la temperatura y humedad para cada método de cocción, correspondientes al borde superior y al centro del bucatini.

En los tres casos de cocción, el borde superior se especificó como transferencia de calor por convección desde el fluido (vapor o agua según corresponda) hacia la superficie (ecuación 13). En el caso del borde inferior que corresponde al centro del bucatini, la condición de borde es la misma, sin embargo, aquí la transferencia de calor del fluido es por el aire quieto que se encuentra atrapado en el centro de la muestra (ecuación 14).

$$k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y_0} = h \cdot (T_a - T_s(y = y_0)) \quad (13)$$

$$k \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h_{aq} \cdot (T_a - T_s(y = 0)) \quad (14)$$

Donde h [$W/m^2 \cdot K$], es el coeficiente de transferencia de calor del vapor o del agua caliente según el método de cocción, h_{aq} [$W/m^2 \cdot K$] es el coeficiente de transferencia

de calor del aire quieto dentro del bucatini, T_a es la temperatura en el seno del vapor, T_s [K] es la temperatura en la superficie del bucatini.

La transferencia de masa para el borde superior se especificó por convección desde el fluido hacia la superficie (ecuación 15), y en el centro se asumió que no hay transferencia de humedad, ya que la muestra se encontraba completamente sellada por los bordes (ecuación 16).

$$D \cdot \left. \frac{\partial W}{\partial y} \right|_{y=y_0} = k_c \cdot (W_{sat} - W_s(y = y_0)) \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial W}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (16)$$

Donde k_c [m/s] es el coeficiente de transferencia de masa del vapor o agua según el método de cocción, W_{sat} [kg] es la humedad de saturación del medio, y W_s [kg] es la humedad en la superficie del bucatini [kg].

3.7.2 Obtención de propiedades térmicas de la muestra

El modelo planteado en la sección 4.6 requiere conocer las propiedades como la conductividad térmica K_m y el calor específico de la muestra C_{pm} . Ambas propiedades se escogieron para materiales con un gran porcentaje en carbohidratos como es el caso del bucatini (ecuaciones 17 y 18). El calor específico del agua C_{pw} , no presenta mayores cambios en el rango de temperatura de cocción por lo que se asumió constante con un valor de 4.180 [kJ/kg°C]. Para la conductividad térmica del agua K_w , se encontraron reportadas dos correlaciones (ecuaciones 19 y 20), cada una de ellas dependiendo del rango de temperatura a trabajar (Valentas et al., 1997). Luego para calcular conductividad térmica y el calor específico total de la muestra, se calcula la suma ponderada entre las

propiedades de la muestra seca y las propiedades del agua, respecto a la cantidad de agua que hay en la muestra X_w durante el periodo de cocción (ecuaciones 21 y 22).

$$K_m = 0.20141 + (1.3874e - 3) \cdot T - (4.3312e - 6) \cdot T^2 \quad (17)$$

$$C_{pm} = 1.5488 + (1.9625e - 3) \cdot T - (5.9399e - 6) \cdot T^2 \quad (18)$$

$$K_w = 0.5513 + 0.0026 \cdot T - (1.29e - 5) \cdot T^2 \quad \text{para } 0 \leq T \leq 90^\circ\text{C} \quad (19)$$

$$K_w = 0.0926 + (0.2804 - 0.0007 \cdot T)^{2/3} \quad \text{para } 90 \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (20)$$

$$C_{pT} = C_{pw} \cdot X_w + C_{pm} \cdot (1 - X_w) \quad (21)$$

$$K_T = K_w \cdot X_w + K_m \cdot (1 - X_w) \quad (22)$$

3.8. Implementación del modelo

El modelo fenomenológico que describe la transferencia de masa y calor para cada método de cocción es difícil de resolver de manera analítica o exacta, por lo que es necesario aplicar métodos numéricos (Schiesser y Griffiths, 2009).

Los métodos numéricos permiten discretizar las ecuaciones diferenciales parciales para que su tratamiento matemático sea más simple y aplicar un algoritmo de solución (Skiba,

2005). La elección del método numérico dependerá del tipo de ecuación a resolver, el tipo de geometría, y si es o no apropiado el uso de mallado (Li y Chen, 2009)

Los métodos numéricos se dividen en 6 categorías: diferencias finitas; métodos espectrales; elementos finitos; de contorno; volúmenes finitos; y métodos sin mallas (Miranda, 2011).

Para este caso en donde se resuelven ecuaciones de derivadas parciales, los métodos más utilizados son los métodos de elementos y diferencias finitas, ya que poseen bajo costo computacional. El método de diferencias finitas posee ventajas como su fácil entendimiento y que puede ser codificada en software numéricos conocidos (como es el caso de Matlab®), y además es posible utilizarlo para geometrías regulares (Domínguez, 2006), como es este caso de estudio.

Debido al creciente desarrollo de paquetes computacionales ha ido ganando importancia un híbrido del método de diferencias finitas, que es el método de líneas. En éste método se reemplazan las derivadas parciales por discretizaciones algebraicas, transformando el dominio continuo en una malla de nodos, dejando solo la derivada temporal en la ecuación diferencial parcial, convirtiéndose ahora en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (Miranda, 2011).

El método de líneas es aplicable a problemas de propagación donde aparece explícitamente una derivada parcial con respecto al tiempo para cada variable dependiente del problema. Si no se da esta condición entonces el método no es aplicable (Kee y Petzold, 1986).

A continuación se presentará la implementación de este método sobre las ecuaciones diferenciales parciales presentes que describen la transferencia de masa y calor del bucatini en los tres métodos de cocción.

3.8.1 Análisis de sensibilidad de los parámetros a estimar

Como se busca predecir el comportamiento de un fenómeno real, existe cierta incertidumbre en los valores de todos los parámetros utilizados, por lo que es necesario

realizar una calibración de los mismos con el fin de encontrar los valores que más se ajustan al comportamiento real de cocción.

Antes de su estimación se realizó un análisis de sensibilidad, el cual consiste en encontrar la variación de cada una de las variables de respuesta (humedad y temperatura) con respecto a cada uno de los parámetros presentes en el modelo.

Los parámetros escogidos para realizar el análisis de sensibilidad fueron aquellos valores que no se encontraban reportados en la literatura o que presentaban diferencias en las condiciones de los cuales fueron obtenidos.

Se determinó un vector de parámetros para cada método de cocción. Para el caso de la cocción con vapor a presión atmosférica y a vacío (Pv), y para la cocción con agua (Pa).

$$Pv = [D, C, hc, aw, RH, Kc, haq]$$

$$Pa = [D, hc, Kc, haq]$$

Donde D es el coeficiente de difusión, C es el coeficiente de condensación de vapor sobre la muestra, hc ese el coeficiente de transferencia de calor por convección, aw es la actividad de agua de la muestra, RH es la humedad relativa, Kc es el coeficiente de transferencia de masa por convección y haq es el coeficiente de transferencia de calor del aire quieto.

El método consiste en la construcción y la solución de una matriz de sensibilidad compuesta por las derivadas parciales de la variable con respecto a cada parámetro. Siendo $Gv(t)$ la matriz de las cocciones a vapor y $Ga(t)$ la matriz de la cocción en agua (González y Gelmi, 2014).

$$Gv(t) = \left[\left(\begin{array}{ccccccc} \frac{\partial T}{\partial D} & \frac{\partial T}{\partial C} & \frac{\partial T}{\partial hc} & \frac{\partial T}{\partial aw} & \frac{\partial T}{\partial RH} & \frac{\partial T}{\partial Kc} & \frac{\partial T}{\partial haq} \\ \frac{\partial H}{\partial D} & \frac{\partial H}{\partial C} & \frac{\partial H}{\partial hc} & \frac{\partial H}{\partial aw} & \frac{\partial H}{\partial RH} & \frac{\partial H}{\partial Kc} & \frac{\partial H}{\partial haq} \end{array} \right) \right]$$

$$Ga(t) = \left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial T}{\partial D} & \frac{\partial T}{\partial hc} & \frac{\partial T}{\partial Kc} & \frac{\partial T}{\partial haq} \\ \frac{\partial H}{\partial D} & \frac{\partial H}{\partial hc} & \frac{\partial H}{\partial Kc} & \frac{\partial H}{\partial haq} \end{array} \right]$$

La función objetivo que mide el ajuste de la predicción del modelo y que lo evalúa a los datos experimentales para los vectores de parámetros (Pv, Pa) se definió como la (ecuación 23).

$$J(Pv, Pa) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{T_{mod} - T_{exp}}{(T_{exp})_{max}} \right)^2 + \sum_{i=0}^n \left(\frac{H_{mod} - H_{exp}}{(H_{exp})_{max}} \right)^2 \quad (23)$$

La sumatoria de la función objetivo comprende el tiempo muestreado i , para las variables medidas experimentalmente, las cuales son la temperatura (T) y la humedad (H). La variable $(T_{exp})_{max}$ y $(H_{exp})_{max}$ corresponden al valor máximo medido por las variables de temperatura y humedad respectivamente durante el experimento. De esta manera se normalizan las salidas del modelo, ya que los valores de temperatura son mucho mayores que los de humedad, esto permite darle la misma importancia relativa en el ajuste durante la sumatoria.

3.8.2 Implementación del método de líneas.

El procedimiento comienza con la especificación de la región en donde se determinará la transferencia calor y masa, debido a la simetría de la muestra se decide tomar la parte superior de la muestra (región punteada). A continuación se discretiza esta región, dividiéndola en segmentos de igual tamaño en el eje y . En la **Figura 5** se puede observar esta discretización.

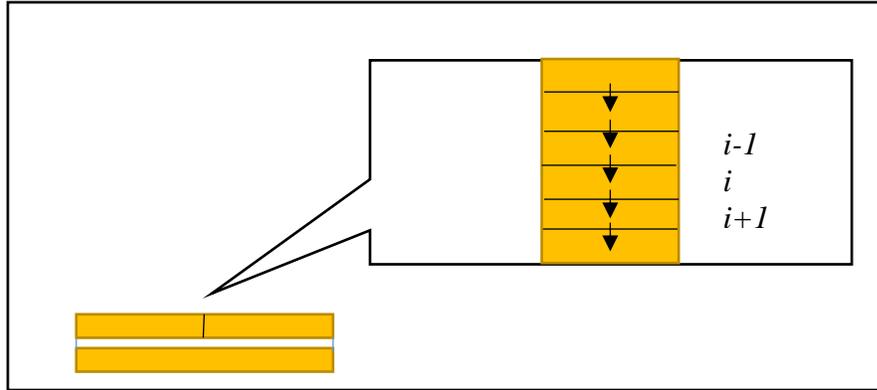


Figura 5. Discretización espacial de la mitad superior del bucatini.

Para cada división (Δy), se define el número de nodos ($\Delta y + 1$). En cada nodo se reemplazan las derivadas por elementos de diferencias finitas (ecuaciones 24 y 25). La solución de cada nodo dependerá de los valores de los nodos vecinos en ese mismo tiempo, por lo que se deben resolver simultáneamente (Miranda, 2011). La solución se realiza en una dimensión teniendo en cuenta que las variables a resolver son la temperatura y la humedad, ambas en función de la variable independiente que es el tiempo.

$$\frac{dT_i}{dt} = \left(\frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{(\Delta y)^2} \right); \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (24)$$

$$\frac{dw_i}{dt} = \left(\frac{W_{i+1} - 2W_i + W_{i-1}}{(\Delta y)^2} \right); \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (25)$$

Una vez reemplazadas en el balance de masa y energía, éstas son resueltas como ecuaciones diferenciales ordinarias. Debido a que el sistema de ecuaciones diferenciales resultantes con el método de líneas es usualmente stiff. Es decir que posee algunos términos que pueden conducir a una rápida variación en la solución si no se resuelve con el método numérico adecuado (Schiesser y Griffiths, 2009). Para resolver este sistema de ecuaciones se utilizó el comando ode15s de Matlab®, el cual es un integrador stiff.

3.8.3 Ajuste de parámetros del modelo fenomenológico.

Consiste en encontrar un set de parámetros desconocidos del proceso, pero que se conoce su rango de respuesta por literatura, minimizando el error de predicción del modelo a lo largo de un experimento determinado, ajustándose lo mejor posible a los datos de humedad y temperatura obtenidos experimentalmente.

El modelo propuesto presenta no linealidades por lo que fue necesario utilizar el comando de optimización de Matlab® llamado “fmincon” el cual encuentra el mínimo de una función multivariable no lineal con restricciones, ya que es necesario especificar un intervalo con un valor mínimo y máximo para cada parámetro, (**Tabla 3**) de tal manera que la solución siempre se encuentre dentro de ese rango, y que a su vez tenga sentido físico. El conjunto de parámetros establecidos como constantes fueron encontrados en literatura u obtenidos experimentalmente. (**Tabla 4**). Para la solución del problema de optimización dependió en gran parte de los estimados iniciales de cada parámetro.

Tabla 3. Rango de respuesta de los parámetros escogidos para cada método de cocción.

Método de Cocción	Parámetro	Límite Inferior	Límite Superior	Media
Vapor a Presión atmosférica	$D[m^2/s]$	$9.30 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5.0005 \cdot 10^{-8}$
	$C[s/m^2]$	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5.5 \cdot 10^{-11}$
	$hc[W/m^2 * K]$	50	300	175
	aw	0.3	1	0.65
	RH	0.7	1	0.85
	$Kc[m/s]$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5.0001 \cdot 10^{-6}$
	$haq[W/m^2 * K]$	20	50	35
Vapor a Vacío	$D[m^2/s]$	$9.30 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5.0047 \cdot 10^{-9}$
	$C[s/m^2]$	$1 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5.05 \cdot 10^{-10}$
	$hc[W/m^2 * K]$	100	300	200
	aw	0.3	1	0.65
	RH	0.7	1	0.85
	$Kc[m/s]$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5.0001 \cdot 10^{-6}$
	$haq[W/m^2 * K]$	20	50	35
	$D[m^2/s]$	$9.30 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5.0005 \cdot 10^{-8}$
	$hc[W/m^2 * K]$	10	300	155

Cocción con agua	$Kc[m/s]$	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$
	$haq[W/m^2 * K]$	1	100	50.5

Tabla 4. Valores estimados y reportados de los parámetros fijos.

Parámetro	Vapor con vacío	Vapor atmosférico	Sumergido en agua	Referencia
$\rho_{db} [Kg / m^3]$	1035.1	1035.1	1035.1	Experimentalmente
$T_{eq} [K]$	65	99.2	100	Experimentalmente
$Lc [J / Kg]$	$2.2 \cdot 10^6$	$2.2 \cdot 10^6$	*	(Liley y Gambill,1973)
$\rho [Kg / m^3]$	1507	1507	1507	Experimentalmente
$W_{sat} [Kg]$	$1.42 \cdot 10^{-5}$	$5.14 \cdot 10^{-5}$	0.5016	(Cengel y Boles, 2002).
$k [1/s]$	$2.30 \cdot 10^{-3}$	$2.30 \cdot 10^{-3}$	$2.30 \cdot 10^{-3}$	(Sayar et al., 2001).
$DH_{melt} [J/Kg]$	7400	7400	7400	(Fujita y Fujiyama, 1993).

* Este valor no se encuentra en éste método de cocción.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Comportamiento de la temperatura, la humedad y la textura en función del tiempo de cocción

En la **Figura 6** se observa como la temperatura en el centro del bucatini incrementa con el tiempo de cocción, lo que era de esperarse. Sin embargo el tiempo en el que se alcanza esta estabilidad es un poco diferente, aunque en la cocción de agua y en la cocción de vapor a presión atmosférica es bastante similar (10 minutos), el tiempo de estabilidad en la cocción con vapor a vacío es menor (5 minutos), pues más allá de estos tiempos no se presenta mayor variabilidad de la temperatura.

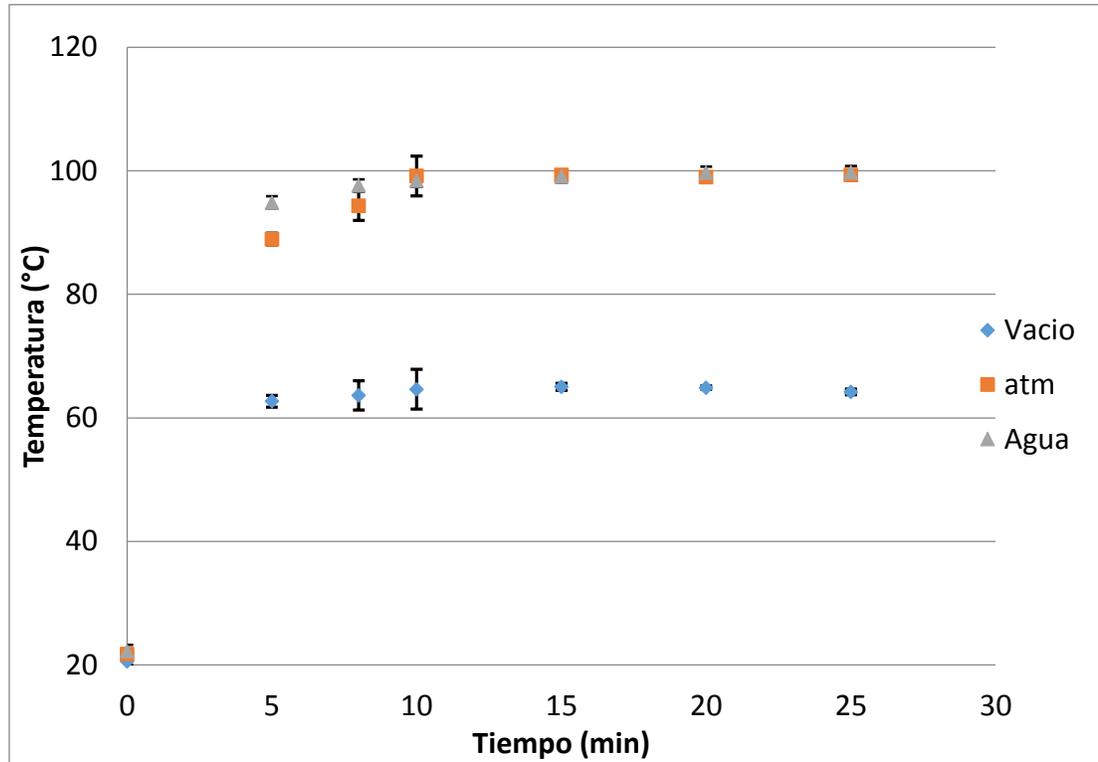


Figura 6. Temperatura en el centro de la muestra en los tres métodos de cocción

En la **Figura 7** se observa el contenido de agua de la muestra con el tiempo de cocción, los resultados muestran como aumentó con el tiempo para los tres métodos de cocción. El contenido de agua fue mayor cocinando la muestra en agua, en cambio para la cocción con vapor a vacío el contenido de agua fue mayor en comparación con la cocción con vapor a presión atmosférica, ya que el vacío genera un gradiente más alto que permite mayor difusión del agua a través de la muestra. Las cantidades de humedad resultantes después de cada método de cocción indicaron que cuando la muestra se sumerge en agua incrementó su peso en 0.78 g, en cocción de vapor a vacío 0.20g y en cocción de vapor a presión atmosférica 0.05 g aproximadamente.

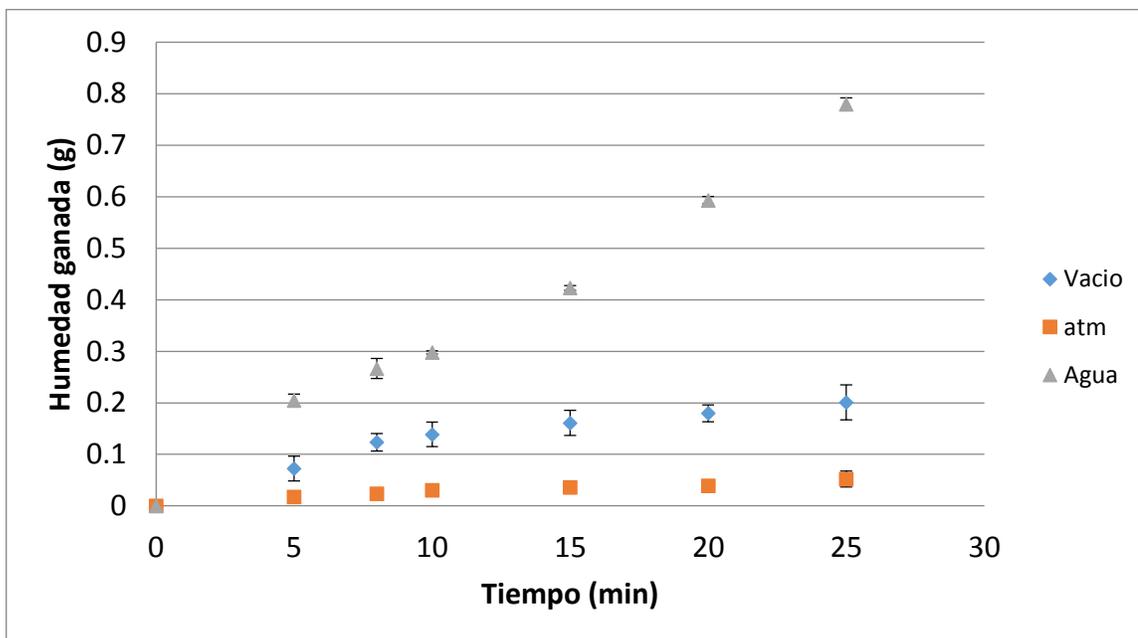


Figura 7. Cantidad de agua ganada por la muestra en los tres métodos de cocción.

En las **Figura 8 a 10** se graficaron las respuestas de textura en función con el tiempo de cocción.

En los tres métodos de cocción las características de la textura disminuyeron con el contenido de agua.

Para la cocción al vacío la textura cambió notablemente durante los primeros 5 minutos, la firmeza y la rigidez disminuyeron rápidamente, y se estabilizaron en este tiempo, donde perdieron el 93,7% y el 98% de sus valores iniciales respectivamente. El trabajo también disminuyó, pero en una tasa inferior.

Para la firmeza y rigidez del vapor atmosférico disminuyen rápidamente pero en menor proporción que el vapor al vacío. El primero continúa disminuyendo y en 25 minutos perdió el 89%, y el segundo perdió el 95% del valor inicial. Ocurre lo mismo con el trabajo

que decreció hasta un 58% con respecto al valor inicial. Esto significa que la energía necesaria para romper la muestra fue menor con el tiempo de cocción.

Cuando la muestra se sumergió en agua las tres propiedades de textura disminuyeron con el contenido de agua, y fueron las más reducidas en comparación con los otros dos métodos de cocción, sólo en 25 minutos la rigidez perdió el 99,8%, la firmeza perdió el 98,8% y el trabajo perdió 93,5% de sus valores iniciales.

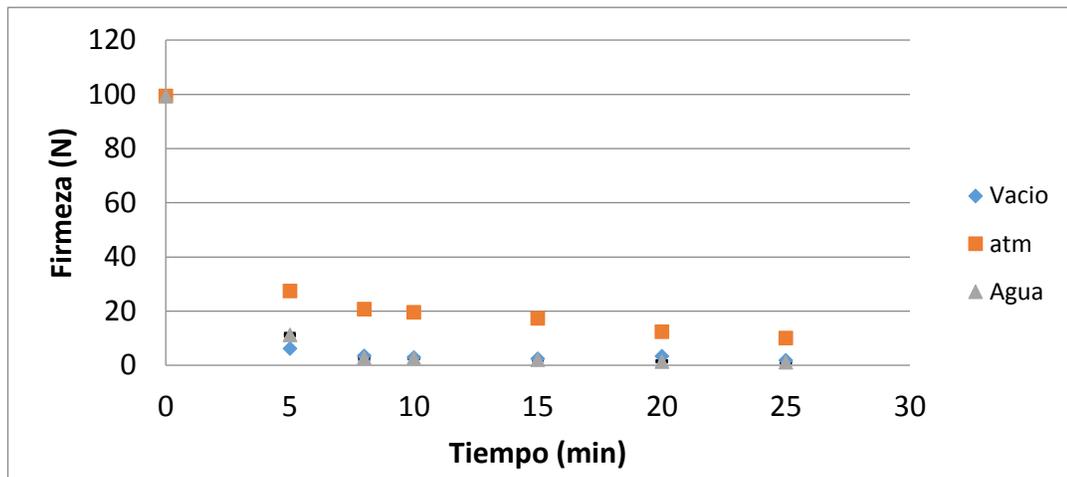


Figura 8. Firmeza de la muestra en los tres métodos de cocción

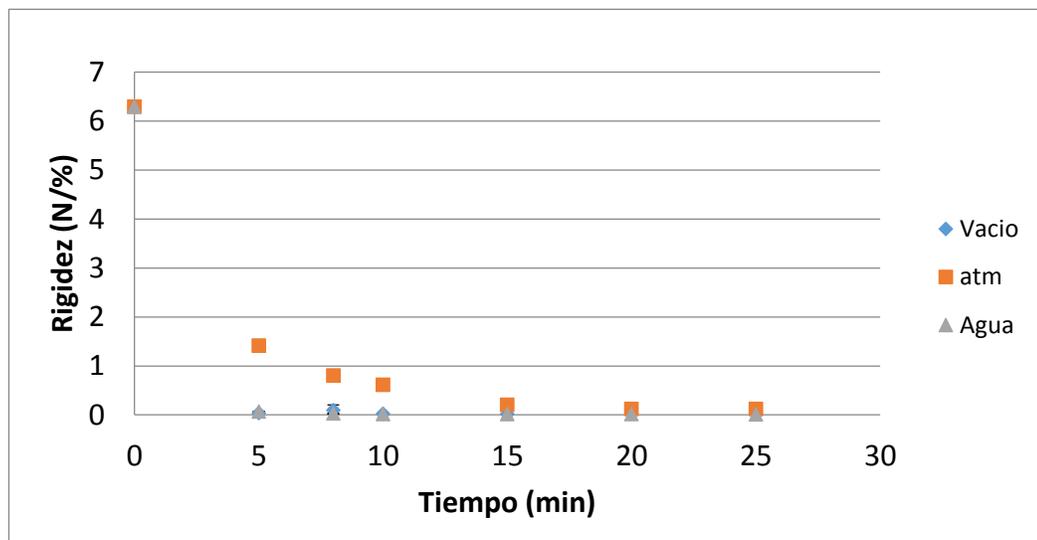


Figura 9. Rigidez de la muestra en los tres métodos de cocción.

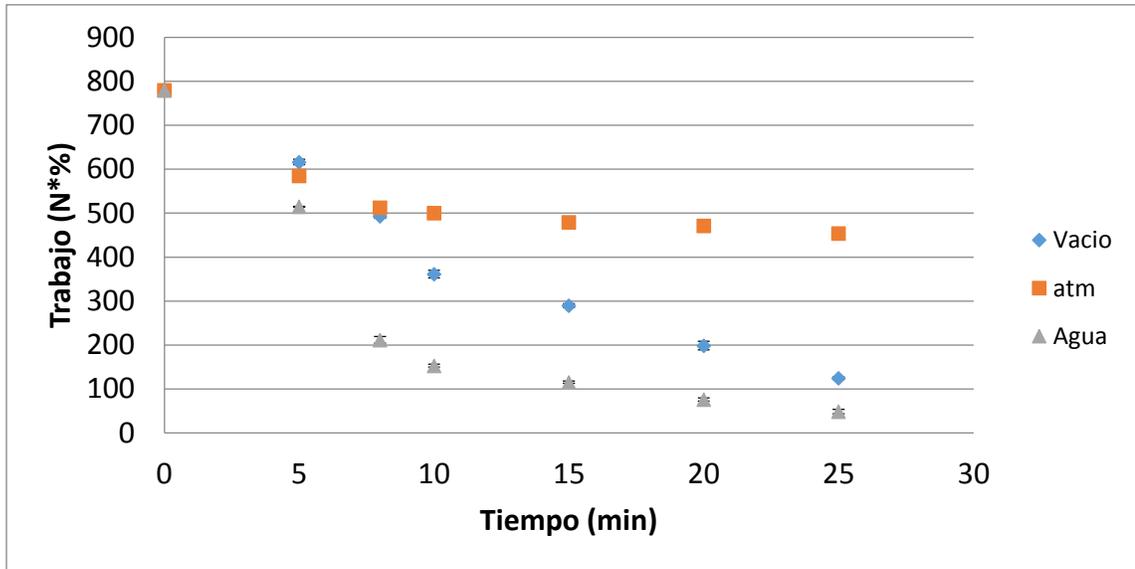


Figura 10. Trabajo de la muestra en los tres métodos de cocción

4.2. Correlaciones de textura

Las ecuaciones 26 a 34 muestran las correlaciones obtenidas de las características de cada textura en función del contenido de agua H y de la temperatura T para cada método de cocción.

Las correlaciones que mejor se ajustaron para la firmeza y la rigidez fueron de segundo orden, y experimentan una interacción entre la temperatura y la humedad, siendo un valor más significativo para la firmeza que para la rigidez en todos los métodos de cocción. Para el caso del trabajo se ajustó mejor a un modelo de primer orden y sin interacciones.

4.2.1. Sumergida en agua a ebullición.

$$F_{sw} = 50.26 - 454.6 * H + 3.022 * T - 30.17 * H^2 + 4.94 * H * T - 0.03638 * T^2 \quad (26)$$

$$R_{sw} = 10.13 + 0.7098 * H - 0.1932 * T - 0.1258 * H^2 - 0.005542 * H * T + 0.000915 * T^2 \quad (27)$$

$$W_{sw} = 898.8 - 524.6 * H - 4.982 * T \quad (28)$$

4.2.2. Cocción con vapor a presión atmosférica

$$F_{as} = 85.9 - 1.257 * 10^4 * H + 0.8681 * T + 1.619 * 10^4 * H^2 + 108.3 * H * T - 0.0113 * T^2 \quad (29)$$

$$R_{as} = 6.739 - 599.3 * H - 0.02153 * T + 2361 * H^2 + 3.847 * H * T + 4.248 * 10^{-5} * T^2 \quad (30)$$

$$W_{as} = 838.7 - 2585 * H - 2.614 * T \quad (31)$$

4.2.3 Cocción con vapor al vacío

$$F_{vs} = 168.3 - 536.7 * H - 3.757 * T + 176.2 * H^2 + 7.258 * H * T + 0.01998 * T^2 \quad (32)$$

$$R_{vs} = 13.78 + 2.264 * H - 0.435 * T + 0.1586 * H^2 - 0.03896 * H * T + 0.003445 * T^2 \quad (33)$$

$$W_{vs} = 705.5 - 4047 * H + 3.631 * T \quad (34)$$

4.3. Resultados del análisis de sensibilidad

Los resultados del análisis de sensibilidad ayudaron a determinar los parámetros que más influyen en el comportamiento de la humedad y la temperatura para cada método de cocción.

Para la cocción en agua los parámetros que más influyen en la transferencia de masa son el coeficiente de difusión, y el coeficiente de transferencia de masa por convección. Para el caso de la temperatura, los parámetros más influyentes son el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua y el coeficiente de transferencia de calor del aire quieto dentro de la muestra. Además la entalpía de gelatinización DH_{melt} y la constante cinética de la reacción de gelatinización no mostraron ser influyentes en la transferencia de masa ni de calor.

Para el caso de las cocciones con vapor, en ambas influyeron 7 parámetros pero en diferentes proporciones. La humedad se ve influenciada por el coeficiente de difusión, el coeficiente de transferencia de masa por convección, por la tasa de condensación (C), por la humedad relativa del medio, y la actividad de agua de la muestra. Para el caso de la temperatura los parámetros más influyentes resultaron ser el coeficiente de transferencia de calor por convección del vapor, y el coeficiente de transferencia de calor del aire quieto dentro de la muestra.

A partir de estos resultados se realizó el proceso de optimización ya que permitió saber que parámetros valía la pena optimizar determinando el ajuste final del modelo a los datos experimentales.

4.4. Resultados del ajuste de parámetros

Los resultados de los parámetros óptimos se encuentran en la **Tabla 5** en donde se indica el valor que mejor se ajustó a los datos experimentales para cada método de cocción.

Debido a la no linealidad del modelo, no es posible comparar los parámetros de manera individual, sino en conjunto, ya que el ajuste se realizó para todos los parámetros de manera simultánea, y cada sistema de cocción posee diferentes condiciones de temperatura y presión.

Para el caso de la cocción con vapor a vacío, la reducción de la presión y de la temperatura, decrecieron el coeficiente de difusión, incrementó el coeficiente de condensación, redujo la actividad de agua, se incrementó la humedad relativa del medio, e incrementaron los coeficientes de transferencia de masa y calor del medio y del aire quieto.

Por otro lado en la cocción del agua en donde la cantidad de agua del medio fue significativamente mayor comparado con las cocciones con vapor, la velocidad de la transferencia de masa fue mayor.

Tabla 5. Parámetros óptimos ajustados a los datos experimentales.

Método de cocción	D [m ² /s]	C [s/m ²]	hc [$\frac{W}{m^2} \cdot K$]	aw	RH	Kc [m/s]	Haq [$\frac{W}{m^2} \cdot K$]
Vapor a presión atmosférica	4.17 · 10 ⁻⁸	5.63 · 10 ⁻¹¹	105.37	0.36	0.80	5.86 · 10 ⁻⁸	38.37
Vapor a vacío	8 · 10 ⁻⁸	4.7 · 10 ⁻¹⁰	120	0.30	0.90	1 · 10 ⁻⁷	45.14
Agua en ebullición	9.26 · 10 ⁻⁸	*	100	*	*	1.7 · 10 ⁻¹⁰	50

* Este parámetro no se encuentra en éste método de cocción.

En las **Figuras 11 a 13** muestran el acoplamiento con el mejor set de parámetros encontrados para cada método de cocción logrando llegar a lo más cercano posible al comportamiento real de cocción. En el lado izquierdo se muestra el ajuste de la humedad.

La línea continua corresponde a los resultados de humedad del modelo optimizado, y los asteriscos corresponden a los datos experimentales, los cuales se grafican con su correspondiente desviación estándar.

En el lado derecho se muestra el ajuste de la temperatura en la cual se muestran tres curvas. La roja corresponde al nodo interno, la cuál es la que se compara con los datos experimentales pues fue en el centro de la muestra en donde se tomaron estos datos, la curva negra que corresponde al promedio de temperatura y la curva azul la cual corresponde a la temperatura del nodo externo o la temperatura de la superficie.

Se puede observar que el modelo planteado para cada método de cocción alcanzó buenas predicciones, en donde los valores simulados se acercan bastante bien a los datos experimentales. Según lo anterior y los parámetros hallados se encontró un modelo de transferencia de masa y calor que en futuras cocciones podría llegar a predecir la cantidad de humedad o temperatura deseada, evitando realizar más pruebas experimentales de las necesarias, lo que significa un ahorro de tiempo y dinero.

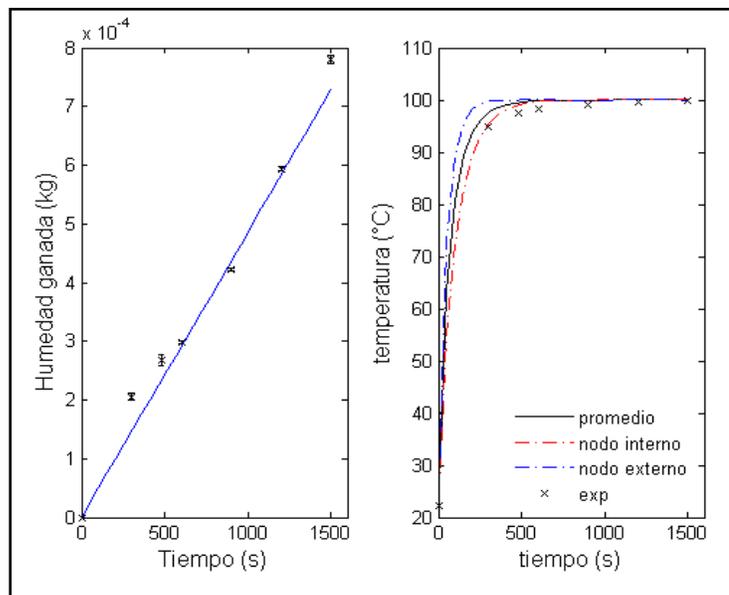


Figura 11. Comparación de los resultados simulados y experimentales de la humedad (izquierda) y la temperatura (derecha) con el tiempo para el método de cocción con agua en ebullición.

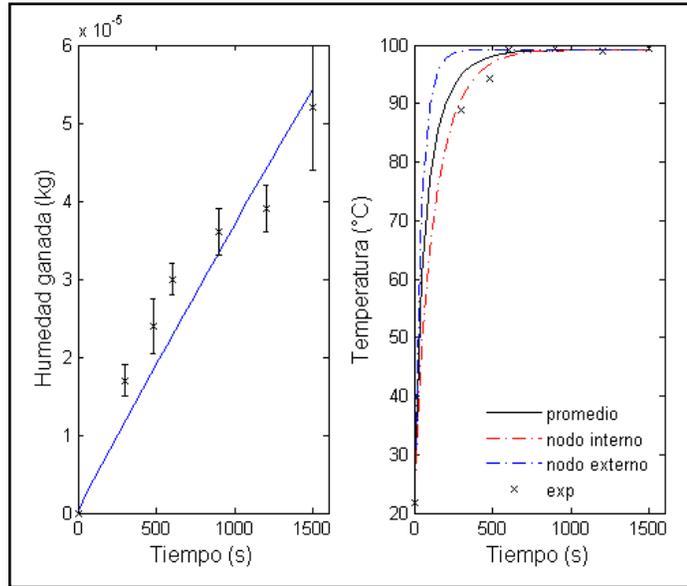


Figura 12. Comparación de los resultados simulados y experimentales de la humedad (izquierda) y la temperatura (derecha) con el tiempo, para el método de cocción con vapor a presión atmosférica.

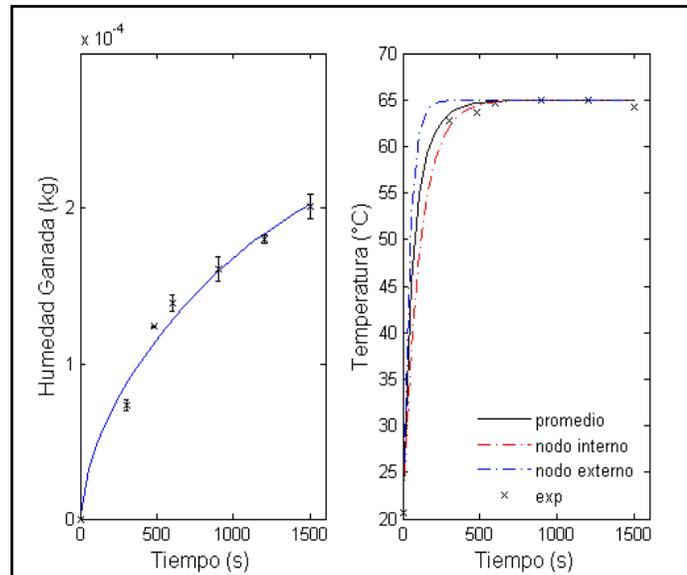


Figura 13. Comparación de los resultados simulados y experimentales de la humedad (izquierda) y la temperatura (derecha) con el tiempo, para el método de cocción con vapor a vacío.

4.5. Resultados del modelo híbrido de textura en función de la humedad y la temperatura.

Se acopló el modelo fenomenológico optimizado con las correlaciones que mejor se ajustaban a los datos experimentales de textura, evaluando las correlaciones de textura con los resultados de humedad y temperatura.

En las **Figuras 14 a 16** Se puede observar en línea roja el comportamiento de las correlaciones de textura evaluadas con los datos simulados de temperatura y humedad obtenidos.

Se puede observar que el comportamiento de la firmeza y la rigidez no es lineal para ninguno de los métodos de cocción, por lo que el mejor ajuste fueron correlaciones polinómicas de segundo orden. Para el trabajo la correlación que mejor se ajustó fue un polinomio de primer orden, esto debido a que presenta un comportamiento más lineal con cambios menos bruscos que la firmeza y la rigidez.

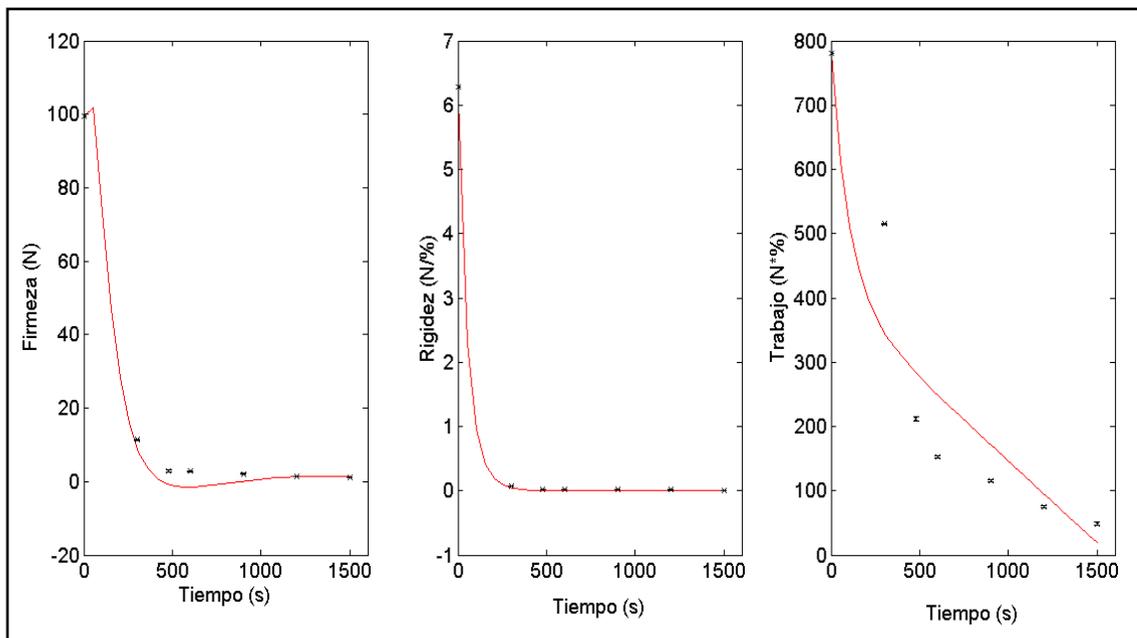


Figura 14. Resultados de textura para la cocción en agua. (línea roja) resultados simulados, y datos experimentales (asteriscos)

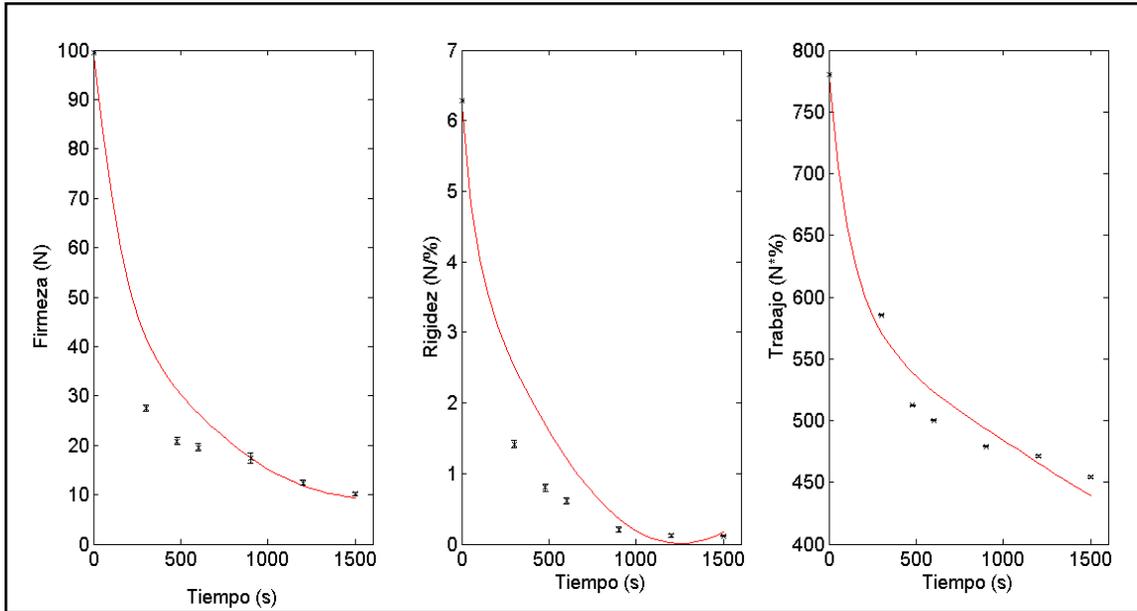


Figura 15. Resultados de textura para la cocción con vapor a presión atmosférica. (línea roja) resultados simulados, y datos experimentales (asteriscos)

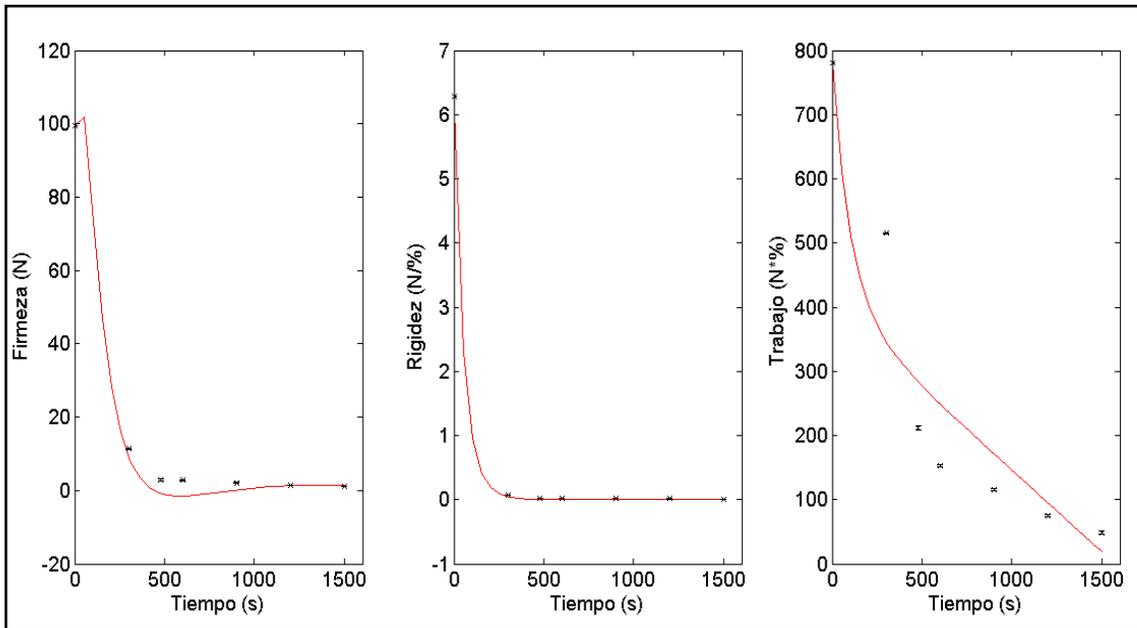


Figura 16. Resultados de textura para la cocción con vapor a vacío. (línea roja) resultados simulados, y datos experimentales (asteriscos)

El coeficiente de determinación (R^2) muestra la bondad del ajuste del modelo a los datos experimentales, y el nivel de significancia (p) el cual si es menor a 0.05, la correlación correspondiente es estadísticamente significativa

Los resultados de los coeficientes de determinación (R^2) y el nivel de significancia (p) de las variables de respuesta para los tres métodos de cocción son mostrados en la Tabla 6. Los ajustes fueron buenos para las cinco variables de respuesta, siendo todos estadísticamente significativos. Sin embargo en la cocción con presión atmosférica el ajuste de la humedad fue menor con respecto a los otros dos métodos de cocción, lo que genera una reducción en el coeficiente de determinación en las tres propiedades de textura. Esto pudo haber sido causado por errores en su medición experimental y la sensibilidad de la balanza de medición ya que los valores de humedad recolectados fueron los más pequeños de los tres métodos de cocción.

Es importante recalcar que la diferencia de concentración del medio con respecto a la muestra es determinante en la transferencia de masa y calor, por lo que la medición de agua en el medio y en la muestra y contar con equipos y metodologías que permitan obtener propiedades como el coeficiente de difusión, y el coeficiente de transferencia de masa durante la cocción del bucatini generaría valores más exactos de transferencia de masa y mejorarían el ajuste.

Los resultados del modelo híbrido es bastante satisfactorio ya que realiza buenas predicciones finales de textura, de tal manera que cuando se quiera obtener una textura determinada, ya sea firmeza, rigidez o trabajo, el modelo híbrido determinará el tiempo de cocción, el cual corresponde a un valor determinado de humedad y temperatura

Tabla 6. Coeficientes de determinación y nivel de significancia para cada método de cocción.

Método de Cocción	Temperatura		Humedad		Firmeza		Rigidez		Trabajo	
	R^2	p	R^2	p	R^2	p	R^2	p	R^2	p
Vapor a presión atmosférica	0.99	$4.74 \cdot 10^{-8}$	0.97	$2.05 \cdot 10^{-4}$	0.98	$1.01 \cdot 10^{-4}$	0.97	$1.59 \cdot 10^{-4}$	0.98	$2.54 \cdot 10^{-5}$
Vapor a vacío	0.99	$6.13 \cdot 10^{-9}$	0.99	$1.07 \cdot 10^{-5}$	0.99	$1.98 \cdot 10^{-12}$	0.99	$1 \cdot 10^{-15}$	0.99	$1.08 \cdot 10^{-5}$
Agua en ebullición	0.99	$3.64 \cdot 10^{-10}$	0.99	$4.56 \cdot 10^{-6}$	0.99	$6.06 \cdot 10^{-8}$	0.99	$1.46 \cdot 10^{-13}$	0.94	$1.21 \cdot 10^{-3}$

6. CONCLUSIONES

La temperatura y la humedad afectaron considerablemente las propiedades de textura del bucatini para los tres métodos de cocción. Las curvas de cada propiedad de textura vs el tiempo de cocción revelaron que con el incremento de la temperatura y la humedad se reduce el valor de todas las propiedades de textura.

Las propiedades de textura del bucatini tuvieron diferencias apreciables entre cada método de cocción. Interesantemente, en el caso del método de cocción con vapor a vacío disminuyeron más que cuando se usó vapor con presión atmosférica, esto debido a que la cantidad capturada de humedad fué mayor. Por otro lado el tiempo de estabilidad de la temperatura fue menor comparandola con el método de cocción con vapor a presión atmosférica, esto posiblemente debido a la baja resistencia de aire que genera el vacío.

Los resultados obtenidos indican que el modelamiento de la transferencia de masa y calor utilizado es una buena herramienta para la predicción de la textura del bucatini, ya que fue validado con coeficientes de determinación (R^2) mayores a 0.94 y niveles de significancia (p) menores a $1.21 \cdot 10^{-3}$. El comportamiento de las propiedades de textura como la firmeza y la rigidez no fué lineal, ajustándose mejor a un polinomio de segundo orden. Para el caso del trabajo su comportamiento se acercó más a un polinomio de primer orden.

La predicción de la textura con el desarrollo de modelos de transferencia de masa y calor abre la oportunidad de hallar con exactitud la textura deseada a cualquier valor intermedio a un menor costo experimental. Trabajos futuros podrian incluir la variación de diferentes niveles de presión en los equipos de cocción, así como también la implementación de instrumentos de medición que permitan obtener con mayor exactitud los valores de los coeficientes de transferencia de masa y calor y las propiedades térmicas del alimento.

REFERENCIAS

- Aguilera, J.(2013). Viaje al interior de los alimentos. Cocinando pasta. Ingeniería gastronómica. Ediciones UC. 113-114.
- Bahrani, S., Monteau, J., Rezzoug, S., Loisel, C., y Maache-Rezzoug, Z. (2014). Physics-based modeling of simultaneous heat and mass transfer intensification during vacuum steaming processes of starchy material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 85, 216–226.
- Baiano, A., Conte, A., y Del Nobile, M. (2006). Influence of drying temperature on the spaghetti cooking quality. *Journal of Food Engineering*, 76(2), 341–347.
- Bernin, D., Steglich, T., Röding, M., Moldin, A., Topgaard, D., y Langton, M. (2014). Multi-scale characterization of pasta during cooking using microscopy and real-time magnetic resonance imaging. *Food Research International*, 66, 132–139.
- Bourne, M.(1982).Texture, viscosity and food. *Food Texture and Viscosity: Concepts and Measurements*. New York. Academic Press, 1-12.
- Briffaz, A., Bohuon, P., Méot, J., Pons, B., Matencio, F., Dornier, M., y Mestres, C. (2014). Modelling of brown rice and limited-water cooking modes and its potential use for texture prediction. *Journal of Food Engineering*, 141, 99–106.
- Brown, G. (2013). Textura: tan relevante como el sabor para alcanzar el éxito. *Food Technology Summy and Expo*. Mexico D.F. Mexico, 7-12.
- Cavalli, P. (2015). La penetración de las pastas en los hogares es del 99.7%. *Las Ultimas Noticias*. Recuperado de: www.lun.com.
- Cengel, Y., y Boles, M. (2002). *Thermodynamics: an engineering approach*. Sea, 1000, 8862.
- Colonna, P., Barry, J., Cloarec, D., Bornet, F., Gouilloud, S., y Galmiche, J. (1990). Enzymic susceptibility of starch from pasta. *Journal of Cereal Science*, 11, 59–70.
- Comsol Multiphysics® Modeling Software. (2017). *Simulating Food Industry Processes and Devices*. Burlington, EU. Recuperado de: www.comsol.com.

- Cunin, C., Handschin, S., Walther, P., y Escher, F. (1995). Structural changes of starch during cooking of durum wheat pasta. *LWT - Food Science and Technology*, 28, 323–328.
- Cuq, B., Goncalves, F., Mas, J., Varelle, L., Abecassis, J. (2003). Effects of moisture content and temperature of spaghetti on their mechanical properties. *Journal of Food Engineering* 59, 51–60.
- De Cindio, B., Brancato, B., y Saggese, A.(1992). Modellazione del processo di essiccamento di Paste Alimentari. University of Naples, IMI-PAVAN Project—Final report.
- Domínguez, F.(2006). El método de las líneas y su aplicación en problemas de ingeniería de alimentos: secado en lechos fluidizados. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria: Revista de Investigación de la Universidad Simón Bolívar*, (5), 6.
- Eliasson, A.(1983). Differential scanning calorimetry studies on wheat starch-gluten mixtures: 1. Effect of gluten on the gelatinization of wheat starch. *Journal of Cereal Science*, 1(3), 199-205.
- Fujita, S., Morita, T., y Fujiyama, G.(1993). The study of melting temperature and enthalpy of starch from rice, barley, wheat, foxtail-millet and proso-millet. *starch-stärke*, 45(12), 436–441.
- González, H., y Gelmi, C.(2014). Métodos numéricos aplicados a la ingeniería: Casos de estudio usando Matlab®. Ediciones UC.
- Gopalakrishna, S., y Jaluria, M.(1992). Heat and mass transfer in a single screw extruder for non-Newtonian materials, *Int J. Heat Mass Transfer* 35, 221-237.
- Isleroglu, H., y Kaymak-Ertekin, F.(2016). Modelling of heat and mass transfer during cooking in steam-assisted hybrid oven. *Journal of Food Engineering*, 181, 50–58.
- Jekle, M., Mühlberger, K., y Becker, T.(2016). Starch-gluten interactions during gelatinization and its functionality in dough like model systems. *Food Hydrocolloids*, 54, 196–201.
- Kee, R., y Petzold, L.(1986). A differential/algebraic equation formulation of the method-of-lines solution to systems of partial differential equations. In Technical Report SAND86–8893. Sandia National Laboratories.

- Kilcast, D. (2004). Improving the texture of pasta. *Texture in food: Solid foods*. Elsevier, 476-496.
- Kulp K., Ponte J.(2000). *Handbook of Cereal Science and Technology*. Segunda edición. Editorial: Marcel Dekker. USA
- Li, J., y Chen, Y.(2009). *Computational partial differential equations using Matlab®*. Boca Raton, CRC Press. 364.
- Liley, P., y Gambill W.(1973). *Physical and Chemical Data. Section 3, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 5th ed.*, McGraw-Hill, New York.
- López, J. (2015). Tomato sauce, macaron, and the science of pasta. *The Food Lab: Better Home Cooking Through Science*. WW Norton & Company. 672-678.
- Marchylo, B., Dexter, J., y Malcolmson, L.(2004). Improving the texture of pasta. In D. Kilcast (Ed.), *Texture in Food, volume 2: Solid foods*, 475–500.
- Migliori, M., Gabriele, D., De Cindio, B., y Pollini, C.(2005). Modelling of high quality pasta drying: Mathematical model and validation. *Journal of Food Engineering*, 69, 387–397.
- Miranda, R.(2011). *Modelación dinámica fenomenológica y simulación: destilación batch de una mezcla etanol-metanol-agua (Doctoral dissertation, Pontificia Universidad Católica de Chile)*.
- Mujumdar, A.(2001). Transport Properties of Foods. *Drying Technology*, Vol. 19, 2383–2384.
- Myhrvold, N., Young, C., y Bilet, M.(2011). *Traditional cooking, steaming. Modernist cuisine*. Cologne, Germany: Taschen, 70-74.
- Ovalle, N., Cortés, P.,y Bouchon, P. (2013). Understanding microstructural changes of starch during atmospheric and vacuum heating in water and oil through online in situ vacuum hot-stage microscopy. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 17, 135-143.
- Peirò, A.(2015). Propiedades tecnofuncionales de formulaciones de pasta fresca rica en fibra, 9-12.

Sandoval, G., y Álvarez, M.(2011). Desarrollo de mezclas farináceas de cereales (maíz, quinua y cebada) y papas ecuatorianas como sustitutos parciales del trigo importado para la elaboración de pan y fideos. Manual de la elaboración de pastas alimenticias. Ambato. Ecuador, 3-5.

Saravacos, G., y Kostaropoulos, A.(1996). Engineering properties in food processing simulation. *Computers Chemical Engineering*, 20(96), 461–466.

Sayar S., Turhan M., Gunasekaran S.(2001). Analysis of chickpea soaking by simultaneous water transfer and water–starch reaction, *J. Food Eng.* 50, 91-98.

Schiesser, W., y Griffiths W.(2009). *Compendium of Partial Differential Equation Models: Method of Lines Analysis with Matlab®*. Nueva York, Cambridge University Press. 474 p.

Skiba, Y.(2005). *Métodos y esquemas numéricos: Un análisis computacional*. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México. 420 p.

Smewing, J.(1997). Analyzing the texture of pasta for quality control. *Cereal Food World*, 42:8-12.

Vaclavik, V., y Elizabeth, W.(1998). *Fundamentos de Ciencia de los Alimentos*. Zaragoza, ES: Acribia, 45-60.

Valentas, K., Rotstein, E., y Singh, R.(1997). Thermal properties of Major Components of Foods as function of Temperature. *Handbook of food engineering practice*. CRC press

Wieser, H.(2007). Chemistry of gluten proteins. *Food microbiology*, 24(2), 115-119.

Xie, F., Liu, H., Chen, P., Xue, T., Chen, L., Yu, L., y Corrigan, P.(2007). Starch Gelatinization under Shearless and Shear Conditions. *International Journal of Food Engineering*, 2(January).

APÉNDICES

APÉNDICE A: Resultados gráficos del análisis de sensibilidad.

Este análisis es presentado para un valor de 5 nodos. Los 5 primeros corresponden a la humedad (X_1 a X_5) y los siguientes (X_6 a X_{10}) corresponden a la temperatura. Las barras verdes representan el grado de influencia de cada parámetro. En la **Figura A1** se presenta los parámetros estudiados en la cocción en agua.

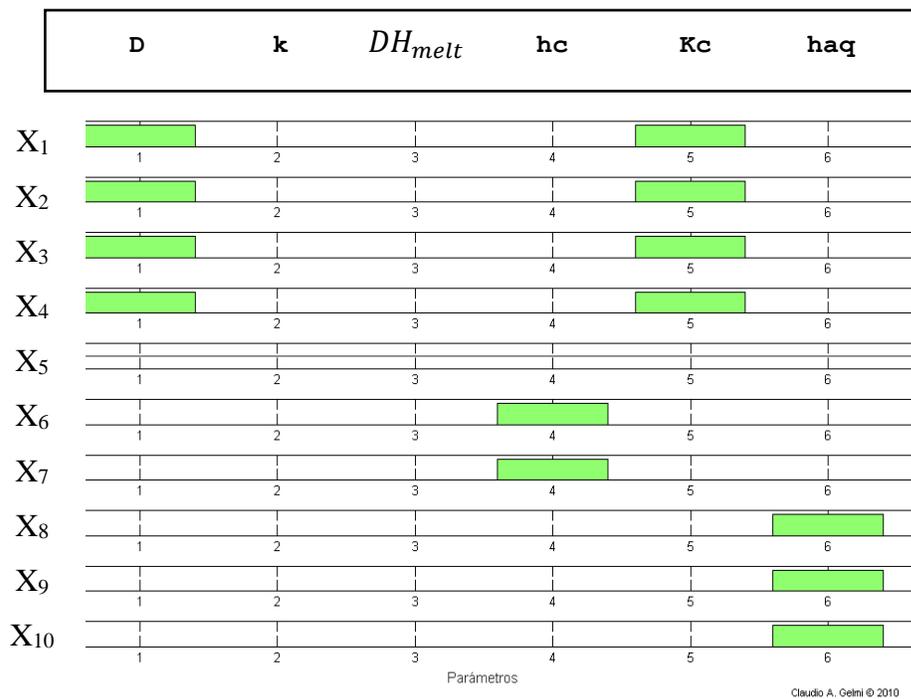


Figura A1. Parámetros sensibles en el modelo fenomenológico de la cocción en agua

En las **Figuras A2 y A3** los parámetros más influyentes en el modelo fenomenológico para ambos métodos de cocción con vapor fueron los mismos independientemente de las condiciones de trabajo de cada uno, sin embargo en una proporción diferente.

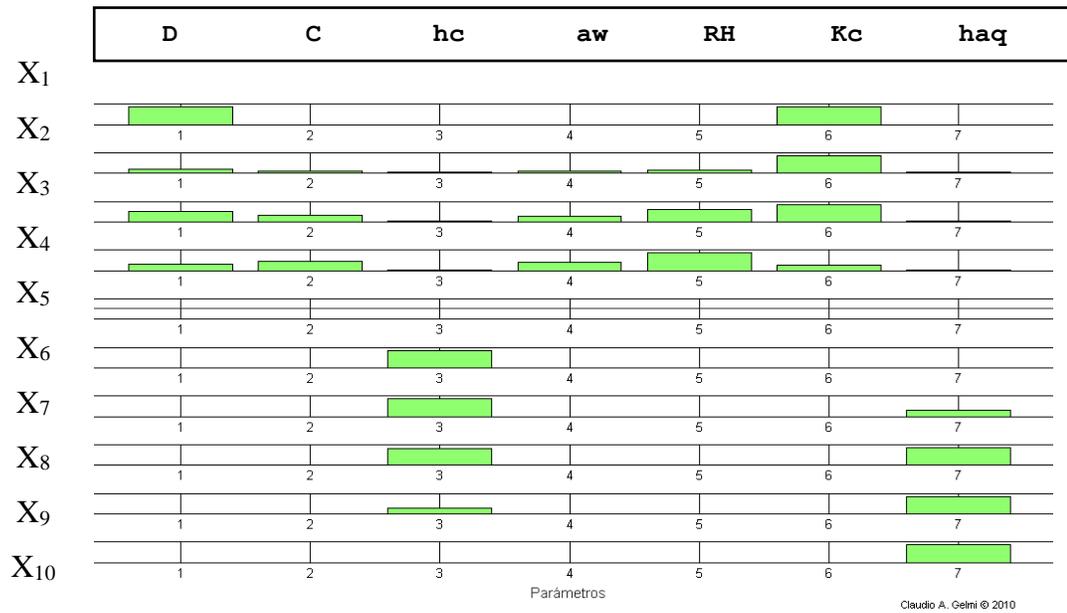


Figura A2. Parámetros sensibles en el modelo fenomenológico de la cocción en vapor a presión atmosférica

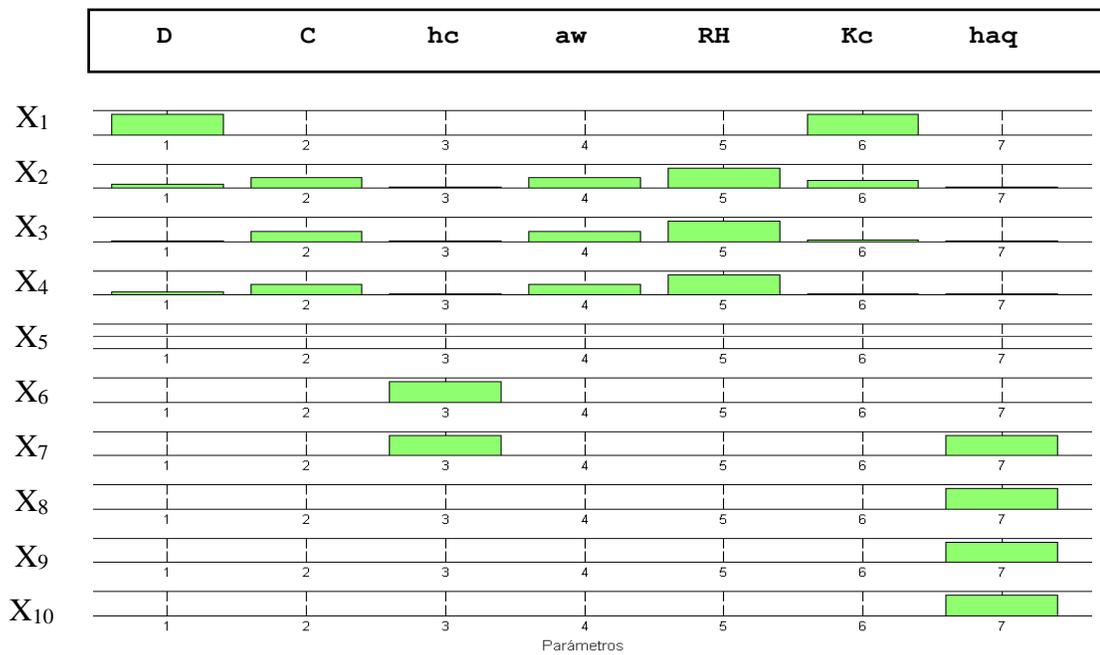


Figura A3. Parámetros sensibles en el modelo fenomenológico de la cocción en vapor a vacío

APÉNDICE B: Gráficas de las características de textura en función de la humedad y la temperatura.

A continuación se muestran las figuras obtenidas de cada propiedad de textura para cada método de cocción representadas en diagramas en 3D. El eje Y corresponde a la temperatura, el eje X corresponde a los gramos de humedad ganada, el eje Z representa la propiedad de textura correspondiente, y los puntos negros representan los datos experimentales.

Sumergida en agua a ebullición.

En la **Figura B1**. Se puede observar que en la zona amarilla en donde existen bajas cantidades de humedad (hasta 0.05 g aproximadamente) y bajas temperaturas desde 20°C a 63°C, se presentan altos valores de firmeza alrededor de 90 a 99 N. A medida que incrementa la temperatura y la humedad los valores de firmeza se van reduciendo. Se puede observar varias zonas que dependiendo de la temperatura y la humedad se puede predecir un valor de firmeza. La humedad resulta determinante en esta propiedad de textura, ya que con valores bajos de humedad la firmeza se reduce notablemente.

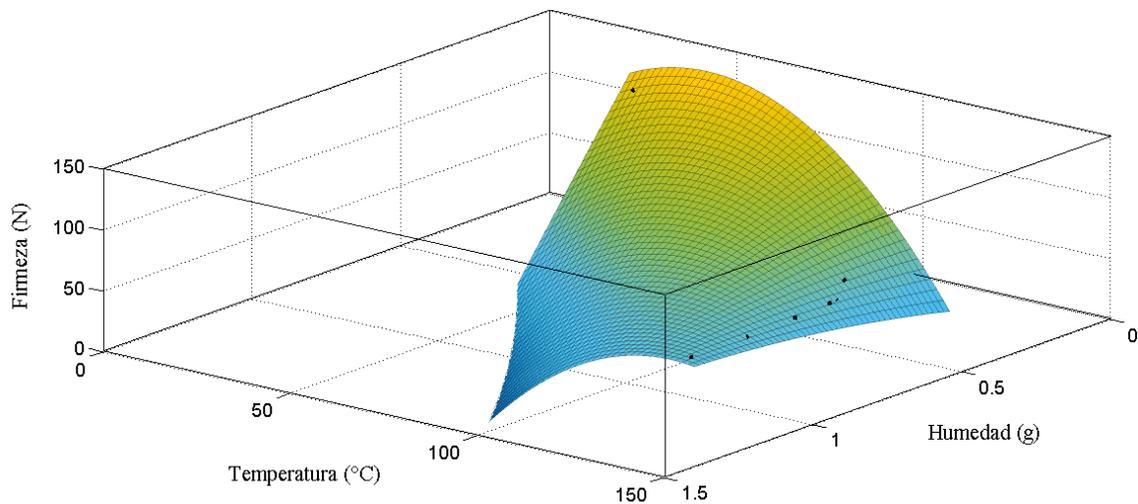


Figura B1. Firmeza en función de la humedad y la temperatura en cocción con agua.

En la **Figura B2**. Se obtiene el comportamiento de la rigidez con respecto a la cantidad de humedad y temperatura. Se puede observar su notable reducción con el aumento de la temperatura, sobre todo a partir de 70°C. Con respecto a la humedad para un valor de 0.2 g ya se notó un cambio notable, en la cual pasa de la zona verde (con valores de firmeza mayores) a la zona roja (con valores de firmeza muy bajos).

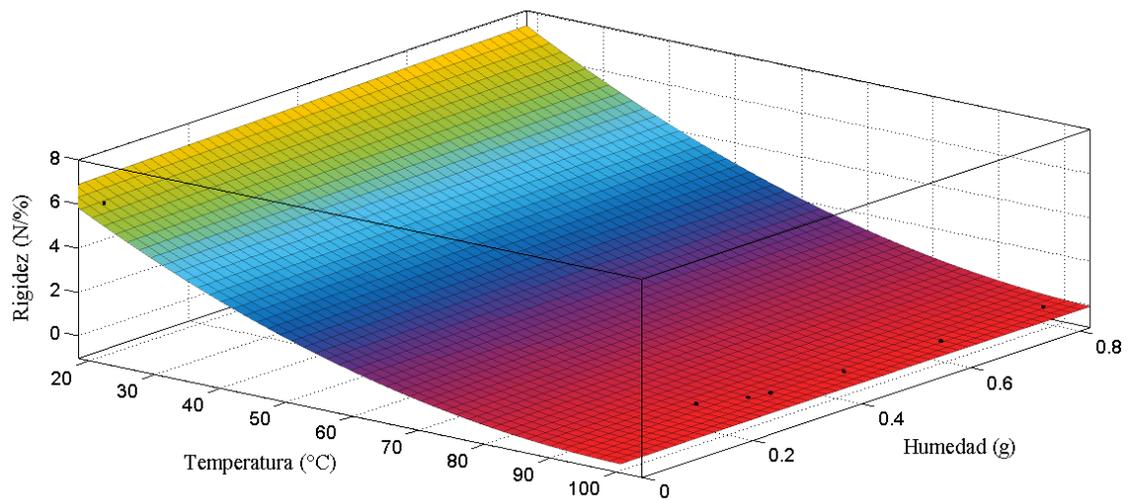


Figura B2. Rigidez en función de la humedad y la temperatura en cocción con agua

En la **Figura B3**. Se observa el comportamiento del trabajo, el cuál disminuye notablemente teniendo un comportamiento casi lineal con la temperatura y con la humedad, ya que cuando ambas incrementan el trabajo va decreciendo.

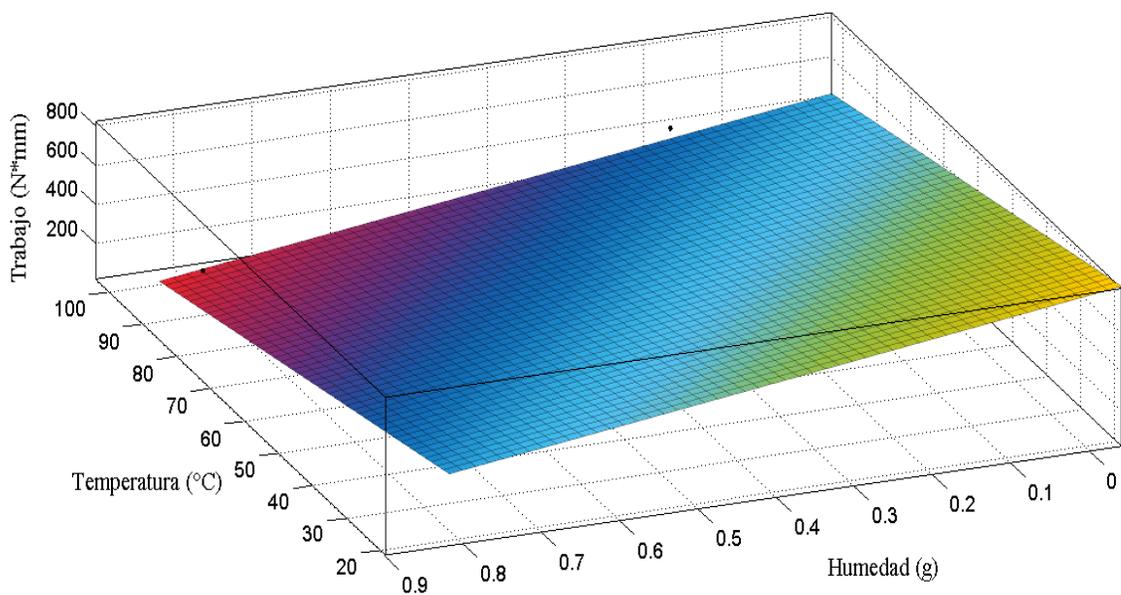


Figura B3. Trabajo en función de la humedad y la temperatura en cocción con agua.

Cocción con vapor a presión atmosférica

En la **Figura B4** se observa la reducción de la Firmeza a medida que incrementa la temperatura y la cantidad de humedad. Se observa que el máximo en firmeza se encuentra con la mínima cantidad de humedad y la menor temperatura, y la mínima firmeza se presenta cuando existe la máxima temperatura y la mayor cantidad de humedad. Algo muy similar ocurre en la **Figura B5**, ya que la rigidez decrece también con el aumento de la temperatura y la humedad. Para ambas propiedades en este método de cocción hubo también cambios drásticos con pequeños cambios de humedad que dependiendo de la temperatura se obtienen los valores de firmeza y rigidez.

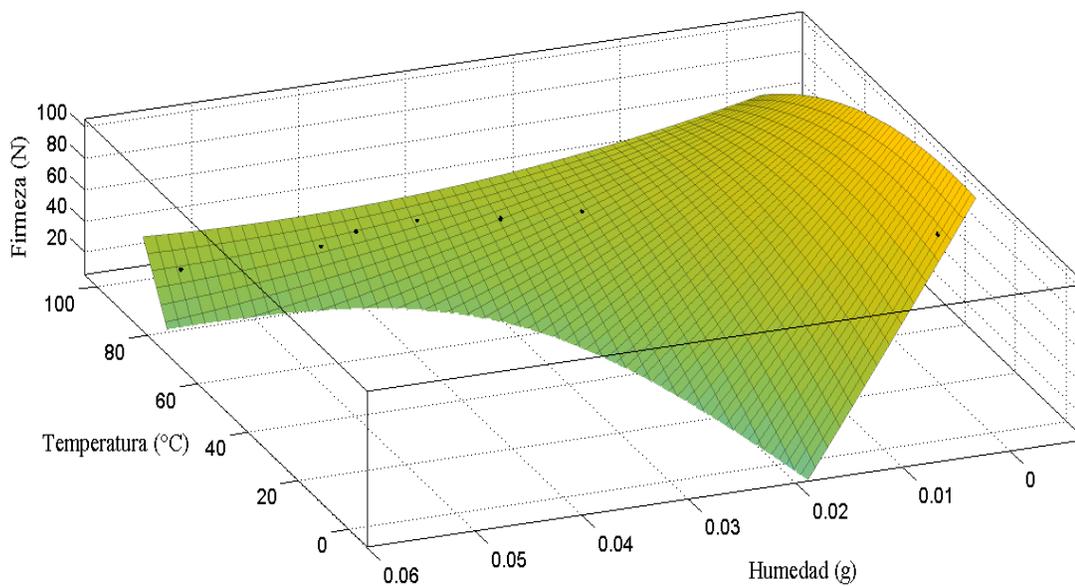


Figura B4. Firmeza en función de la humedad y la temperatura con vapor a presión atmosférica

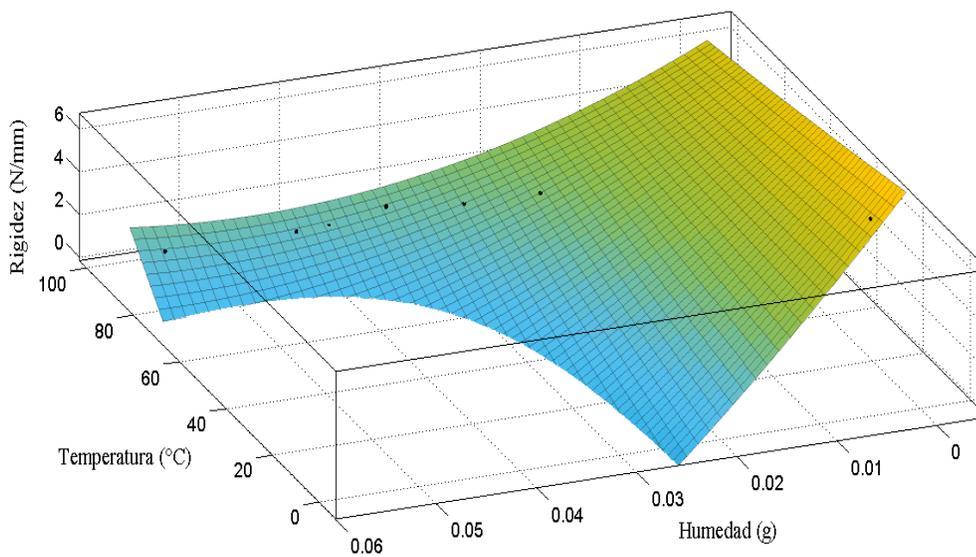


Figura B5. Rigidez en función de la humedad y la temperatura con vapor a presión atmosférica.

En la **Figura B6**. Se observa una reducción del trabajo con el incremento de la humedad y la temperatura. Comportamiento similar obtenido en el anterior método de cocción, sin embargo el valor final alcanzado en este método de cocción es mayor.

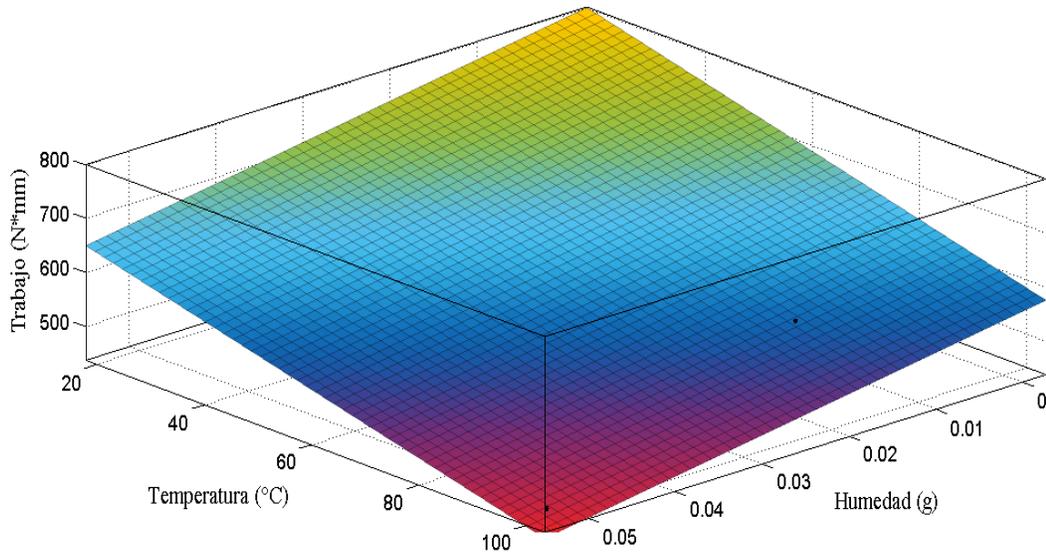


Figura B6. Trabajo en función de la humedad y la temperatura con vapor a presión atmosférica.

Cocción con vapor al vacío.

En la **Figura B7** se observa un decrecimiento brusco en la firmeza desde valores muy pequeños de humedad hasta 0.07g, en la cual ingresa a la zona roja, que indica los valores más bajos alcanzados experimentalmente. La temperatura por su parte también influye en el cambio de firmeza, ya que cuando más alta se encuentra los valores de firmeza son menores también.

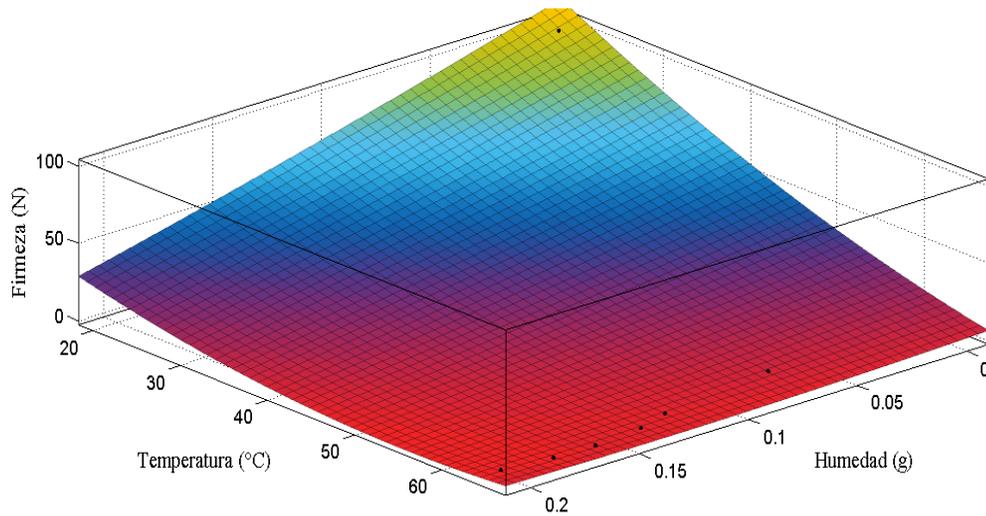


Figura B7. Firmeza en función de la humedad y la temperatura con vapor al vacío.

En la **Figura B8** se observa una reducción más brusca de la rigidez con el incremento de la humedad y la temperatura comparado con el método de cocción a presión atmosférica.

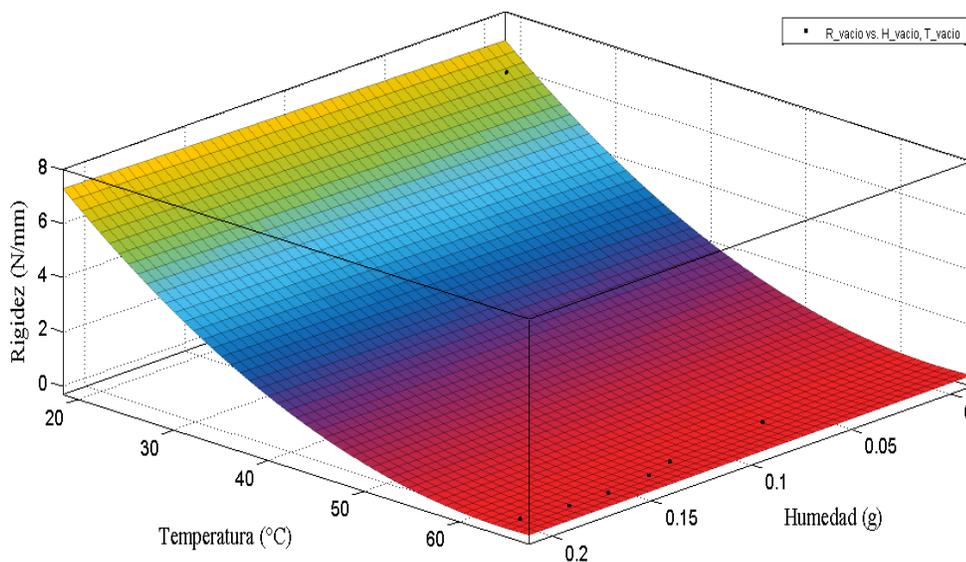


Figura B8. Rigidez en función de la humedad y la temperatura con vapor al vacío.

En la **Figura B9** se puede observar como el trabajo disminuye con el incremento en la temperatura y la humedad. Para este caso con 0.07 g de humedad a una temperatura de 63°C aproximadamente se observa una notable reducción. En este caso el trabajo sigue cambiando con el incremento de la humedad aunque la temperatura sea aproximadamente constante.

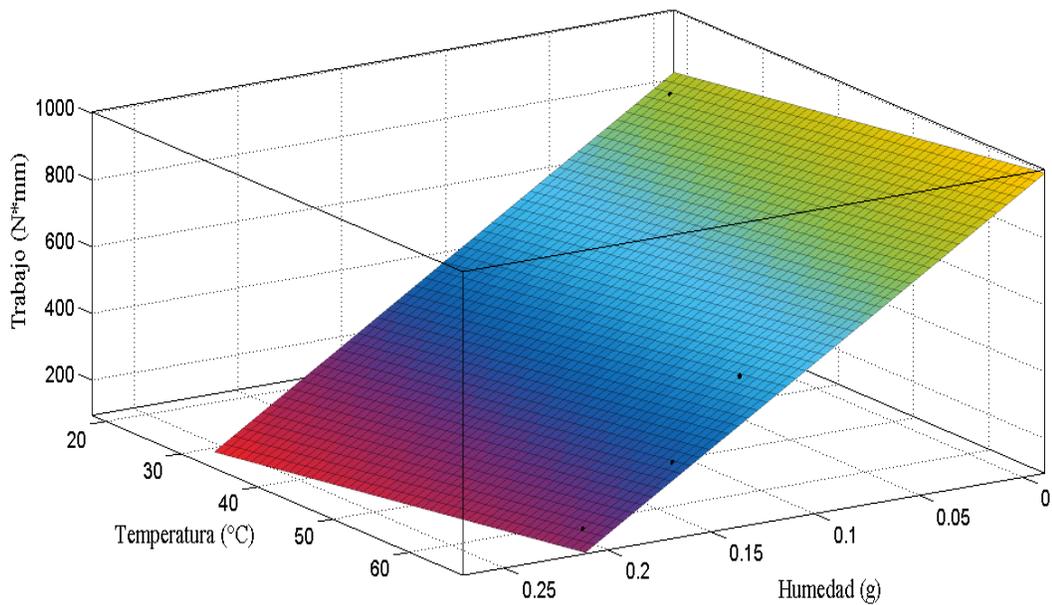


Figura B9. Trabajo en función de la humedad y la temperatura con vapor al vacío.

APÉNDICE C: Resultados de la humedad y la temperatura a través del grosor de la muestra durante la cocción.

Las graficas de humedad y temperatura con respecto al grosor ayuda a conocer mas en detalle la transferencia de masa y calor, ya que permiten determinar la cantidad de humedad y la temperatura que se tiene en cada fracción de la muestra.

En las **Figuras C1 y C2** se muestran los resultados de la humedad y la temperatura a través del grosor de la muestra en la cocción con agua a través del tiempo. Los resultados son bastante coherentes ya que indican que hay un incremento en la cantidad de humedad en cada nodo con el tiempo y que hay un gradiente desde el medio hacia el centro del bucatini. Estas graficas muestran la distribución de humedad y temperatura en cada nodo.

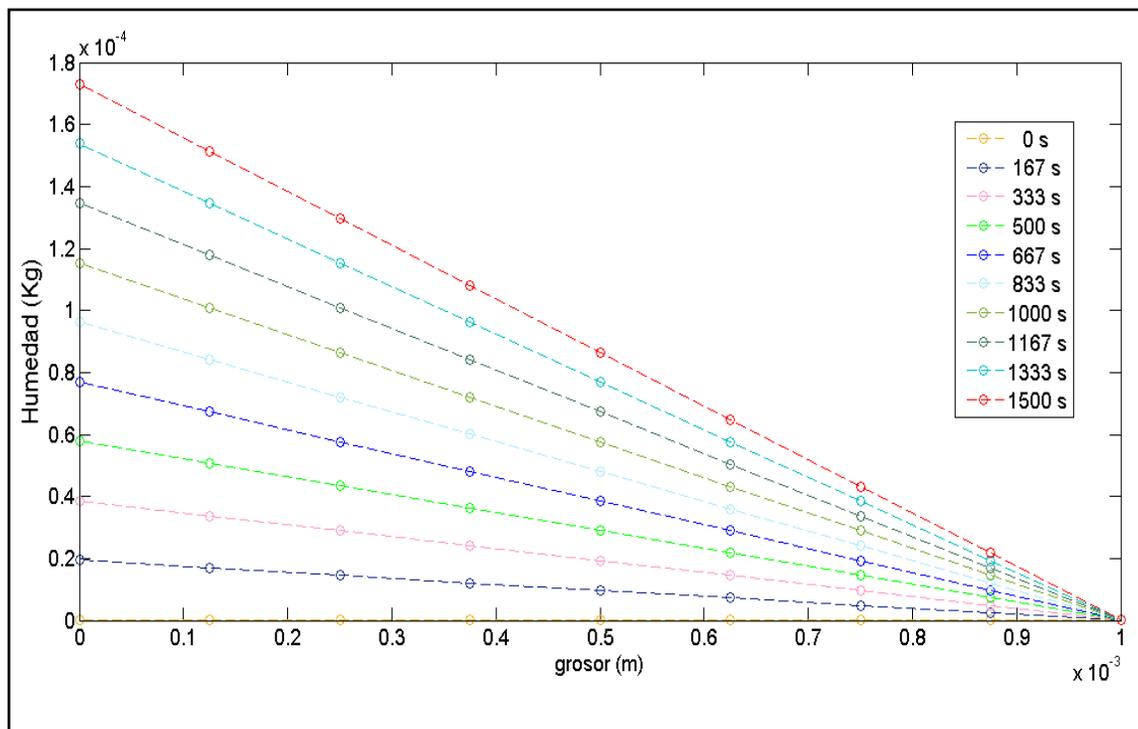


Figura C1. Comportamiento de la humedad con respecto al grosor de la muestra en la cocción con agua

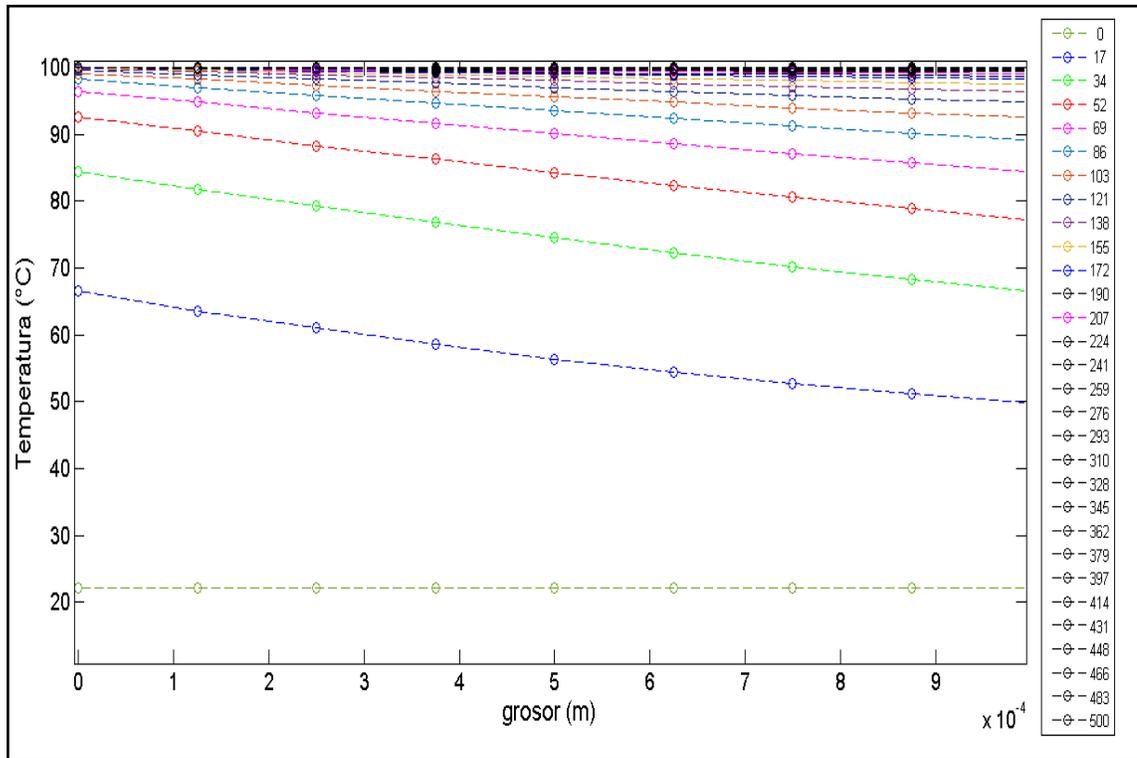


Figura C2. Comportamiento de la temperatura con respecto al grosor de la muestra en la cocción con agua

En las **Figuras C3 y C4** se observa el comportamiento de la humedad y la temperatura de la cocción con vapor a presión atmosférica. Para el primer caso se observa una transferencia de masa lineal a través de todo el bucatini y que va incrementando a medida que transcurre el tiempo de cocción. Con respecto a la temperatura la transferencia de calor a través del bucatini también es lineal y disminuye esta tasa de transferencia a los 500 segundos aproximadamente en donde la temperatura en la muestra se encuentra uniforme.

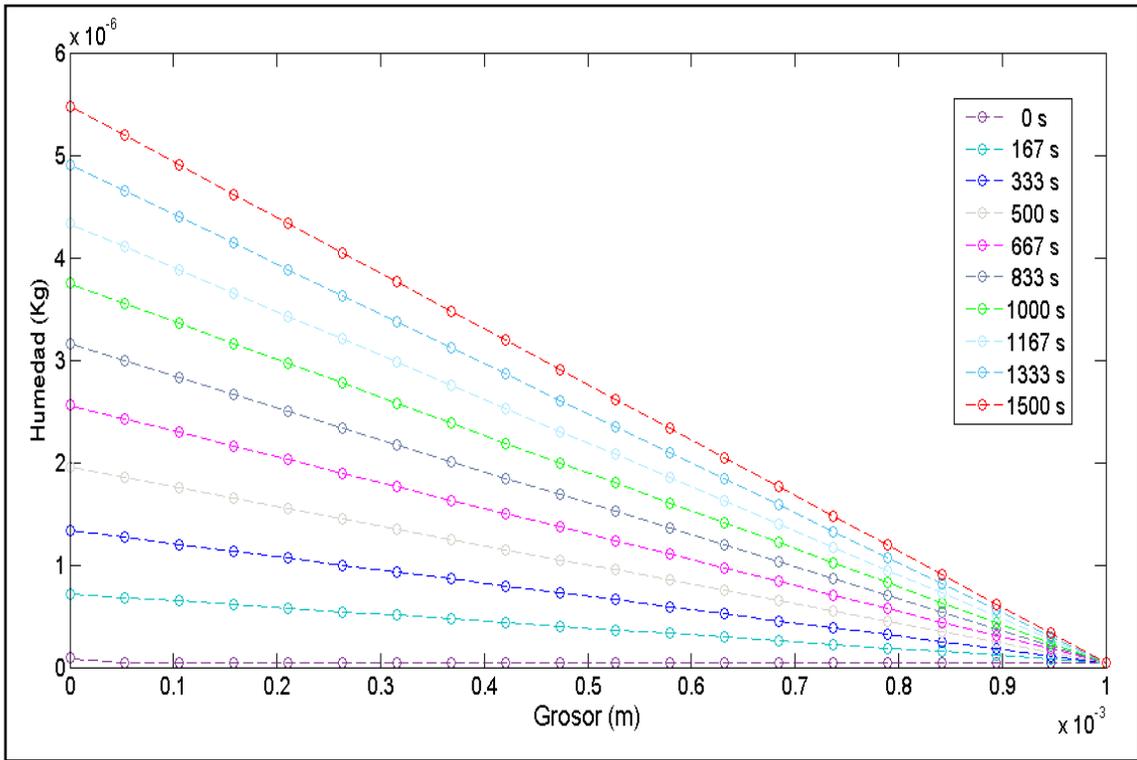


Figura C3. Comportamiento de la humedad con respecto al grosor de la muestra en la cocción con vapor a presión atmosférica.

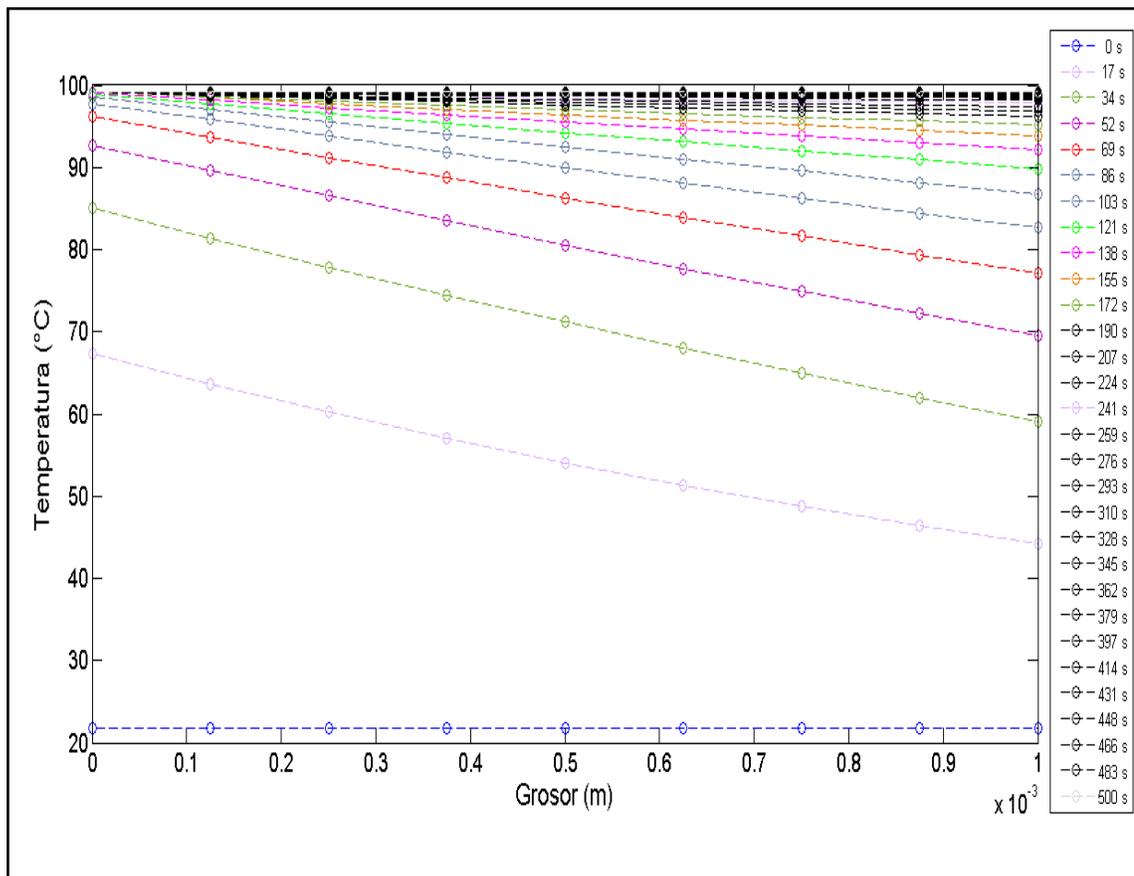


Figura C4. Comportamiento de la temperatura con respecto al grosor de la muestra en la cocción con vapor a presión atmosférica.

En la **Figura C5** se observa un comportamiento diferente a los otros dos métodos de cocción, ya que la transferencia de humedad no es lineal con el tiempo a través de la muestra.

Se observa que en pocos segundos la humedad de la superficie del bucatini alcanza su máxima saturación y la transferencia es mayor en los nodos exteriores, y que va decreciendo a medida que se acerca al centro de la muestra.

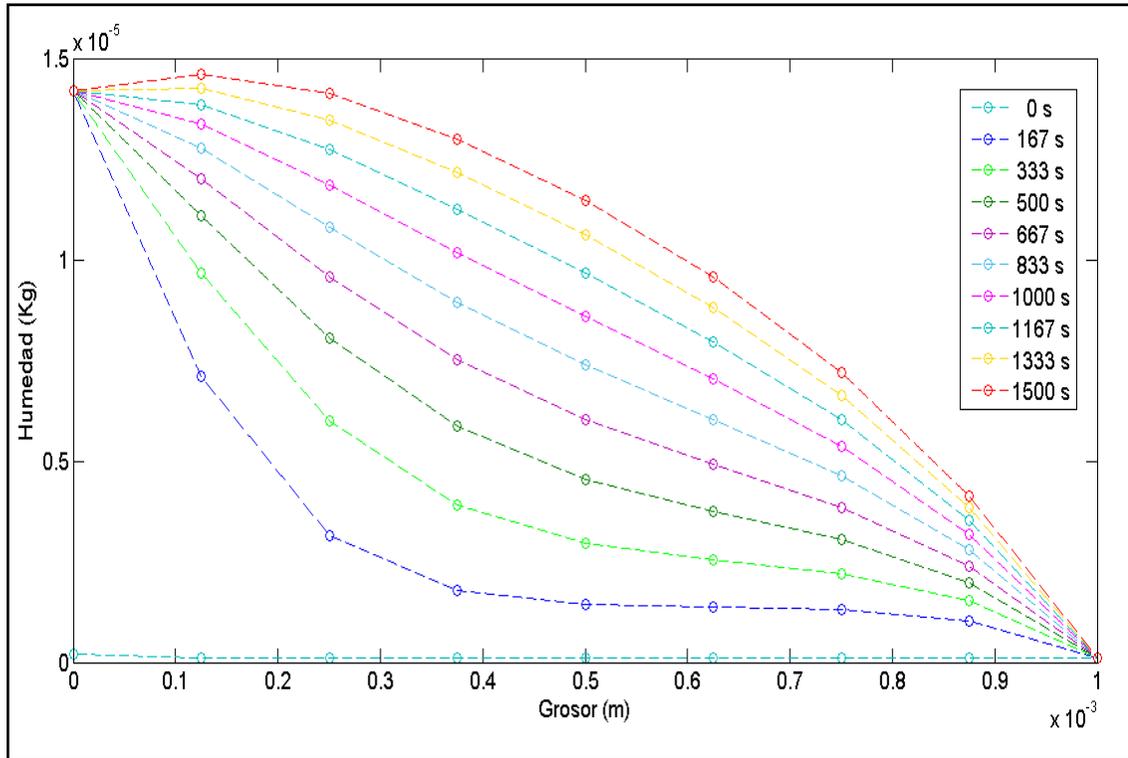


Figura C5. Comportamiento de la humedad con respecto al grosor de la muestra en la cocción con vapor a vacío.

En la **Figura C6** se observa el comportamiento de la temperatura a través de la muestra el cual indica al igual que en los dos métodos de cocción anteriores una transferencia de calor lineal que va decreciendo a medida que se acerca al nodo interno de la muestra.

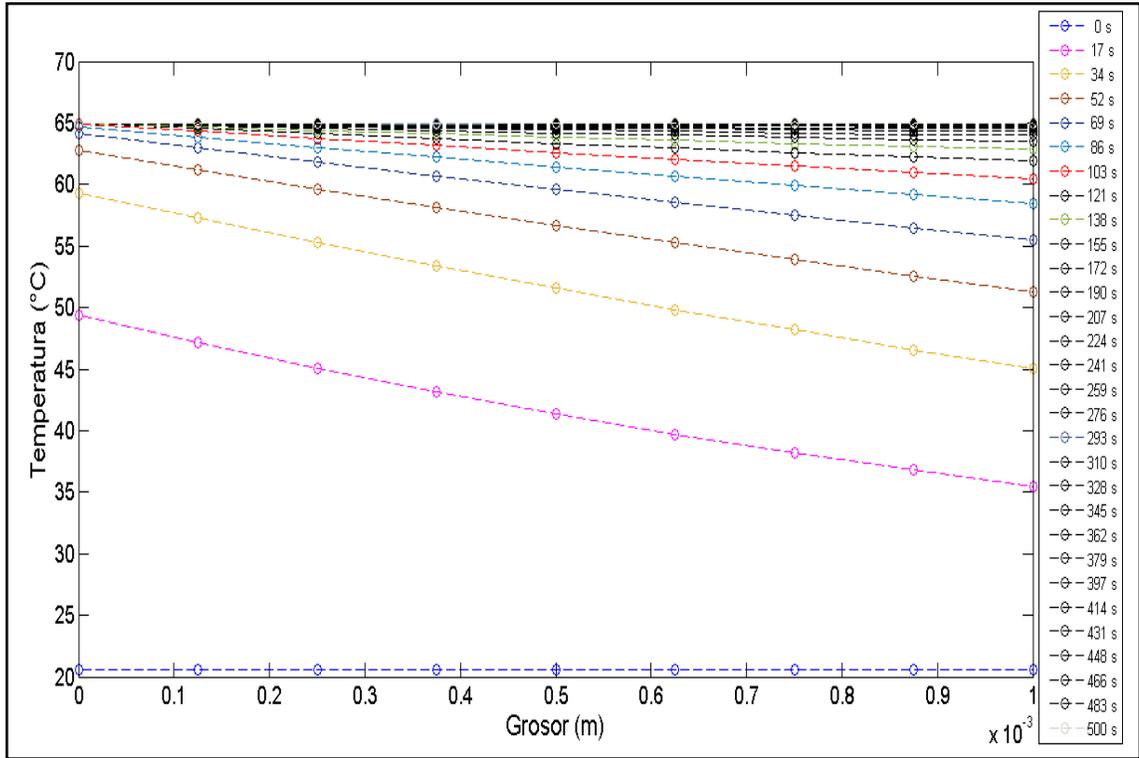


Figura C6. Comportamiento de la temperatura con respecto al grosor de la muestra en la cocción con vapor a vacío